

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## **Методические указания**

к практическим занятиям  
по дисциплине «РАЗРАБОТКА УЗЛОВ И БЛОКОВ РЭА»  
для студентов направления подготовки  
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
Направленность (профиль)  
«Интеллектуальные программируемые системы и устройства»

**Ставрополь**  
**2026**

УДК  
ББК

Дюдюн Д.Е. Разработка узлов и блоков РЭА: методические указания  
практическим занятиям. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 202\_. – \_ с.

Настоящие методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Разработка узлов и блоков РЭА» предназначены для студентов направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, профиль подготовки Интеллектуальные программируемые системы и устройства. В методических указаниях приведены разделы теоретического материала, необходимые для изучения дисциплины, а также контрольные вопросы для формирования и контроля владения компетенциями. Приведён список литературы, позволяющий студентам более глубоко познакомиться с изучаемым предметом.

Методические указания составлены в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, рабочими учебными планами и программами дисциплины «Разработка узлов и блоков РЭА».

УДК  
ББК

## Список сокращений и обозначений

АЛУ - арифметическо-логическое устройство  
АПХ – амплитудная передаточная характеристика  
АЧХ - амплитудно-частотная характеристика  
АХ - амплитудная характеристика  
АЦП – аналого-цифровой преобразователь  
АЭУ - аналоговое электронное устройство  
БИС – большая интегральная схема  
БМК - базовый матричный кристалл  
ВЧ - высокая частота  
ГСТ - генератор стабильного тока  
ДМДП - динамическая логика на МДП-транзисторах  
ДТЛ – диодно – транзисторная логика  
ДУ - дифференциальный усилитель  
ДК - дифференциальный каскад  
ЗУ – запоминающее устройство  
ЗУПВ – запоминающее устройствов произвольной выборкой  
ИИЛ или  $I^2L$  – инжекторно – интегральная логика.  
ИМС - интегральная микросхема  
ИП - источник питания  
ИС - интегральная схема  
КМДП - логические элементы на комплементарных МДП-транзисторах  
КМОП - комплементарный полевый транзистор  
КПД - коэффициент полезного действия  
ЛПД - лавинно-пролетный диод  
МаБИС – матричная большая интегральная схема  
МБ – младший байт  
МДП - структура «металл-диэлектрик-полупроводник»  
МИС – малая интегральная схема  
МОП - структура “металл-окисел-полупроводник”  
МП – микропроцессор

МПЦОС – микропроцессор цифровой обработки сигналов  
НСТЛ - транзисторная логика с непосредственными связями

НЧ - низкая частота

ОБ - общая база

ОЗ - общий затвор

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство

ОИ - общий исток

ОК - общий коллектор

ОС - общий сток

ООС - отрицательная обратная связь

ОЭ - общий эмиттер

ПД - полупроводниковый диод

ПЗУ – постоянное запоминающее устройство

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

ПЛИМ - программируемая логическая матрица

ПМЛ – программируемая матричная логика

ППЗУ - постоянное запоминающее устройство с однократным программированием по заданной программе

ПОС - положительная обратная связь

ПТ - полевой транзистор

ПУ - предварительный усилитель

ПФ – полосовой фильтр

ПХ - переходная характеристика

РПЗУ - постоянное запоминающее устройство перепрограммируемое (репрограммируемое), с возможностью многократного электрического перепрограммирования

РТЛ – резисторно – транзисторная логика

СБ – старший байт

СБИС – сверхбольшая интегральная схема

СИС – средняя интегральная схема

ССИС – сверхскоростная интегральная схема



ТЛИП - транзисторные логические элементы с инжекционным питанием

ТТЛ – транзисторно- транзисторная логика

ТТЛШ - транзисторно- транзисторная логика с транзистором с диодом Шотки

ТКН - температурный коэффициент напряжения

ТЯ – топологическая ячейка

УПТ - усилитель постоянного тока

УНЧ - усилитель низкой частоты

УЭ - усилительный элемент

ФВЧ – фильтр верхних частот

ФНЧ – фильтр нижних частот

ФЧХ -фазочастотная характеристика

ФНЧ – фильтр нижних частот

ФЯ – функциональная ячейка

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

ЦОС – цифровая обработка сигналов

ЦИС - цифровая интегральная схема

ЧХ - частотная характеристика

ША - шина адреса

ШД - шина данных

ШПУ - широкополосные усилители

ЭЗУ – элементарное запоминающее устройство

ЭЗЭ - элементарный запоминающий элемент

ЭСЛ – эмиттерно-связанная логика

# 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

[1.1. Понятие конструкции.](#)

[1.2. Структура и связи.](#)

[1.3. Конструктивная реализация ЭС.](#)

[1.4. Составные части процесса конструирования.](#)

[1.5. Жизненный цикл ЭС.](#)

[1.6. Конструкторское проектирование.](#)

[1.7. История конструирования ЭС.](#)

[Контрольные вопросы.](#)

Л и т е р а т у р а: [[5](#), [15](#), [21](#), [40](#), [42](#)].

## 1.1. Понятие конструкции

Как и при изобретении первого радиоаппарата А. С. Попова (1895), сегодня при изготовлении современных радиоэлектронных устройств решается вопрос создания той или иной конструкции. Если пригодность для эксплуатации первых радиоустройств определялась фактически только качеством передаваемого сигнала, то современные устройства должны не только хорошо работать, но и быть ремонтпригодными, легко настраиваемыми, иметь эстетичный внешний вид и т. д. Разумеется, что для каждого конкретного вида аппаратуры перечисленные требования имеют разную значимость ([рис. 1.1](#)).

Большинство этих требований, например, такие как простота обслуживания, ремонтпригодность, электрическая, магнитная и тепловая совместимость, работоспособность в специальных условиях эксплуатации обеспечиваются конструкцией изделия.

Так что же такое конструкция?

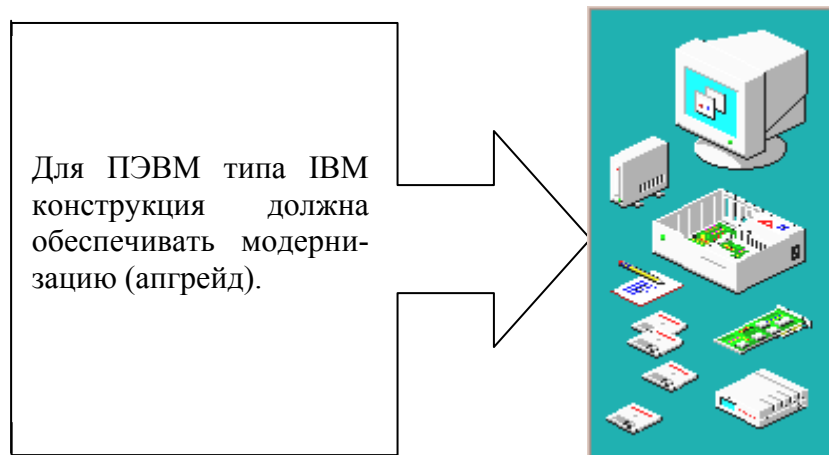


Рис. 1.1. Конструкция ПЭВМ типа IBM

**Конструкция** – это сложный объект, в котором могут быть выделены составные части, или элементы, и связь, или взаимодействие, между элементами и между элементами и внешней средой.

## 1.2. Структура и связи

Согласно приведенному определению понятия «конструкция» связи делятся на две группы: внутренние и внешние ([рис. 1.2](#)).

*Внутренние связи* – это связи между элементами внутри конструкции. К ним обычно относятся геометрические, магнитные, электрические, оптические и др.

*Внешние связи* показывают взаимоотношение между конструкцией или ее элементами и внешней средой. В эту группу связей входят связи с объектом, на котором устанавливается ЭС, связь с человеком-оператором и пр.

Дополнительно последнюю группу связей можно разделить на *непосредственные* и *опосредованные* – телеконтроль, телеуправление и пр.

Кроме того, связи могут делиться на необходимые, случайные, паразитные и др.

Связи в конструкциях определяют их сущность, их свойства, т. е. *меру различия или сходства конструкций*.

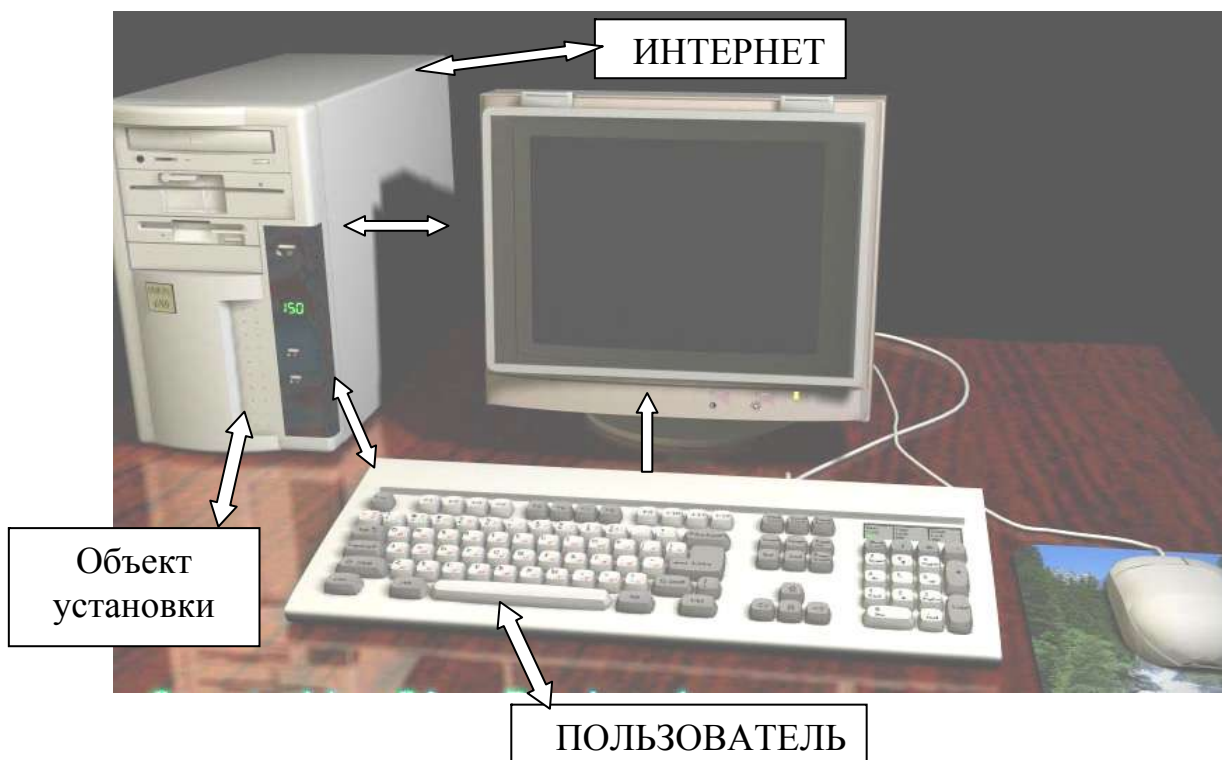


Рис. 1.2. Виды связей

Связи – это не абстрагированные понятия, а реальность, например: механические связи через крепежные соединения, магнитные связи между индуктивностями, гальванические связи по проводам, химические связи между средой и объектом и, как результат, возникновение коррозии. Таким образом,

конструкция есть материальное тело с многообразием элементов и связей, определяющих ее свойства.

Характерной особенностью конструкции ЭС является возможность преобразования электрических, электромагнитных, магнитных и, в ряде случаев, оптических связей.

Связи (группа связей) определяют свойства конструкции. Например, такое свойство, как ремонтпригодность, обеспечивается определенными механическими и геометрическими связями, иначе говоря, определенным расположением элементов конструкции и их закреплением.

*Количественно* свойства определяются параметрами, численно характеризующими свойства конструкции. Например, свойство «надежность изделия» задается такими параметрами, как наработка на отказ, среднее время безотказной работы, выраженными конкретными значениями.

*Качественно* свойства конструкции отображаются структурами.

Так, применяя различную структуру из трех типов элементов – транзисторы, резисторы, конденсаторы, можно получить различные по функциональному назначению устройства, даже не изменяя номиналов и типов элементов.

**Итак, конструкция электронного средства – это искусственно созданная человеком совокупность физических тел и веществ, с определенной структурой и параметрами, предназначенная для выполнения заданных функций, главным образом для преобразования электрических сигналов.**

Любую радиотехническую конструкцию, любое радиотехническое устройство можно представить как систему.

Под системой понимается:

- регулярное или упорядоченное устройство, состоящее из элементов, или частей, взаимосвязанных и действующих как единое целое;
- совокупность, или группа элементов, необходимых для выполнения некоторых операций.

Под термином «радиоэлектронная система» мы будем понимать такую совокупность взаимосвязанных узлов и блоков, которые могут принимать большое число состояний, обеспечивающих выполнение возложенных на систему функций по передаче, хранению и преобразованию информации.

В систему входят радиоэлектронные устройства различной сложности, например приборы, блоки, узлы, детали и т. д.

### 1.3. Конструктивная реализация ЭС

Дадим определения основных изделий ЭС.

*Комплекс* – два или более изделия, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями и предназначенные для выполнения одной цели ([см. рис. 1.2](#)).

*Комплект* – два или более изделия, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями и предназначенные для вспомогательных целей. Например, комплект ЗИП (запасное имущество приборов), комплект инструментов.

*Сборочная единица* – изделие, состоящее из двух или более частей с обязательным применением сборочных операций, позволяющих объединить составные элементы в единое целое ([рис. 1.3](#)).

*Деталь* – изделие, выполненное из однородного по марке и наименованию материала без применения сборочных операций. Допускается применение местной пайки, сварки, склейки ([рис. 1.4](#)).

В сборочных единицах по конструктивной иерархии можно выделить три уровня: приборы, блоки и узлы.

*Прибор* – сборочная единица, предназначенная для самостоятельного эксплуатационного применения ([рис. 1.5](#)).

*Блок* – конструктивно и функционально законченная сборочная единица, состоящая из субблоков, кассет и электрорадиоэлементов (ЭРЭ), не имеющая самостоятельного эксплуатационного назначения ([рис. 1.6](#)).



Рис. 1.3. Сборочная единица – передняя панель

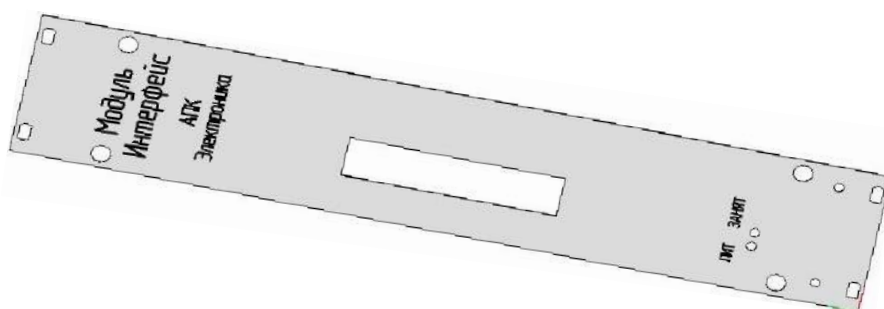


Рис. 1.4. Деталь – лицевая панель



Рис. 1.5. Прибор ваттметр

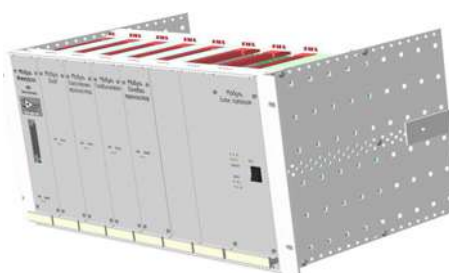


Рис. 1.6. Блок-крейт

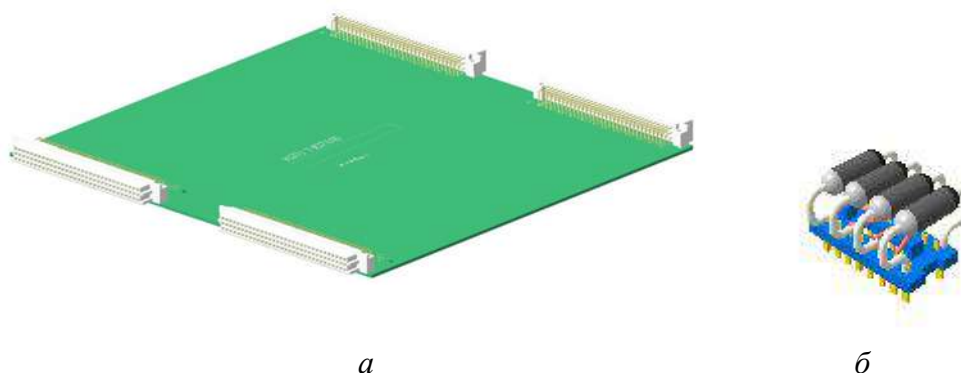


Рис. 1.7. Узел: *а* – печатный узел; *б* – измеряемый субмодуль

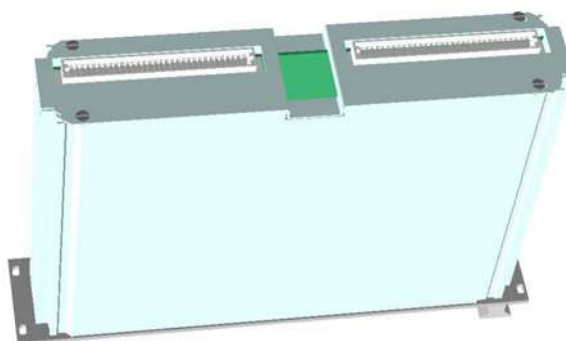


Рис. 1.8. Кассета

*Узел* – сборочная единица, состоящая из ограниченного числа деталей и имеющая конструктивную автономию ([рис. 1.7, а](#)). Конструктивную и функциональную автономию имеет *функциональный узел* – устройство, предназначенное для выполнения одной или ограниченного числа функций ([рис. 1.7, б](#)).

Блоки, субблоки, функциональные узлы конструктивно могут быть выполнены в виде *кассеты* – функционально и конструктивно законченной сборочной единицы, состоящей из ограниченного количества субблоков, расположенных в одной или нескольких плоскостях, заключенных в рамочную конструкцию, на задней стенке которой имеется разъем врубного типа ([рис. 1.8](#)).

В терминологии Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) все изделия классифицированы только как комплекс, комплект, сборочная единица и деталь.

## 1.4. Составные части процесса конструирования

Как отмечалось, качественно свойства конструкции отображаются структурами, которые определяются как устойчивая связь между элементами конструкции. Иными словами, каждая структура обуславливает определенную группу свойств, и в этом отношении можно наблюдать однозначность между структурой и свойствами. Эта зависимость делает возможной повто-

ряемость изделия, ибо одинаковые конструкции будут обладать одинаковыми свойствами ([рис. 1.9](#)).

Однако обратное – *однозначность свойств и структуры конструкции* в общем случае не имеет места, что предопределяет творческий характер конструирования. Конечно, имеется некая формализация полученных результатов, привлечение САПР, но это не снижает творческого участия разработчика, поскольку в итоге все решения принимает человек.

То обстоятельство, что разные структуры обладают одинаковыми свойствами, позволяет оптимизировать конструкции. Здесь следует сделать оговорку. Так как конструкция обладает множеством свойств  $M$ , то в общем случае для разных конструкций  $M1 = M2 = M3 \dots$  и т. д.

Структуры и параметры конструкции находятся в функциональной связи друг с другом, и, следовательно, свойства конструкции ЭС отображаются параметрами. Однако знание только структур и параметров не позволяет решить вопрос об эксплуатационных возможностях данной конструкции, о величинах и характере тех воздействий на конструкцию, при которых она может выполнять свои функции. Отсюда следует, что конструкцию характеризуют не только структуры и параметры, но и воздействия на нее. Эти воздействия суть характеристика связей конструкции со средой, объектом, человеком-оператором, и они могут быть выведены из общего многообразия связей конструкции.

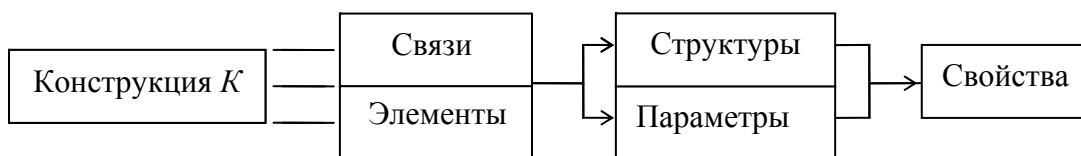


Рис. 1.9. Формирование свойств конструкции

Любая конструкция характеризуется многими *структурами* ( $S$ ), многими *параметрами* ( $F$ ) и многими *воздействиями* ( $X$ ). Таким образом, с одной стороны, конструкцию можно представить как совокупность элементов в определенных связях, с другой стороны, любая конструкция является совокупностью множества структур и параметров, причем поставленных в соответствие множеству воздействий. Математически это можно записать как

$$K = (S, F),$$

где  $S = f(X)$ ,  $F = f(X)$ .

Процесс разработки ЭС представлен на [рис. 1.10](#). При разработке конструкции в техническом задании (вход) оговаривается часть множества структур ( $\mathcal{E}1$ ,  $\mathcal{E}2$ ,  $\mathcal{E}3$  и т. д.), параметров (основные параметры) и воздействий (условия эксплуатации). Задача конструктора – выявить и отразить в документации (выход) множество структур и параметров в такой мере, чтобы изготовление конструкции в производстве возможно было *однозначно*, причем такой конструкции, которая бы соответствовала исходным данным.



Таким образом, **конструирование ЭС** – это процесс, выходом которого является часть множества структур и параметров, поставленных в соответствие множеству воздействий и отраженных в конструкторской документации.

На основе исходных данных решается вопрос выбора и, в случае необходимости, разработки элементов конструкции и входящих компонентов.

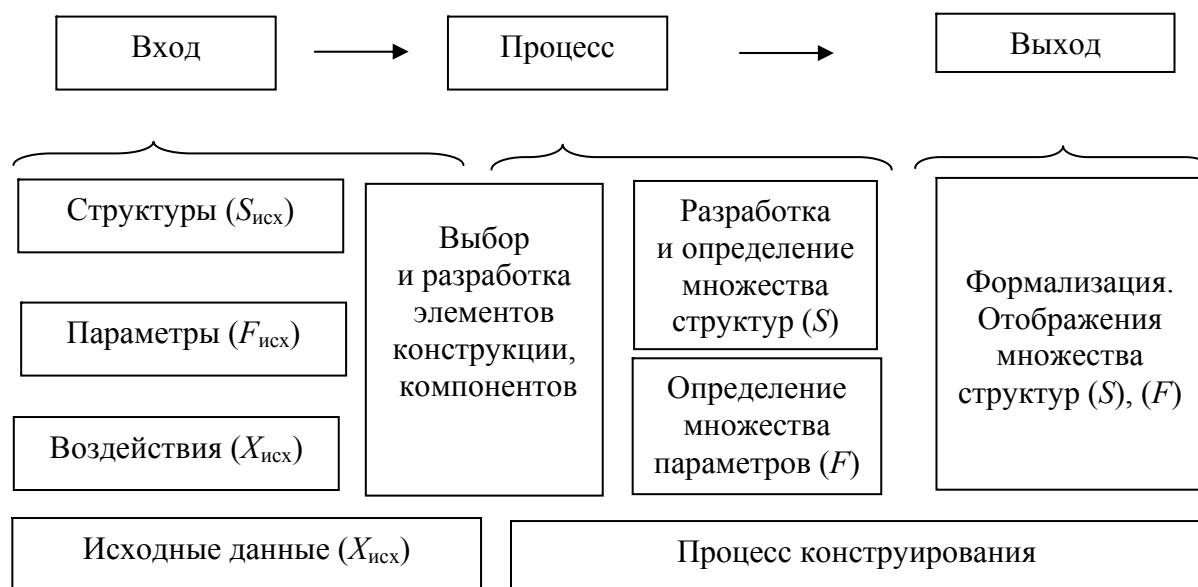


Рис. 1.10. Процесс разработки ЭС

Чрезвычайно важным моментом является выбор элементной базы. Если изменение структуры системы в процессе конструирования может быть осуществлено с относительно небольшими потерями времени и средств, то изменение системы элементов на последующих этапах проектирования в большинстве случаев связано со значительной перестройкой производства.

При выборе системы элементов обычно ориентируются на возможность реализации заданных функций, быстродействия, надежности, массы, габаритов, энергопотребления, помехозащищенности, технологичности изготовления и применения.

Выбор системы элементов, наряду со структурными методами, в значительной степени предопределяет надежность характеристики проектируемой системы.

В настоящее время существует тенденция к широкому использованию в конструкции ЭС микросхем и микросборок, в частности микропроцессоров.

Аппаратура на микросхемах и микросборках характеризуется следующими особенностями:

- возможность выполнения сложной ЭС в виде одноблочных устройств;



- обеспечение высокой надежности;
- возможность увеличения тепловых напряженностей в 3–5 раз;
- значительное увеличение вибро- и ударопрочности и устойчивости конструкций благодаря отсутствию или малому количеству крупногабаритных, массивных деталей;
- обеспечение повышенной устойчивости к внешним воздействиям из-за увеличения числа герметичных изделий.

Формирование технического задания (ТЗ) – исходные структуры, параметры, воздействия – и выбор элементной базы позволяют перейти к следующей стадии в процессе конструирования ЭС – выявлению и организации структур и параметров конструкции. Этот этап включает в себя выбор, анализ и аналитическое определение структур и параметров, их моделирование, а в ряде случаев и согласование различных по типу структур и параметров, учет внешних воздействий. Задачи данной стадии решаются с применением различных методов конструирования ЭС. В результате определяются множества структур и параметров конструкции, которые соответствуют исходным данным, включая внешние воздействия.

Последняя стадия процесса конструирования ЭС – оформление документации, отражение в ней множеств структур и параметров, иными словами, *формализация* полученной в процессе конструирования информации, необходимой для изготовления и эксплуатации конструкции, с учетом определенных ограничений.

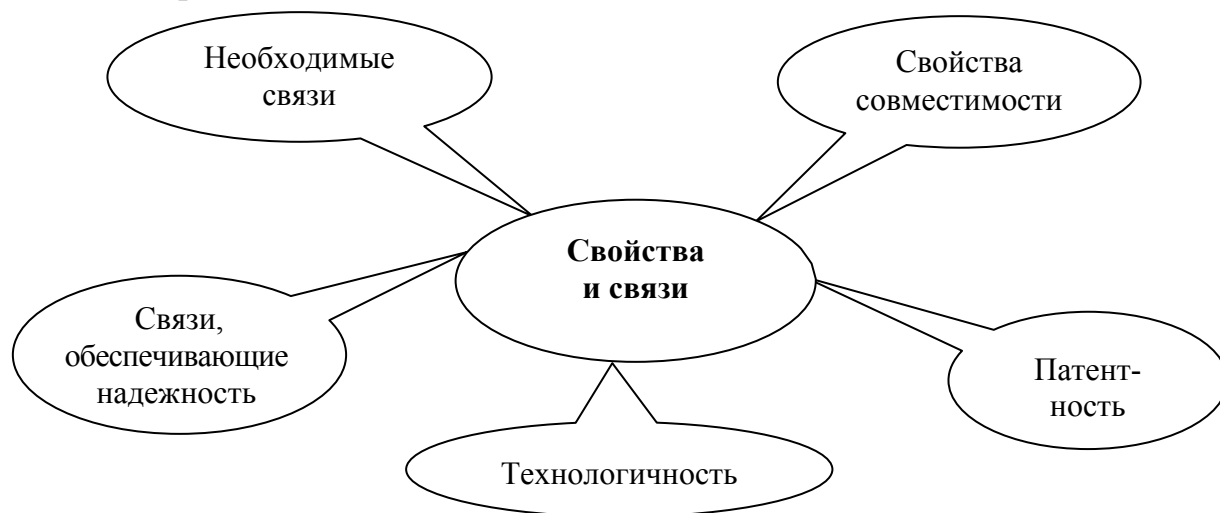


Рис. 1.11. Основные свойства и связи

Ограничения задаются, как правило, в виде ТЗ на конструирование и содержат тактико-технические данные (ТТД) на изделие в определенных условиях эксплуатации. Кроме этого налагаются определенные ограничения технологичностью конструкции: чем технологичнее изделие, тем легче его изготовить, тем меньше затрат на изготовление изделия. С требованиями технологичности связаны ограничения стандартизации. Для упрощения подготовки производства стандартизованы, например, крепежные изделия. Стан-

дартизованы или, по крайней мере, унифицированы типы и номиналы активных и пассивных элементов. Для упрощения и однозначности формализации информации об устройстве введены единые правила построения программной, конструкторской и технологической документации. Кроме того, в связи с постоянным взаимодействием ЭС с человеком-оператором (пользователем) готовое изделие должно отвечать требованиям эстетики и эргономики.

Независимо от назначения ЭС при их проектировании следует учитывать следующие основные свойства и связи ([рис. 1.11](#)).

1. *Необходимые связи*, обусловленные выполнением заданных функций:

- электрические (определяют выбор монтажных соединений);
- геометрические (определяют компоновку изделия);
- механические (определяют выбор материалов и варианты крепления).

При формировании перечисленных связей следует учитывать возникающие электромагнитные и тепловые связи, выступающие в общем случае как паразитные.

2. Свойства, определяющие *совместимость* ЭС:

- совместимость с объектом установки:
  - возможность размещения;
  - возможность закрепления;
  - возможность подключения;
  - исключение наводок на другие ЭС;
- тепловая совместимость;
- электрохимическая совместимость (выбор материалов и покрытий, работающих друг с другом без возникновения коррозии);
- электромагнитная совместимость;
- совместимость с человеком-оператором, удовлетворяющая требованиям технической эстетики и эргономики.

3. Связи, обеспечивающие *надежность* работы изделия при заданных условиях эксплуатации. Надежность определяется такими свойствами, как сохраняемость (обеспечивается защитой при хранении и транспортировании), безотказность и долговечность (обеспечиваются в первую очередь защитой от внешних воздействий), ремонтпригодность (обеспечивается компоновкой и видом крепления).

4. *Технологичность* – свойство конструкции, учитывающее условия производства (осваиваемость, время и стоимость изготовления).

5. *Патентность* (*патентная чистота* – наличие у объекта свойств в отношении определенных стран не попадать под действие охранных документов, выданных в этих странах; *патентная способность* – наличие у технического решения всех признаков изобретения).

## 1.5. Жизненный цикл ЭС

Изготовлению конструкции всегда предшествует ее разработка, т. е. процесс всестороннего исследования, в итоге которого получаются нужные результаты. Для радиоэлектронной аппаратуры, например, производится разработка основных тактико-технических показателей, разработка структурных, функциональных и других схем, разрабатывается геометрическая форма и размеры с учетом пространственных, силовых, электромагнитных связей.

В общем случае основные этапы жизненного цикла (ЖЦ) ЭС представлены на [рис. 1.12](#).

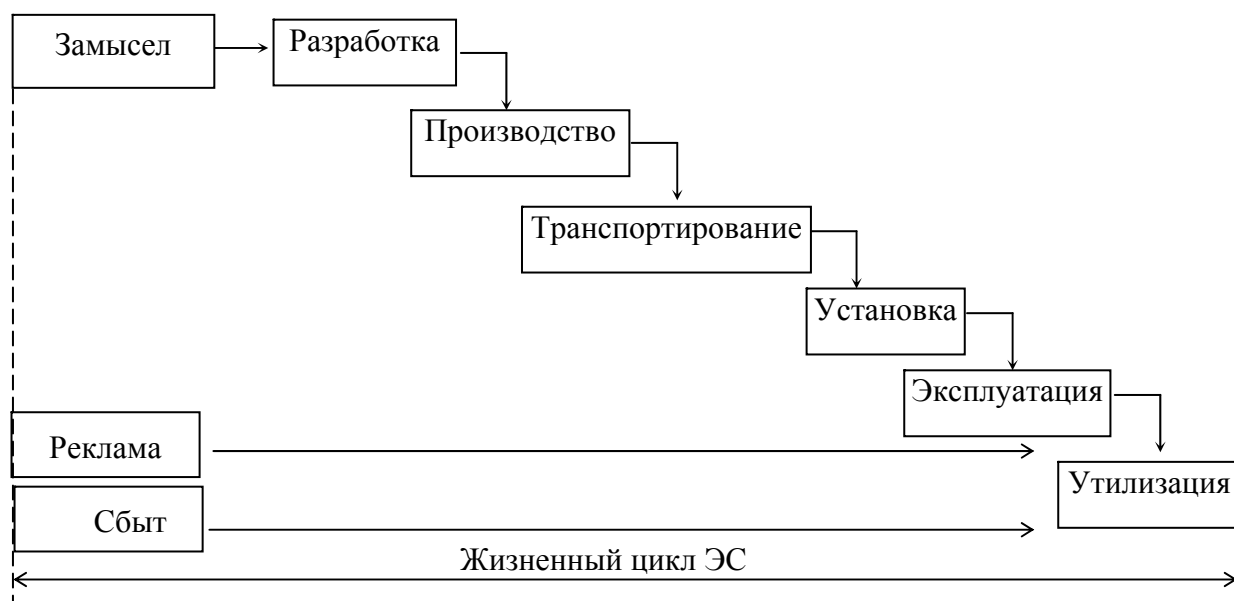


Рис. 1.12. Основные этапы жизненного цикла ЭС

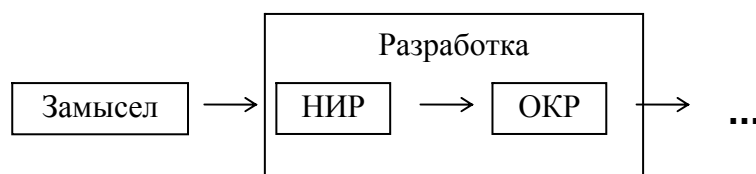


Рис. 1.13. Структура этапа «Разработка»

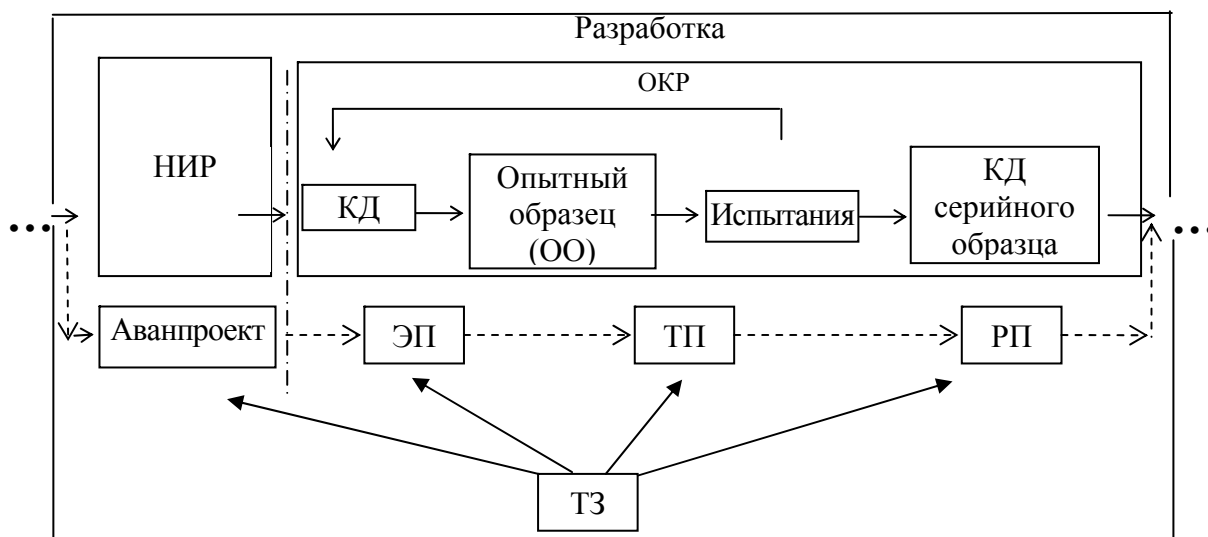


Рис. 1.14. Этапы разработки ЭС по системе ЕСКД

Любая конструкция или система начинается с абстрактного представления – *мысленного плана*, созданного воображением проектировщика. Это представление новой системы никогда не возникает в законченном и отработанном виде.

Для материализации абстрактной модели новой ЭС, она должна быть *спроектирована*, т. е. после замысла начинается *разработка*, которую можно условно разбить на два этапа ([рис. 1.13](#)).

В процессе научно-исследовательской работы (НИР) производится системный анализ, т. е. определение целей, нахождение основных путей и выбор методов решения поставленной задачи, нахождение принципов реализации устройств и составление технического задания (ТЗ).

В процессе опытно-конструкторской разработки (ОКР) производится:

- изготовление комплекта конструкторской документации (КД);
- изготовление опытного образца;
- испытание опытного образца;
- изготовление КД серийного образца.

По ЕСКД этапы разработки могут быть представлены в виде следующих проектов ([рис. 1.14](#)):

- аванпроект (техническое предложение);
- эскизный проект (ЭП);
- технический проект (ТП);
- рабочий проект (РП).

Примерный состав работ, выполняемых на этапе НИР, приведен на [рис. 1.16](#), примерный состав работ, выполняемых на этапе ОКР, – на [рис. 1.17](#).

Одновременно с *разработкой* КД для серийного образца производится *разработка технологии производства*: прежде чем приступить к серийному производству, необходимо иметь чертежи и инструкции, производственную площадь, оборудование и методику испытаний, а также испытательную аппаратуру.

*Основанием для проведения работ на каждом этапе проектирования является техническое задание (ТЗ).*

В *производстве* первоначально изготавливаются узлы и блоки, затем выполняется сборка приборов, шкафов и стоек и, наконец, сборка всей ЭС.

Некоторые системы ЭС создаются всего в одном или нескольких экземплярах, число других составляет миллионы. Время производства одних устройств исчисляется неделями, а для некоторых радиотехнических систем (РТС) составляет десятки лет. Для будущего обеспечения технического обслуживания и ремонта изготавливается также запасное имущество приборов (ЗИП).

Изготовленные устройства *транспортируются* к месту установки и эксплуатации. Многие системы ЭС перевозятся к месту эксплуатации в разобранном виде и собираются либо на месте эксплуатации, либо неподалеку от него.

Сроки службы многих сложных систем измеряются десятилетиями.

*Снятию с производства* изделия подлежат в случаях:

- освоения производства нового изделия, имеющего более высокие технические характеристики и/или технико-экономические показатели;
- отсутствия заказа в течение трех и более лет по причине отсутствия спроса;
- выявления при эксплуатации свойств, отрицательно сказывающихся на здоровье людей и состоянии окружающей среды.

При снятии изделия с производства подлинники конструкторской и технологической документации хранит предприятие-держатель подлинников для возможности выпуска ЗИП и проведения ремонтных работ, причем за все время хранения документации в нее вносятся изменения.

В целях воспроизводства изделия в течение его жизненного цикла сохраняется и специальная технологическая оснастка.

Снятие с эксплуатации последнего образца означает конец всего поколения данной системы.

Этапы «Реклама» и «Сбыт» могут охватывать большой период существования системы. В частности, системы ЭС, предназначенные для эксплуатации в военных целях, могут быть проданы еще до того, как началось проектирование системы. Как правило, рекламирование изделия начинают с запуска его массового производства.

Мероприятия по сбыту могут быть различными. Например, скупка у населения старой техники повышает спрос на новые марки изделий ЭС.

К мероприятиям по сбыту можно отнести и оформление изделия в специфичных формах конструкции. Например, особенности психологического восприятия человека таковы, что взгляд сначала останавливается на одушевленных объектах, и в первую очередь на лице человека. Поэтому композиционное оформление передних панелей ЭС, стилизованное под человеческое лицо ([рис. 1.15](#)), часто приводит к увеличению продаж таких изделий.



Рис. 1.15. Оформление передних панелей персональных компьютеров:  
*a* – строгое; *б, в* – стилизованное

Этапы ЖЦ изделия, представленные на [рис. 1.12](#), могут быть упорядочены во времени не полностью, а частично. Некоторые этапы должны предшествовать другим и, соответственно, должны быть упорядочены во времени. Например, аппаратура должна быть изготовлена прежде, чем пущена в эксплуатацию.

Для некоторых этапов упорядочение во времени не играет роли. Так, одни узлы и блоки аппаратуры могут быть спроектированы до или после готовности других узлов. И наконец, этапы могут перекрываться во времени.

Различные варианты расстановки этапов ЖЦ зависят от конкретного ЭС. Иногда можно приступить к производству еще до окончания проектирования. Если запуск пройдет успешно, то первый комплект будет изготовлен быстрее, чем это можно было ожидать. Но в случае возникновения непредвиденных трудностей в процессе проектирования такая поспешность может привести к значительным потерям времени и средств.

## 1.6. Конструкторское проектирование

Радиоэлектроника, а вместе с ней и конструирование в своем развитии пережили немало скачков, вызванных освоением новых диапазонов волн, новых методов генерирования сигналов и т. д. Однако методы разработки ЭС менялись мало. Традиционными стали три уровня разработки. На первом уровне, считающемся наиболее высоким, происходит определение функциональных задач ЭС, рассматриваются технические принципы их решения

и определяются такие характеристики аппаратуры, как мощность и длина волны, способы излучения и приема сигналов.

*Первый уровень* завершается разработкой структурной схемы ЭС и определением функциональных требований к его блокам.

*На втором уровне* проектирования осуществляется разработка принципиальных электрических схем блоков на основе требований, определенных на первом уровне проектирования.

И, наконец, на *третьем уровне* происходит конструирование аппаратуры и разрабатываются технологические процессы ее производства. Этот уровень традиционно находился в «тисках» решений, принятых на первом и втором уровнях проектирования, что для творческой деятельности инженера-конструктора оставляло очень мало простора.

Алгоритм проведения работ на первом и втором уровнях разработки, т.е. проектирования, представлен на [рис. 1.16](#).

**Проектирование есть разработка основных показателей радиотехнической системы и путей их практического осуществления.** Результатом проектирования является совокупность данных, которая может лечь в основу разработки технических документов, необходимых для изготовления и эксплуатации устройства.

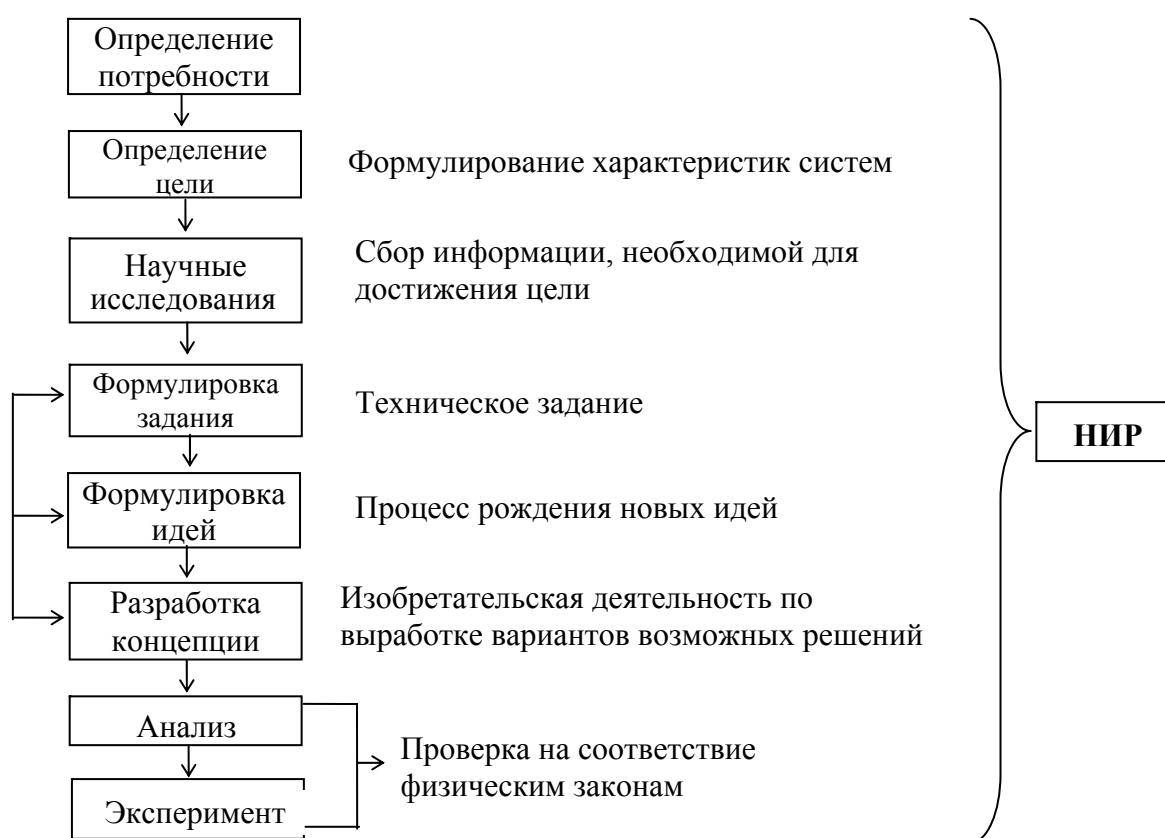


Рис. 1.16. Примерный состав работ на этапе проектирования

Третий этап разработки традиционно называется *конструированием*. Состав работ, проводимых на данном этапе, в общем виде представлен на [рис. 1.17](#).

**Конструирование – это процесс выбора структуры, пространственных и энергетических взаимосвязей и связей с окружающей средой и объектами физических тел, их материалов и обработки, установление количественных величин, пользуясь которыми можно изготовить изделие, отвечающее заданным требованиям.**

Конечным результатом процесса конструирования является комплект технических документов, отображающих всю совокупность задаваемых норм на вновь разрабатываемое изделие.

Таким образом, конструирование есть составная часть процесса разработки ЭС.

В настоящее время отмечается тенденция повышения роли конструктора не только на втором, но и на первом уровне разработки ЭС. Это обусловлено следующим:

появление микроэлектроники и развитие физики твердого тела привели к тому, что для разработки принципиальных схем и определения принципов создания новой ЭС стало необходимым привлечение опытных конструкторов, способных оценить те или иные варианты построения РТС с точки зрения создания высокоэффективной аппаратуры, применение которой экономически целесообразно;

при разработке аппаратуры стоечного и кассетного вида конструктор принимает участие на всех уровнях проектирования. На основе качественно новых конструкций аппаратуры возникают и качественно новые возможности их использования. Для создания таких конструкций инженер-конструктор должен обладать фундаментальными знаниями в области физики твердого тела и радиоэлектроники.

Сегодня участие инженера-конструктора на всех этапах разработки ЭС является решающим фактором научно-технического прогресса в данной области.





Рис. 1.17. Примерный состав работ на этапе конструирования

На [рис. 1.18](#) условно показан вклад инженера-схемотехника и инженера-конструктора при проектировании ЭС различных иерархических уровней для разных поколений ЭС.

Таким образом, можно «увязать» процесс конструирования с другими стадиями разработки ЭС, как показано на [рис. 1.19](#).

Основной задачей проектирования является получение эффективного ЭС ([рис. 1.20](#)).

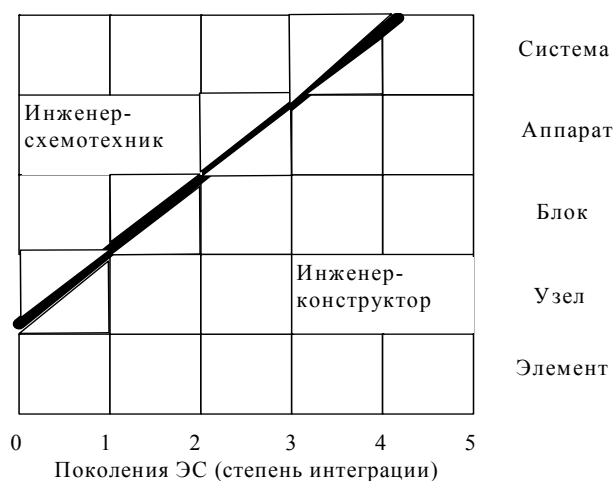


Рис. 1.18. Вклад инженера-схемотехника и инженера-конструктора при проектировании ЭС



Рис. 1.19. Связь процесса конструирования с другими стадиями разработки ЭС

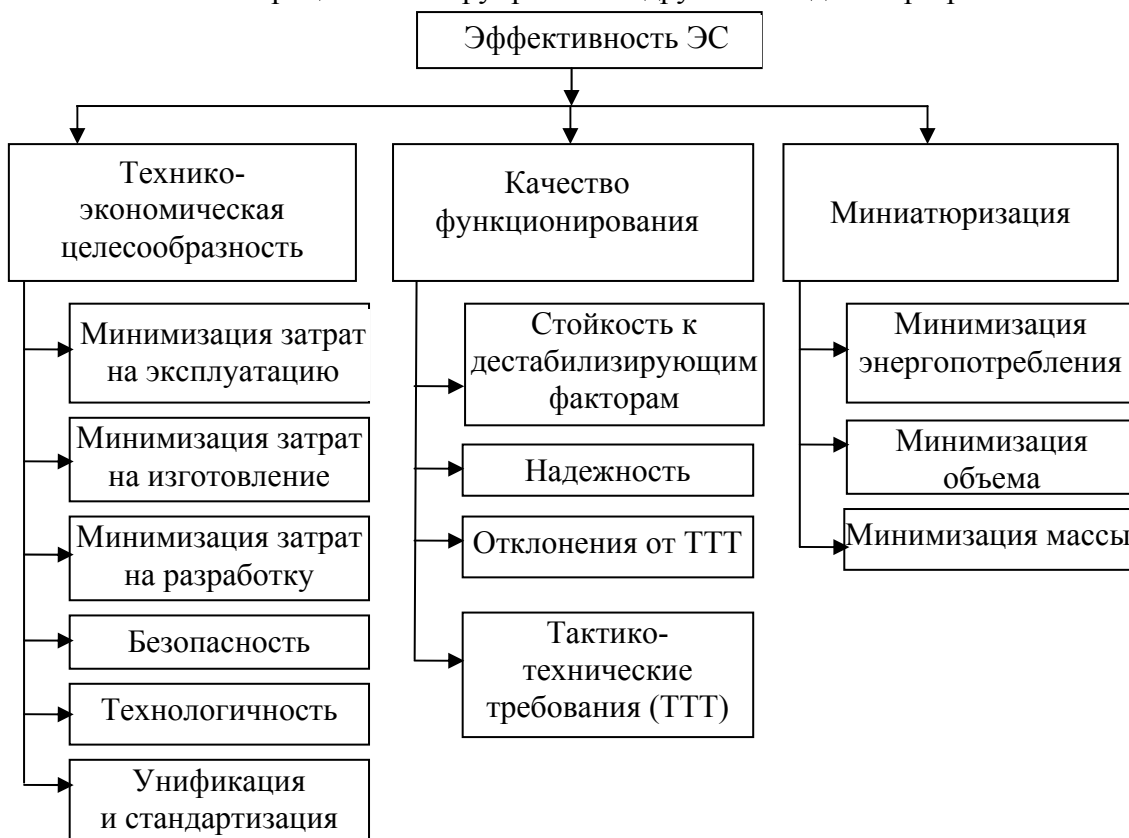


Рис. 1.20. Основные требования к процессу создания эффективной ЭС

Эффективность электронной аппаратуры во многом определяется решениями, принятыми на этапах НИР и ОКР.

## 1.7. История конструирования ЭС

Конструирование радиоаппаратуры началось в конце XIX в. одновременно с развитием радиотехники. Для первых конструкций основой служил деревянный ящик, на стенках которого размещались необходимые детали. Так как в первых радиоустройствах число каскадов было невелико, то экранировались только катушки индуктивности. По мере возрастания числа каскадов и увеличения коэффициента усиления возникла необходимость в межкаскадной экранировке.

В конце 1920-х гг. появилось металлическое шасси, на котором располагались элементы, что позволило уменьшить нежелательные связи по электромагнитному полю. В то же время появились этажерочные конструкции изделий, т. е. сложная система разбивалась на блоки, расположенные один над другим.

Внедрение пайки вместо винтовых соединений в начале 1930-х гг. позволило существенно упростить конструкцию контактного узла. Это привело к уменьшению габаритов радиоэлектронных средств (РЭС), более близкому расположению электрорадиоэлементов (ЭРЭ) и, как следствие, к увеличению паразитных связей. Применение в конце 1930-х гг. радиоаппаратуры на самолетах и автомобилях поставило перед конструкторами задачи обеспечения влагозащиты, виброизоляции, сохранения работоспособности РЭС при резком изменении температуры и т. д., что привело к специализации аппаратуры по условиям эксплуатации и объекту установки.

С середины 50-х гг. прошлого века резко возрастает уровень сложности РЭС. Большое тепловое излучение ламп создавало принципиальные трудности в конструировании РЭС из-за повышения внутреннего нагрева устройств. Проблема была решена благодаря применению транзисторов, освоенных в то время уже серийно.

Появление ЭВМ, состоящих из большого числа одинаковых каскадов, привело к созданию однотипных конструктивных узлов-модулей.

Результатом поисков методов изготовления, позволяющих повысить производительность труда путем автоматизации, стало применение с начала 1950-х гг. печатного монтажа, а к середине 1960-х гг. – с появлением микроэлектроники – групповых методов производства.

За прошедшее столетие произошла смена пяти поколений ЭС. Основным отличительным признаком поколения считается элементная база и метод конструирования ([табл. 1.1](#)):

в первом поколении ЭС применялись электронные лампы, крупногабаритные навесные ЭРЭ, блочный метод;

во втором – транзисторы, миниатюрные ЭРЭ, модульный метод;

в третьем – интегральные схемы (ИС) с небольшой степенью интеграции (100–1000 эл./корп.), функционально-узловой метод;

в четвертом – большие интегральные схемы (БИС) и сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), функциональные компоненты, функционально-узловой метод;

пятое поколение ЭС (настоящее время) характеризуется применением микропроцессорных устройств, увеличением сервиса, использованием функционально-узловой метода.

Кроме отмеченных признаков, при развитии конструкций ЭС менялись используемые материалы и дизайн ЭС.

В 30-е гг. прошлого века был осуществлен переход от несовершенной техники прямого усиления (радиоприемники БЧ, ЭЧС, ЭКЛ и др.) к супергетеродинам. Последние работали на металлических лампах и обеспечивали параметры, достаточные для уверенного приема мощных радиостанций всего мира на наружную антенну. Среди таковых назовем 6Н1 и СВД различных модификаций, ставшие массовыми радиоприемниками для городских радиослушателей. Существовали также батарейные приемники (РПК, БИ-234 и др.) для местностей, не имевших сетей переменного тока. Выпускались в те годы и детекторные приемники ([рис. 1.21](#)).

Таблица 1.1

Элементная база поколений ЭС

| Элементная база     |          |              |                             |                      |                         |
|---------------------|----------|--------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------|
| Поколения ЭС        |          |              |                             |                      |                         |
| 1                   | 2        |              | 3                           | 4                    | 5                       |
| Электрические лампы | Модули   | Микро-модули | ИС малой степени интеграции | БИС<br>СБИС<br>СБГИС | БИС<br>СБИС<br>СБГИС    |
| Обычные             | Плоские  | Этажерочные  | Гибридные                   | Гибридные            | Гибридные               |
| Миниатюрные         | Объемные |              | Полупроводниковые           | Полупроводниковые    | Полупроводниковые       |
|                     |          | ФУ           |                             |                      | Однокристаллические ЭВМ |



«Радиолина». Первый отечественный радиоприемник. Модель 1924 г. Трест заводов слабого тока. (Экспонат Политехнического музея в г. Москве)



4НБС-6 (четырёхламповый настольный батарейный). Модель 1939 г. Воронежский завод «Электросигнал»

Рис. 1.21. Радиоприемники 1920–30-х гг.



«Ленинград». Модель 1946 г.  
Завод им. Козицкого.  
Приемник с фиксированной настройкой



Радиола «Рекорд» на базе  
модифицированного приемника  
«Рекорд-47». Бердский радиозавод

Рис. 1.22. Радиоприемники 1940-х гг.



Радиола «Октава». Модель 1957 г.  
Горьковский радиозавод



«Звезда-54». Модель 1954 г.

Рис. 1.23. Радиоприемники 1950-х гг.



«Муромец» (с часовым механизмом  
включения-выключения).  
Модель 1959 г.  
Муромский завод РИП



Радиола «Эстония-2».  
Разработка 1959 г. Таллиннский завод  
«Пунане РЭТ»



Радиола «Ригонда-стерео». Модель 1964 г. Первая советская стереофоническая радиола.  
Рижский завод «Радиотехника»

Рис. 1.24. Радиоприемники 1960-х гг.

К 1946 г. в СССР была разработана большая серия радиоприемников, которые затем выпускались различными заводами и отличались большим разнообразием принципиальных и дизайнерских решений. Среди них как массовые малоламповые модели («Москвич», «Рекорд»), так и дорогие сложные приемники («Маршал», «Ленинград»). Качество работы приемников и их оформление значительно улучшились. Многоламповые приемники тех лет до сих пор способны удовлетворить своей работой искушенных радиослушателей ([рис. 1.22](#)).

1950-е гг. стали «золотым веком» советского лампового радио. Именно тогда было достигнуто оптимальное соотношение цены и качества бытового радиоприемника. Широкое применение к концу десятилетия пальчиковых радиоламп позволило улучшить и массогабаритные характеристики. Однако приемник «Мир» модели 1952 г., собранный на «старых добрых» октальных лампах, остается, по мнению многих специалистов и радиолюбителей, лучшим по качеству и устойчивости приема среди аппаратов того времени. Заводы соревновались в разработке разнообразных схем и ящиков, которые и сейчас радуют глаз красивой фанеровкой ([рис. 1.23](#)).

1960-е годы ознаменовались универсализацией как схемно-конструктивных, так и дизайнерских решений радиоприемников. Основой тому стало внедрение в производство экономичных технологий печатного монтажа и удешевление электронных компонентов при массовом производстве. Из «облика» приемников начал исчезать «аромат эпохи», столь характерный для добротных приемников ручной сборки прежних лет. Даже появление УКВ-диапазона не позволило забыть «бархатный» звук старых «монстров». Самой массовой стала схема приемника II класса, разработанная в конце 1950-х гг. и растиражированная во многих моделях «обезличенного» дизайна. Качественные показатели были принесены в жертву удешевлению. Из приемников того времени интересен «Фестиваль», который имел дистанционное управление громкостью, настройкой и диапазонами с пульта ДУ с проводом в палец толщиной. Эти годы стали временем заката «музыкальных шкафов» – наступало время транзисторов ([рис. 1.24](#)).

В настоящее время стальные элементы несущих конструкций сменили алюминиевые, пластмасса вытеснила дерево и, в ряде случаев, металлы.

## Контрольные вопросы

1. Что понимают под термином «конструкция»? Какова ее сущность?
2. Какие бывают конструкции ЭС?
3. Перечислите свойства, которые наиболее полно характеризуют любую конструкцию ЭС.
4. Какие основные свойства и связи, независимо от назначения, необходимо учитывать при проектировании ЭС?
5. Назовите основные этапы жизненного цикла ЭС.
6. Перечислите примерный состав работ, выполняемых на этапе НИР.

7. Дайте определения понятиям «проектирование» и «конструирование». Чем характеризуются эти процессы?
8. В каких случаях изделия подлежат снятию с производства?
9. Что является основной задачей проектирования?
10. Охарактеризуйте основные этапы истории развития конструирования ЭС.



## 2. ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

[2.1. Структура и взаимосвязь ограничений.](#)

[2.2. Ограничения на метод проектирования.](#)

[2.3. Требования к выполнению ограничений.](#)

[2.4. Исходные данные для проектирования.](#)

[2.5. Техническое задание – этап проектирования ЭС.](#)

[2.6. Основная структура ТЗ на проектирование.](#)

[2.7. Классификация ЭС.](#)

[2.8. Условия эксплуатации:](#)

[2.9. Нормирование условий эксплуатации:](#)

[Контрольные вопросы.](#)

Л и т е р а т у р а: [[5](#), [15](#), [21](#), [24](#), [29](#), [40](#), [41](#), [42](#)].

### 2.1. Структура и взаимосвязь ограничений

Как говорилось ранее, знание только структур и параметров системы не позволяет решить вопрос об эксплуатационных характеристиках данной конструкции, т. е. конструкцию характеризуют не только структуры и параметры, но и воздействия, при которых она может работать.

*Условия эксплуатации* – это определяющие ограничения, накладываемые на конструкцию ЭС.

Кроме этого при разработке конструкции сталкиваются с ограничениями, связанными с несовершенством, а во многих случаях и с отсутствием методик выбора тех или иных конструктивно-технологических решений. Если в первые годы научно-технической революции можно было пользоваться опытом создания предыдущих конструкций, то в настоящее время часто этого опыта нет, так как создание новых систем ЭС базируется на совершенно иных принципах реализации изделий. Поэтому механическое следование разработанным методикам ведет к созданию ЭС нестойкой к моральному старению.

Как отмечалось в предыдущей лекции, при переходе от одного поколения ЭС к другому происходит увеличение вклада инженера-конструктора в проектирование изделий любого уровня – от системы до компонентов. Это обстоятельство привело к замене термина «конструирование» на термин «инженерное проектирование», отражающий перераспределение ролей разработчиков ЭС в общем цикле проектно-конструкторских работ.

Задачей инженерного проектирования является разработка систем при некоторых ограничениях, обусловленных способом решения, обеспечивающая оптимальное выполнение поставленной задачи при некоторых ограничениях, накладываемых на решение.





Рис. 2.1. Состав ограничений при проектировании

Если первая группа ограничений относится к методу проектирования и на результат влияет опосредованно, то вторая относится непосредственно к результату проектирования, т. е. к конструкции ЭС ([рис. 2.1](#)).

Ограничения по возможности применения того или иного метода проектирования, включая моделирование протекающих в ЭС процессов, определяет предприятие-разработчик исходя из своего ресурсного потенциала. Заказчик, как правило, не влияет на определение таких ограничений. Для последнего важен только результат – конкретная аппаратура, прибор, вычислительная система и т. д., поэтому он формулирует требования только к результату проектирования, которые отражаются в техническом задании (ТЗ) вместе со сроками проектирования.

Ограничения на результат проектирования будут рассмотрены отдельно. В данной лекции мы рассмотрим только ограничения, налагаемые на метод проектирования ЭС.

## 2.2. Ограничения на метод проектирования

### 2.2.1. Сроки проектирования

При современных, все ускоряющихся темпах научно-технического прогресса предельное сокращение сроков проектирования становится одним из главных требований к процессу проектирования. Действительно, при увеличении сроков проектирования новизна и оригинальность решений, используемых в проекте, теряется. Еще не будучи осуществленным, проект может морально устареть и потерять смысл. Поэтому одной из главных характеристик процесса проектирования становится его быстротечность.

От начала проектирования до выпуска серийного образца проходит определенный период времени, и тем больший, чем сложнее изделие. Этот период в общем случае состоит из следующих этапов:

- проектирование;
- изготовление;
- заводская отладка и доводка опытного образца;
- промышленные испытания;
- внесение изменений по результатам испытаний;
- государственные испытания и приемка опытного образца;
- изготовление технической документации головной серии;
- изготовление головной серии;
- промышленные испытания;
- разработка документации для серийного запуска;
- подготовка производства к серии;
- серийный выпуск.

Для сложных изделий этот процесс в лучшем случае длится полтора-два года. Иногда длительность его доходит до трех-четырех лет. Однако при малых сроках проектирования трудно получить прибор, обладающий высокими показателями качества, ибо разработка есть не что иное, как постепенная оптимизация исходного варианта изделия. При больших сроках проектирования появляется вероятность выпуска морально устаревшего изделия ([рис. 2.2](#)).

Процесс формирования технических требований (ТТ) к разрабатываемому изделию, включая сроки проектирования, по своей сути носит конфликтный характер. Разработчик стремится заложить ТТ ( $Z_p$ ), достигнутые при разработке предыдущего изделия: для него это гарантия выполнения проекта. Однако в большинстве случаев эти требования ниже мирового уровня ( $Z_m$ ). Заказчик, наоборот, стремится получить изделие с ТТ ( $Z_3$ ), превышающими мировой уровень. При утверждении ТЗ с ТТ, превышающими мировой уровень, ситуация может развиваться по трем сценариям, поскольку технический прогресс не стоит на месте и за время проектирования мировой уровень качества изделий растет.

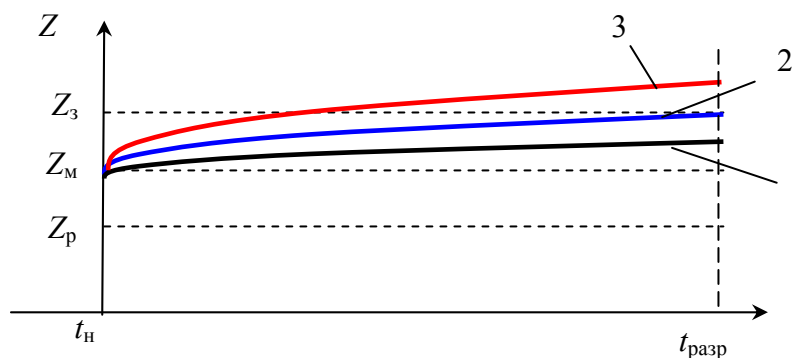


Рис. 2.2. Зависимость технического уровня ( $Z$ ) от сроков проектирования ( $t$ ):  
 $Z_3$  – технический уровень, первоначально выдвинутый заказчиком;  $Z_m$  – мировой уровень на момент окончания проектирования;  $Z_p$  – технический уровень, достигнутый разработчиком при проектировании предыдущего изделия;  
 1–3 – варианты развития ситуации

Вариант 1: за время проектирования мировой уровень не превысил требований, установленных в ТЗ, и, следовательно, в заданные сроки изделие с требуемым качеством разработать не удалось.

Вариант 2: разработчик может удовлетворить требования заказчика.

Вариант 3: отсутствие гарантии достижения мирового уровня разработчиком и проигрыш заказчика, поскольку разработанное изделие имеет качество ниже достигнутого на мировом уровне.

### 2.2.2. Требования комплексной микроминиатюризации

Проблема комплексной микроминиатюризации вызвана высокой сложностью современных ЭС. Маломощные каскады, в зависимости от сложности изделий, составляют 20–30 % от их общего объема и веса. Следовательно, в ЭС применение микросхем и микросборок в одних только маломощных каскадах не достаточно эффективно для снижения массы и габаритов аппаратуры.

Имеется шесть условий осуществления комплексной микроминиатюризации:

- построение функциональной схемы ЭС с наибольшим использованием дискретных цифровых принципов, с заменой электромеханизмов на электронные каскады;
- перевод электрической схемы ЭС на микроэлектронный компонентный базис (микросхемы общего применения и микросборки) и построение остальной части электронных каскадов на микросхемах частного применения, а также широкое применение элементов функциональной электроники;
- интенсификация теплоотвода, связанная в первую очередь с применением твердотельных микроохлаждителей;

- применение новых принципов формирования мощного электромагнитного излучения, позволяющих исключить крупногабаритные генераторные лампы, например применение фазированных антенных решеток (ФАР);
- использование в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) интегральных схем частного применения, микрополосковых линий (МПЛ), генераторов Ганна и т. д.;
- целенаправленная (для комплексной микроминиатюризации) разработка компонентов.

### 2.2.3. Уровень знаний

Уровень квалификации разработчика оказывает влияние, во-первых, на сроки проектирования и, во-вторых, на качество изделия. На предприятиях проектировщики, конструкторы аппаратуры, в зависимости от опыта, уровня подготовки, занимают различные должности. Например, в конструкторских отделах имеются следующие штаты: техник-конструктор, инженер, инженер-конструктор 3, 2 и 1-й категории, ведущий инженер и др. В зависимости от сроков разработки и сложности задачи решение проблемы поручается тому или иному исполнителю.

### 2.2.4. Влияние вычислительной техники

Влияние программных средств проявляется в наличии (или отсутствии) программного обеспечения, позволяющего автоматизировать процесс разработки ЭС и проводить моделирование протекающих в ЭС физических процессов с целью сокращения сроков натурных испытаний. К такому программному обеспечению относят: программы чертежной графики (AutoCAD, «Компас-График», Visio и др.), программы автоматизированной разработки печатных плат (P-CAD, AccelEDA), программы расчета тепловых режимов ЭС, программы расчета электрической и электромагнитной совместимости и др.

Внедрение CALS-технологии как технологии сопровождения изделия на протяжении всего его жизненного цикла требует специальных программ.

Аппаратные средства оказывают влияние на быстродействие программного обеспечения и, следовательно, на производительность конструктора-разработчика. Так, на работу с программами трехмерной графики и обработки изображений может уходить значительное время (иногда до десятков минут). Решение проблемы достигается либо дальнейшим наращиванием объема оперативной памяти, частоты процессора и системной шины, либо включением поддержки необходимых функций на уровне «железа» (например, поддержка графических приложений в компьютерах фирмы Apple).

Внедрение машинного проектирования позволило резко сократить сроки проектирования, особенно сложных систем. С помощью ЭВМ в настоящее время производится не только проектирование электрических схем, расчет их

по постоянному и переменному току, но и разработка печатного монтажа, топологии интегральных схем, а также выпуск КД различного назначения.

Вычислительная техника не только позволяет снизить сроки проектирования ЭС, но и улучшить их качество. Например, при коэффициенте заполнения печатной платы по площади более 0,7 машина справляется с компоновкой печатной платы лучше и быстрее человека, однако почти всегда требуется корректировка печатных проводников, и тем больше, чем больше коэффициент заполнения.

### 2.2.5. Лабораторное оборудование

Возможности имеющегося лабораторного оборудования влияют в основном на сроки проектирования. При отсутствии необходимого оборудования качество разработанных схем получается довольно низким и изделия в дальнейшем требуют длительной отработки после проведения испытаний.

## 2.3. Требования к выполнению ограничений

При разработке требований к результату процесса проектирования следует учитывать, какие требования должны выполняться всегда, а какие – в большей или меньшей степени ([табл. 2.1](#)).

Таблица 2.1

Основные требования к результату проектирования

| Требования    | Функции                                          | Производство                           |
|---------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Технические   | В физико-техническом отношении удовлетворительно | Технически возможно                    |
| Экономические | Экономично                                       | Правильная технология                  |
| Прочие        | Удобно, надежно в эксплуатации                   | Безопасно, не требует больших нагрузок |

Безусловно должны выполняться *технические требования*, обеспечивающие изготовление и функционирование изделия, а также *требования по безопасности*. Остальные же требования могут выполняться в большей или меньшей степени. Они необходимы для сравнения изделий, принятия решений и выбора лучшего варианта.

## 2.4. Исходные данные для проектирования

Исходными данными для разработки ЭС может быть следующая информация:

- ТЗ, выдаваемое планируемой организацией или заказчиком и определяющее параметры изделия, область и условия его применения;
- техническое предложение, выдвигаемое в инициативном порядке проектной организацией или группой инженеров;
- научно-исследовательская работа или созданный на ее основе опытный образец;
- изобретение или созданный на его основе экспериментальный образец;
- образец зарубежной машины или созданный на его основе опытный образец.

Первый случай наиболее общий, так как независимо от того, что явилось исходными данными для разработки на этапе ОКР (на этапе конструирования), *составление ТЗ необходимо*.

Таким образом, *техническое задание является основным исходным документом для разработки изделия*.

## 2.5. Техническое задание – этап проектирования ЭС

Согласно ГОСТ 2.103 составление технического задания является первой стадией разработки ЭС.

Техническое задание может быть составлено как на все изделие, так и на его составные части и содержит необходимые ограничения, связанные с условиями эксплуатации (климатические, механические, биологические воздействия), обслуживания (эргономические и другие факторы), производства ЭС (серийность выпуска, показатели технологичности), принципами функционирования (требования безопасности и помехозащищенности), а также сроки проектирования.

Обычно ТЗ в первоначальном виде составляется заказчиком и выдается для согласования разработчику изделия, который подвергает ТЗ тщательному

анализу как с позиции преемственности конструкции, так и с точки зрения единства стилового решения всех приборов системы.

*Конструктивная преемственность* – это использование при проектировании предшествующего опыта радиоаппаратостроения и смежных отраслей введением в проектируемое устройство всего полезного, что есть в существующих конструкциях.

При анализе ТЗ основное внимание уделяется трем группам вопросов:

- возможность выполнения заданных требований к системе и проектирования без проведения фундаментальных научно-исследовательских работ;
- уточнение и согласование требований к проектируемой системе с заказчиком;
- оценка трудоемкости и сроков выполнения проектных работ и их согласованности с условиями проектирования и изготовления.

После проведения анализа ТЗ последнее уточняется, согласовывается с разработчиком и утверждается заказчиком. После утверждения ТЗ является основным документом разработчика.

Процесс согласования ТЗ содержит в своей основе конфликтную ситуацию, ибо заказчик стремится, чтобы в ТЗ были обозначены наилучшие характеристики проектируемой системы и возможно более короткие сроки разработки. Разработчик же, опираясь на имеющийся опыт, более объективно оценивает возможность реализации проекта в заданные сроки. Согласование ТЗ, как правило, достигается не сразу, а в результате нахождения компромиссных решений.

Объем исходных данных, содержащихся в ТЗ, зависит в первую очередь от назначения и сложности проектируемого изделия. Кроме того, состав ТЗ определяется квалификацией его разработчика, и в данном случае возможны три варианта:

если проектировщику предлагается задание, проработанное до мелочей, включая готовые технические решения, то им пользоваться, с одной стороны, легко, как неким «сводом предписаний»;

с другой стороны, поскольку требования системотехников, схемотехников, технологов, эксплуатационщиков обычно противоречивы, то их очень тяжело «увязать» в конкретное конструкторское решение;

при слабо проработанных ТЗ, при недостатке исходной информации, исходных ограничений ситуацию можно охарактеризовать как «пойди туда, не знаю куда, принеси то, не знаю что». В этом случае либо долго длится этап анализа ТЗ, либо много времени тратится на проработку большого числа вариантов конструктивного исполнения.

Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что ТЗ должно быть проработано только до такой степени детализации, чтобы было понятно, для чего служит разрабатываемое изделие, какие потребности должно удовлетворять, как и кем эксплуатироваться, с какими приборами должно сопрягаться и т. д. В этом случае, несмотря на вероятность некоторых жестких ограничений, всегда найдется возможность для творчества конструктора.



Напомним, что техническое задание может быть составлено как на все изделие, так и на его составные части. В последнем случае этот документ называют *частным техническим заданием* (ЧТЗ). В нем могут содержаться конкретные технические решения, обусловленные конструктивной реализацией вышестоящего иерархического уровня. Например, ЧТЗ на печатные узлы (ПУ) может содержать конкретные технические решения, определяющие форму печатной платы (ПП), варианты крепления в блоке, способ электрических сопряжений и пр. Наличие таких ограничений обуславливает унификацию, что в конечном итоге повышает технологичность изделия и снижает затраты на его изготовление.

В техническом задании, независимо от сложности изделия, указываются:

- сроки проектирования;
- назначение системы;
- условия эксплуатации;
- технические (конструктивные) требования;
- условия производства;
- требования по безопасности.

## 2.6. Основная структура ТЗ на проектирование

ГОСТ 15.005 регламентирует следующую основную структуру ТЗ на проектирование ЭС:

1. Общие сведения о разработке:
  - 1.1. Документы, на основании которых проводится проектирование.
  - 1.2. Характеристика области применения устройства.
  - 1.3. Название устройства и его условное обозначение.
  - 1.4. Общая характеристика объекта установки.
2. Сведения о мировом уровне данного вида продукции:
  - 2.1. Технические характеристики мирового уровня проектируемого изделия.
  - 2.2. Стоимость аналогичной продукции на мировом рынке.
  - 2.3. Документы и литература, содержащие сведения о разрабатываемом изделии или его аналогах.
3. Технические требования:
  - 3.1. Общие требования.
  - 3.2. Требования к конструкции.
  - 3.3. Требования к электрическим параметрам и режимам.
  - 3.4. Требования к устойчивости к внешним воздействиям.
  - 3.5. Требования по надежности.
  - 3.6. Требования по маркировке (указывается содержание основных маркировок).
  - 3.7. Требования к составным частям, сырью, исходным и эксплуатационным материалам.
  - 3.8. Требования по эргономике и технической эстетике.



- 3.9. Требования к радиоэлектронной и электрозащите.
- 3.10. Показатели назначения.
- 3.11. Требования к безопасности.
- 4. Экономические требования:
  - 4.1. Контингент потребителей разрабатываемого изделия.
  - 4.2. Новизна разрабатываемого изделия.
  - 4.3. Конкурентоспособность разрабатываемого изделия.
- 5. Требования к разработке:
  - 5.1. График выполнения работ.
  - 5.2. Перечень конструкторской документации, подлежащей разработке.
  - 5.3. Соответствие КД требованиям, изложенным в ЕСКД и других стандартах.
- 6. Требования к изготовлению:
  - 6.1. Серийность выпуска.
  - 6.2. Конкретное предприятие-изготовитель, технологическое оборудование которого может наложить ограничения на выбор конструктивно-технологических решений при проектировании изделия и его составных частей.
- 7. Требования к монтажу:
  - 7.1. Ограничения к монтажу изделия, обусловленные объектом установки.
  - 7.2. Ограничения к монтажу изделия, обусловленные квалификацией персонала, выполняющего монтаж изделия.
- 8. Требования к техническому обслуживанию и ремонту:
  - 8.1. Субъективные условия эксплуатации.
  - 8.2. Квалификация обслуживающего персонала.
  - 8.3. Вид ремонтных мастерских.

Конкретные требования к изделию ЭС, как учитываемые при составлении ТЗ, так и подлежащие выполнению при разработке, определяются нормативно-технической документацией – ГОСТами, техническими условиями и т. п. Например, при составлении ТЗ на проектирование бытовых радиоприемников необходимо руководствоваться ГОСТ 5651 – «Аппаратура радиоприемная бытовая. Общие технические условия», а при составлении ЧТЗ на проектирование отсчетных устройств – ГОСТ 5365 – «Приборы электроизмерительные. Циферблаты и шкалы. Общие технические требования».

## **2.7. Классификация ЭС**

Требования к конструкции того или иного изделия ЭС определяются в первую очередь назначением изделия (например, для медицинской и контрольно-измерительной аппаратуры условия эксплуатации определяются не только разными климатическими воздействиями, но и разным контингентом пользователей и т. д.). Поэтому попробуем разобраться, как можно класси-

фицировать ЭС и какие требования к конструкции определяются ее назначением.

Возможно классифицирование ЭС по следующим группам:

- *уровень подготовки пользователя:*  
бытовые и аналогичные им приборы;  
профессиональные ЭС;
- *частотный диапазон:*  
низкочастотные (НЧ) – 3 Гц – 3 кГц;  
высокочастотные (ВЧ) – 3 кГц – 300 МГц;  
сверхвысокочастотные (СВЧ) – 300 МГц – 3000 ГГц;
- *функция назначения (рис. 2.3):*  
для радиосвязи;  
медицинские;  
вычислительные;  
радиолокационные;  
электротехнические;  
контрольно-измерительные;  
телевизионные.

При проектировании бытовых и аналогичных приборов, в отличие от профессиональных ЭС, основное внимание уделяется простоте эксплуатации, поскольку с ними работает неподготовленный пользователь. Кроме этого требования по безопасности эксплуатации наиболее жестки для бытовых ЭС.

Частотный диапазон влияет в первую очередь на выбор линий связи, а также на выбор методов экранирования.

Назначение ЭС влияет на выбор типа несущих конструкций (например, контрольно-измерительная аппаратура должна агрегатироваться на рабочем месте регулировщика или настройщика ЭС). Поскольку назначение ЭС определяет специфику его использования, это накладывает отпечаток на применение тех или иных символов при маркировании изделий.

В настоящее время ЭС используется для связи, управления, навигации, различных научных исследований и в производстве. Суть и определяющие факторы ее работы следующие.

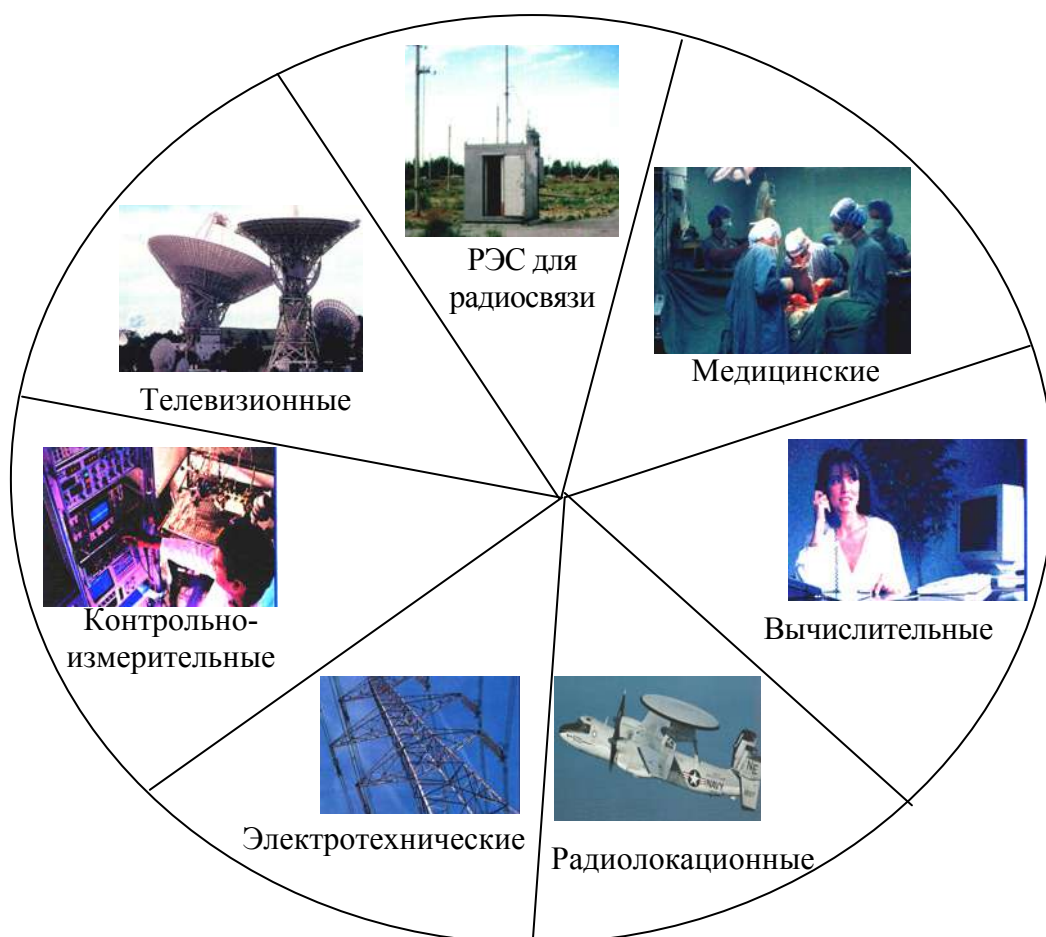


Рис. 2.3. Классификация ЭС по функции назначения

*Оптическая, проводная и радиосвязь* – передача радиосигналов от одного абонента к другому по радиооптическим или проводным линиям связи. Должна обеспечивать многоканальность, бесперебойное вхождение в связь, помехозащищенность от атмосферных и искусственных помех. При наличии промежуточных приемопередающих устройств получают радиорелейные линии связи.

*Радиовещание и телевидение* – передача речевых, музыкальных и визуальных ознакомительных или развлекательных сообщений большим группам людей. Должны обеспечивать достаточную дальность действия, число каналов и высокое качество воспроизведения сигналов (моно-, стерео- или квадروفоническое для акустических, черно-белое, цветное и объемное для визуальных). Могут использоваться для специальных целей в условиях работы промышленных, зрелищных, медицинских и других организаций (диспетчерские устройства связи, промышленное и медицинское телевидение, специальные звуковые эффекты и т. п.).

*Радиоуправление* – управление по эфиру или проводам с помощью радиосигналов промышленными, научными или военными объектами. Должно обеспечивать простоту, точность и скрытность управления.

*Радиотелеметрия* – получение информации о работе и состоянии объектов и людей с помощью специальных промежуточных преобразователей и

линий связи. Аппаратура должна обеспечивать точность, быстродействие и быть (особенно для малогабаритных объектов) малогабаритной и экономичной.

*Радиометеорология* – получение информации в основном с помощью специально оснащенных искусственных спутников Земли (например, «Метеор», «Нимбус») и наземных комплексов об облачности, температуре, различных образованиях и других факторах на поверхности Земли, определяющих погоду. Должна обеспечивать точность и своевременность получения метеоинформации.

*Радиолокация* – определение координат и характеристик объекта активными (источники импульсного или непрерывного излучения в составе радиолокационных станций – РЛС) или пассивными (источник радио- или теплоизлучения – сам объект) методами. Должна обеспечивать точность и достоверность работы, особенно в условиях пассивных или активных помех.

*Радионавигация* – особо точное определение координат объекта с помощью специальных источников радиоизлучения с точно известными координатами (например, береговые радиовещательные или специальные станции). Обеспечивает большую точность (особенно на больших расстояниях) по сравнению с радиолокацией.

*Радиоастрономия* – получение информации о космических объектах с помощью приема и анализа их радиоизлучения. Так как ширина «радиоокна» в атмосфере намного больше оптического, то и количество информации тоже намного больше. Должна обеспечивать наивысшую чувствительность и широкополосность системы (ими определяется количество получаемой информации).

*Медицинская радиоэлектроника* – использование методов и средств радиоэлектроники в биомедицинских исследованиях, в качестве электронных стимуляторов деятельности отдельных органов человека, в создании протезов и диагностических систем. Должна обеспечивать высокую эффективность при минимальном нежелательном воздействии на организм и простом обслуживании.

*Радиоизмерения* – создание и использование специальных устройств для измерения или имитации различных сигналов, преимущественно электромагнитной природы. Должны обеспечивать требуемую точность, стабильность, уровень и быстродействие во всех научных исследованиях, для которых предназначены измерительные приборы или комплексы, включая, в частности, наручные электронные часы, средства комплексного контроля и другие подобные устройства. Должны проводиться с минимальным влиянием на параметры контролируемой цепи.

*Устройства обработки данных* обычно являются частью более сложных радиосистем или систем автоматизированного управления (АСУ), но могут быть выполнены и в виде самостоятельных систем, например электронные цифровые (ЦЭВМ), аналоговые (АЭВМ) или клавишные вычислитель-

ные машины (ЭКВМ). Должны обеспечивать простоту ввода и вывода данных, точность, бесшумность и надежность работы.

*Устройства записи и воспроизведения сигналов* – приспособления для записи и воспроизведения акустических, визуальных и специальных сигналов на проволочных, ленточных, дисковых, плоских ферромагнитных (магнитная запись), оптических (в том числе голографическая запись) и других по форме и физической природе носителях (магнитофоны, радиолы, запоминающие устройства (ЗУ) и т. п.). Должны обеспечивать в первую очередь требуемое качество и простоту управления. Для специальных устройств (например, ЗУ) могут предъявляться требования разного быстродействия при записи и воспроизведении.

*Устройства энергетического характера* – приспособления для непосредственного воздействия на свойства материалов или объект управления (некоторые устройства квантовой электроники, используемые в технологии микросхем, устройства высокочастотной закалки, аппаратура физиотерапии, специальные выходные устройства управления и т. п.). Должны обеспечивать избирательное энергетическое воздействие в соответствии с назначением. Их часто (как и некоторые электромеханические и фотооптические устройства) не относят к радиоэлектронике.



Рис. 2.4. Классификация ЭС по объекту установки

Средой установки ЭС могут быть:

- суша (стационарные, переносные, носимые, возимые ЭС – [рис. 2.4](#));
- воздух (самолетные, вертолетные, космические и ракетные ЭС);
- вода (морские и речные корабельные, судовые, буйковые ЭС).

К бортовой, возимой и носимой ЭС, в отличие от стационарной, предъявляются требования по ограничению массы. Кроме того, объект установки часто определяет выбор тех или иных методов отвода тепла. Например, для космической ЭС невозможно применить естественное воздушное охлаждение.

Возимые ЭС для наземных транспортных средств подвергаются воздействию вибраций, ударов и ускорений. Возможно воздействие пыли, паров бензина и масел.

Корабельные ЭС требуют использования влагонепроницаемых корпусов и уплотнения осей органов управления.

Самолетные и вертолетные ЭС должны работать при пониженном атмосферном давлении, воздействии росы и инея, тумана, вибраций, ударов и других воздействий, определяемых конструкцией самолета и вертолета. Наиболее тяжелыми могут быть условия работы ракетных и космических электронных средств.

Таким образом, при разработке конструкции ЭС необходимо знание особенностей объектов-носителей и климатических условий местности эксплуатации ЭС, которые оказывают существенное влияние на конструктивно-компоновочные параметры ЭС, на выбор материалов элементной и конструктивной базы.

*Классификация ЭС по степени защищенности от внешних воздействий:*

- защищенные от воздействия пыли и песка;
- защищенные от влаги:
  - защищенные от попадания водных брызг;
  - защищенные от кратковременного погружения;
  - герметичные;
  - защищенные от воздействия морской воды и солевого тумана;
- защищенные от воздействия солнечной радиации;
- защищенные от воздействия биологических факторов:
  - защита от плесневых грибов;
  - защита от насекомых;
  - защита от грызунов;
- защищенные от воздействия полей СВЧ;
- защищенные от воздействия ионизирующего излучения.

Также возможна классификация ЭС по конструктивному исполнению, технологии изготовления, условиям применения и эксплуатации, виду входной электроэнергии, конструктивно-технологическим признакам, схемно-техническим решениям, технико-экономическим показателям и др.

Области использования и объекты-носители ЭС определяют параметры конкретного микроклимата в месте расположения ЭС. Легче всего обеспечить нормальную работу ЭС в отапливаемых помещениях в стационарных условиях. Стационарная и переносная ЭС, предназначенная для работы на поверхности земли, должна иметь в конструкции защитные корпуса с уплот-

нением и элементную базу, обеспечивающую нормальную работу при воздействии климатических факторов.

## 2.8. Условия эксплуатации

**Факторы, воздействующие на ЭС.** Электронные средства применяются во всех областях народного хозяйства и, как было сказано в предыдущей лекции, могут быть разных видов: наземные, морские, космические, стационарные, возимые, носимые, переносные и т. д. Очевидно, что условия эксплуатации всех этих видов ЭС различны. Перед тем как определиться с вопросом о нормировании условий эксплуатации в ТЗ, рассмотрим классификацию факторов, воздействующих на ЭС.

Все воздействующие факторы подразделяются на объективные, определяемые средой, и субъективные, определяемые обслуживанием системы человеком ([рис. 2.5](#)).

**Субъективные факторы.** Основными субъективными факторами, воздействующими на ЭС, являются *квалификация обслуживающего персонала, условия работы операторов и условия транспортирования и хранения ЭС*. Несмотря на специальную защиту от неквалифицированного персонала (защита от «дурака») и жесткий регламент действий, выход ЭС из строя по вине операторов достигает 30 % от общего числа отказов ЭС.

**Объективные факторы** можно разбить на две большие группы – *внутренние* ([рис. 2.6](#)) и *внешние* ([рис. 2.7](#)). Первые обусловлены воздействиями внешней среды, объектом установки и пр., вторые проявляются вследствие эксплуатации ЭС, как правило, в виде постепенных отказов, когда выходные параметры выходят из поля допусков (так как нагруженный тепловой режим или механические нагрузки резко снижают надежность элементов).

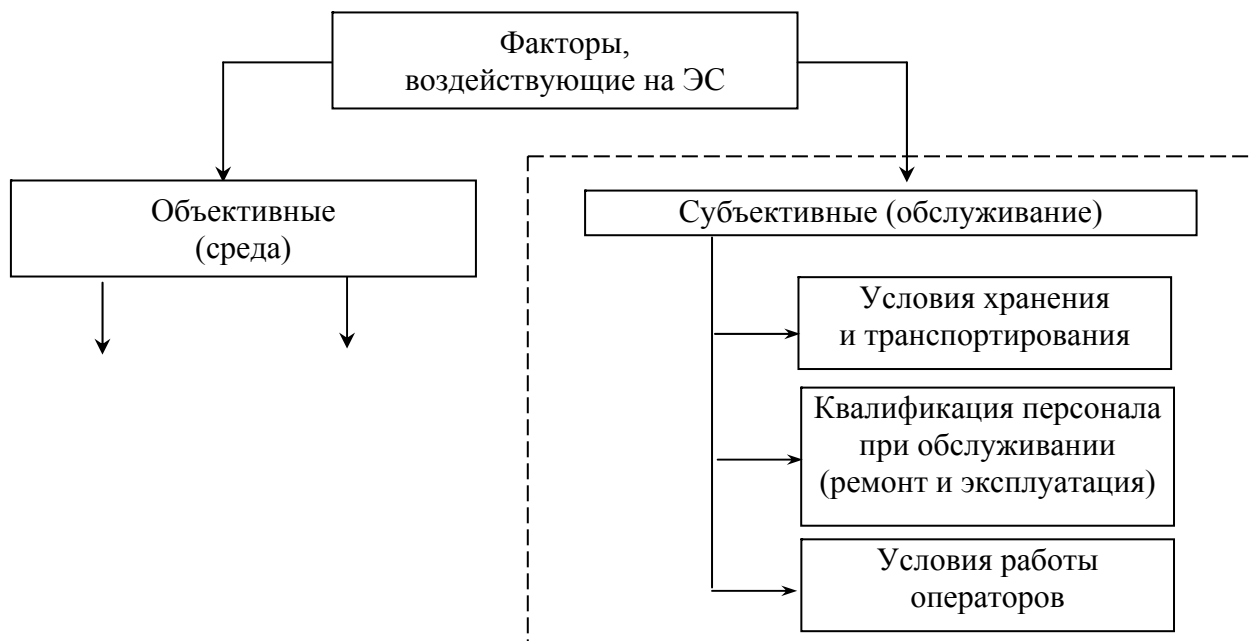


Рис. 2.5. Классификация факторов, воздействующих на ЭС

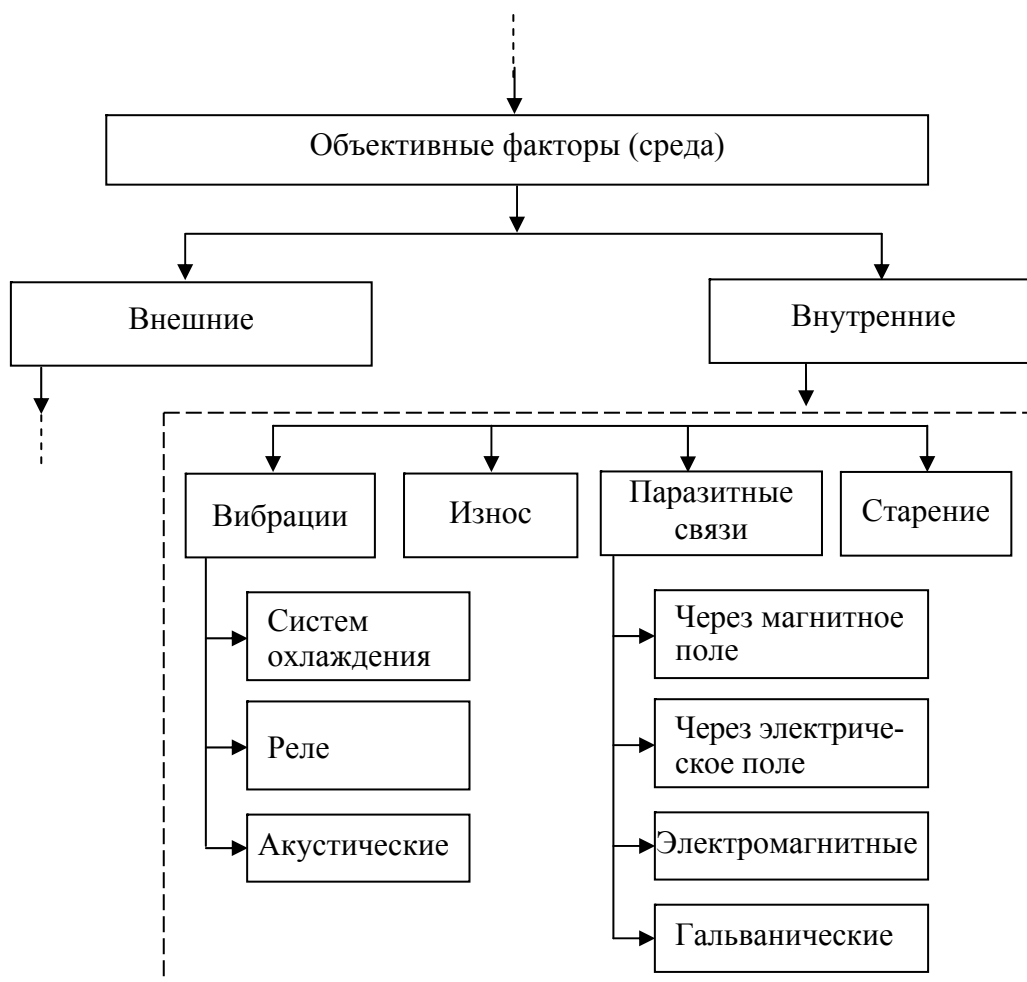


Рис. 2.6. Внутренние факторы, воздействующие на ЭС



*Недопустимые паразитные связи* определяются в основном сразу при проектировании изделия, ибо они обусловлены его конструкцией. Однако их влияние может проявиться и в случае изменения внешних энергетических факторов: изменение условий электропитания, работа в сильных электрических (появление статических зарядов), магнитных (намагничивание материалов), электромагнитных полях. Вредное влияние гальванической связи может стать следствием изменения параметров электрорадиоэлементов (усыхание электролитических конденсаторов, увеличение сопротивления резисторов фильтрующих цепей и т. д.).

*Износ* проявляется вследствие механического воздействия одних деталей на другие (зубчатые и другие передачи, валы и оси, переключатели, тумблеры, реле).

*Старение* обусловлено в первую очередь физико-химическими свойствами применяемых материалов и покрытий. Кроме этого на старение влияют условия применения ЭС на объекте. Тепло, например, приводит к более быстрому старению полимерных материалов. Многие материалы обладают текучестью и со временем изменяют форму. Такие показатели, как предел прочности на изгиб, предел прочности на сжатие и т. д., в течение эксплуатации изменяются и, как правило, ухудшаются.

*Механические воздействия* как результат работы составных частей изделия (системы охлаждения, реле, двигатели, управляющие механизмы, акустические системы) проявляются в основном в виде вибрационных воздействий. Их негативное влияние может проявляться непосредственно на ЭС – это нестабильный контакт переключателей и регулирующих элементов, «дробовой» эффект у электронных ламп, а также ложные срабатывания механических реле. Опосредованно их влияние может проявляться вследствие непрерывных (или длительных) акустических воздействий на оператора.

*Внешние объективные факторы* ([рис. 2.7](#)) можно разбить на три группы: воздействия окружающей среды – биологические, климатические воздействия, а также воздействия радиоактивности и ионизации воздуха; условия транспортирования и хранения в части механических и климатических воздействий; эксплуатационные воздействия.

*Биологические факторы.* К таковым факторам, воздействующим на ЭС, относят плесневые грибки, грызунов и насекомых.

*Плесневые грибки* – важнейшая группа факторов. Основа размножения плесневых грибков – высокая влажность (80–100 %), наличие естественных или искусственных высокомолекулярных соединений для питания и малая освещенность помещения. Изоляционные материалы на основе целлюлозы при воздействии плесневых грибков ухудшают свои механические и электроизоляционные параметры и могут даже разрушаться.

*Грызуны* могут повредить изоляцию электрических кабелей, проводников и пр. Следует учитывать тот факт, что на подобные действия грызунов могут провоцировать электромагнитные воздействия в определенном диапазоне частот.

*Насекомые* редко повреждают ЭС. Наиболее опасны для ЭС, работающих в тропических условиях, термиты. Они поедают преимущественно дре-

весину и поэтому опасны для приборов, имеющих деревянные детали и пластмассы с древесным наполнителем. Опасность для ЭС представляют и летающие насекомые.



Рис. 2.7. Объективные факторы окружающей среды, воздействующие на ЭС

*Ионизирующие излучения (ИИ).* Согласно ГОСТ 15484 к ним относятся любые излучения, взаимодействие которых со средой приводит к образованию электрических зарядов разных знаков. Воздействие ИИ на изделие про-

является в виде радиационного и ионизационного эффектов, обратимых и необратимых дефектов и т. д.

*Радиационный эффект* – изменение значений параметров изделий и материалов в результате воздействия ИИ.

*Ионизационный эффект* – радиационный эффект, обусловленный ионизацией и возбуждением атомов вещества.

*Радиационный дефект* – радиационный эффект, проявляющийся в нарушении структуры вещества под воздействием ИИ.

Наиболее устойчивы к воздействию ИИ металлы. Гамма-излучение на свойства металлов практически не влияет. При воздействии нейтронного излучения предел текучести возрастает примерно в 2–3 раза, ударная вязкость снижается.

Наименьшей радиационной стойкостью обладают электротехнические стали и магнитные материалы.

Бор, марганец, кобальт, свинец, цинк и другие материалы после облучения тепловыми нейтронами становятся источниками вторичного излучения.

Наименее устойчивы к воздействию ИИ полупроводниковые и органические материалы. У полупроводниковых материалов при облучении изменяются время жизни и подвижность носителей заряда, коэффициент Холла и другие параметры, у органических – механические свойства, электрическая прочность.

Неорганические материалы более устойчивы к ИИ, однако у стекол, например, изменяются оптические свойства и цвет.

*Климат* определяет наибольшее число воздействующих факторов. Причем такие из них, как температура, влажность и давление, могут проявляться как на открытом воздухе, так и внутри помещений.

Рассмотрим подробнее основные климатические факторы, воздействующие на ЭС.

*Сухое тепло и сухой холод.* Некоторые сплавы склонны к холодной хрупкости. Термореактивные изоляционные материалы сохраняют свою форму до момента разрушения из-за термохимической цепной реакции разложения. Термопластичные изоляционные материалы при температурной перегрузке сначала становятся эластичными и текучими и только после этого разрушаются. Термочувствительны и многие резины. Смазочные материалы при низкой температуре увеличивают свою вязкость и могут совсем застыть. При высокой температуре вязкость смазки уменьшается и смазка может совсем испариться. Изменение температуры деталей, особенно сложной формы и выполненных из разнородных материалов, может быть причиной значительных механических напряжений и даже разрушений (гальванические или лакокрасочные покрытия, слой глазури и т. п.).

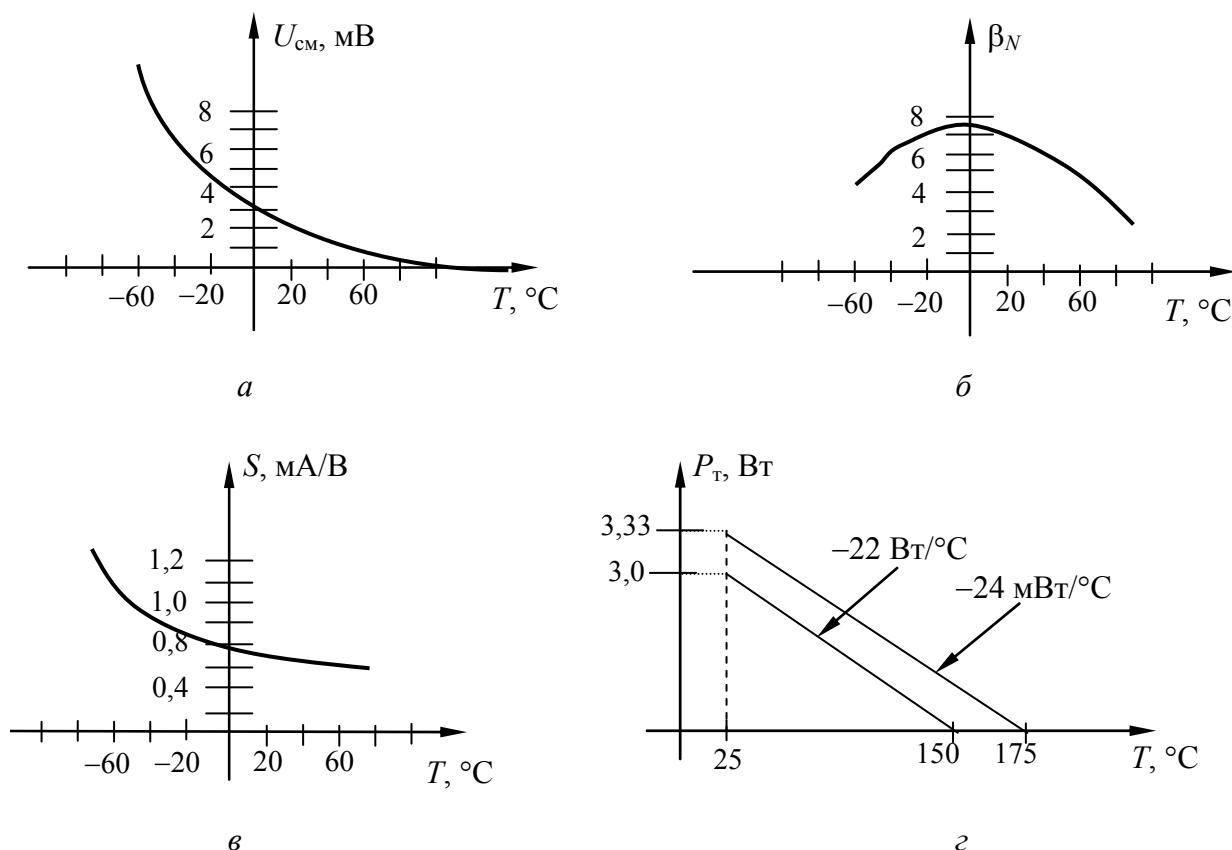


Рис. 2.8. Зависимости параметров электрорадиоэлементов от температуры: *а* – напряжения смещения  $U_{см}$  ИМС ОУ 740 УД 4-2; *б* – коэффициента усиления  $\beta_N$  биполярного транзистора 2Т625А-2; *в* – крутизны  $S$  полевого транзистора КП101Д; *г* – мощности рассеяния  $P_T$  арсенид-галлиевого полевого транзистора LP1500 фирмы Filtronic при различных тепловых сопротивлениях (проводимостях) кристалл – корпус

На [рис. 2.8](#) приведены зависимости параметров различных ЭРЭ (в том числе и зарубежных) от температуры. Из [рис. 2.8, г](#) видно, что чем меньше мощность рассеяния, тем больше допустимая температура. Обычно при проектировании СВЧ-транзисторов необходимо знать входную и выходную мощность на транзисторе и мощность по питанию (зависит от напряжения питания). При большой мощности рассеяния допустимая температура уменьшается, поэтому актуальной задачей является оптимальное конструирование теплоотводящих элементов конструкции (в частности, радиаторов), так как необходимо обеспечить температуру на корпусе транзистора не выше допустимой при определенной мощности рассеяния.

Микроминиатюризация ЭС способствует значительному снижению потребления энергии от источников питания. Однако уменьшение габаритов ЭС в конечном счете ведет к росту отношения выделяемой тепловой энергии к энергии, рассеиваемой в окружающее пространство. Поэтому проблема обеспечения тепловых режимов в современных ЭС не утрачивает своей актуальности. Напротив, допустимый нагрев элементов конструкции ЭС становится одним из основных ограничивающих факторов на пути дальнейшего улучшения массогабаритных характеристик ЭС.

Наличие тепловыделяющих элементов в составе конструкций ЭС в сочетании с широким диапазоном температур окружающей среды приводит к появлению паразитного теплового фактора, оказывающего существенное влияние на механические процессы, в том числе вследствие появления температурных напряжений. При этом от температуры зависят такие физико-механические параметры, как модуль упругости, коэффициент механических потерь или логарифмический декремент затухания колебаний (ЛДЗК).

*Воздействие влаги* на металлы и изоляционные материалы имеет разную природу, но одинаковый конечный результат – разрушение исходной структуры материала. В металлах это происходит вследствие коррозии, в изоляционных материалах – вследствие влагопоглощения. Термодинамической причиной коррозии является переход корродирующего металла из менее стабильного состояния, в котором он используется в конструкции ЭС, в более стабильное первоначальное состояние, из которого он был получен (в виде окислов, сульфидов, карбонатов и т. п.). На скорость коррозии влияют: концентрационная поляризация, перенапряжение и пассивность металлов.

*Давление.* При эксплуатации ЭС как на нормальной высоте над уровнем моря (до 1000 м), так и с подъемом на высоту может происходить изменение атмосферного давления, и его влияние на изделие необходимо учитывать ввиду следующих причин:

во-первых, для герметичных аппаратов следует рассчитывать механическую прочность на растяжение или сжатие при перепадах давления и соответственно выбирать конструкцию герметизирующего соединения;

во-вторых, с уменьшением давления и, соответственно, уменьшением плотности воздуха увеличиваются фактические превышения температуры всех видов изделий, выделяющих при работе тепло и полностью или частично охлаждаемых свободной или принудительной конвекцией воздуха. Следовательно, при проектировании изделий допустимые превышения температуры (перегревы) должны быть понижены на величину, соответствующую поправке на высоту;

в-третьих, если давление не превышает 10 мм рт. ст., то из дальнейшего рассмотрения можно исключить конвективные способы отвода тепла для негерметичного ЭС;

в-четвертых, с уменьшением давления (рост высоты над уровнем моря) происходит снижение электрической прочности воздуха и уменьшение значений пробивных напряжений изоляции изделий.

*Песок и пыль.* Максимальная опасность – не относительно крупные частицы пыли и песка (у них меньше острых граней), а мелкие, взвешенные в атмосфере, с величиной зерна 1–40 мкм. Результаты их воздействия в подшипниках и механизмах – падение точности, заедания; в зазорах с контактами – препятствие нормальной работе реле и переключателей; на поверхности изоляционных деталей – паразитная проводимость (из-за гигроскопичности); на поверхности металлических деталей – увеличение скорости коррозии. В

тропических условиях пыль может быть питательной средой для плесневых микроорганизмов. Вследствие высокого содержания кварца пыль в пустыне более твердая и абразивная. При значительной запыленности, повышенной температуре пыли, наличии кислорода и источника энергии пыль взрывается, что может быть причиной разрушений ЭС.

*Солнечная радиация (РС).* Различают две группы воздействия РС: фотолитическое и фотоокислительное (перегрев). Фотолитическое характеризуется избирательным поглощением солнечных лучей в полосах поглощения. Воздействие фотонов приводит к отрыву фотоэлектронов и разрыву молекулярных связей. Следствием этого является изменение цвета ряда полимерных материалов, хрупкость и потеря прочности, нарушение лакокрасочных покрытий.

Суть фотоокислительного воздействия РС – разрыв химических связей при одновременном воздействии излучения, кислорода воздуха и влаги. Результат – усиленная коррозия (особенно в условиях тропического климата). Перегрев ЭС до 25–30 К происходит вследствие: непосредственного излучения Солнца; излучения, рассеянного и отраженного атмосферой; нахождения в теплых слоях воздуха; излучения от грунта, теплопроводности воздуха и грунта.

Специфическим видом воздействий, которым подвергаются ЭС и их материалы, являются СВЧ-излучения. В электромагнитном поле СВЧ ряд определяющих свойств материалов существенно изменяется: вследствие поверхностного эффекта уменьшается проводимость металлов и сплавов; вследствие поляризации изменяется диэлектрическая проницаемость и увеличиваются потери в диэлектриках; вследствие гиромангнитного эффекта изменяется магнитная проницаемость ферритов.

*Структура эксплуатационных факторов* приведена на [рис. 2.9](#).

*Режим работы.* Исходя из назначения ЭС, режим работы может быть определен следующим образом: круглосуточный, периодический, ждущий. Этот фактор, в данном контексте, определяет нагруженность применяемых ЭРЭ и в конечном итоге требования к надежности составных частей ЭС.

*Особенности применения.* Электронное средство может работать в дневное или ночное время. Это определяет в первую очередь температурные воздействия. Например, для континентального климата и высокогорных районов характерна очень большая разница между дневными и ночными температурами.

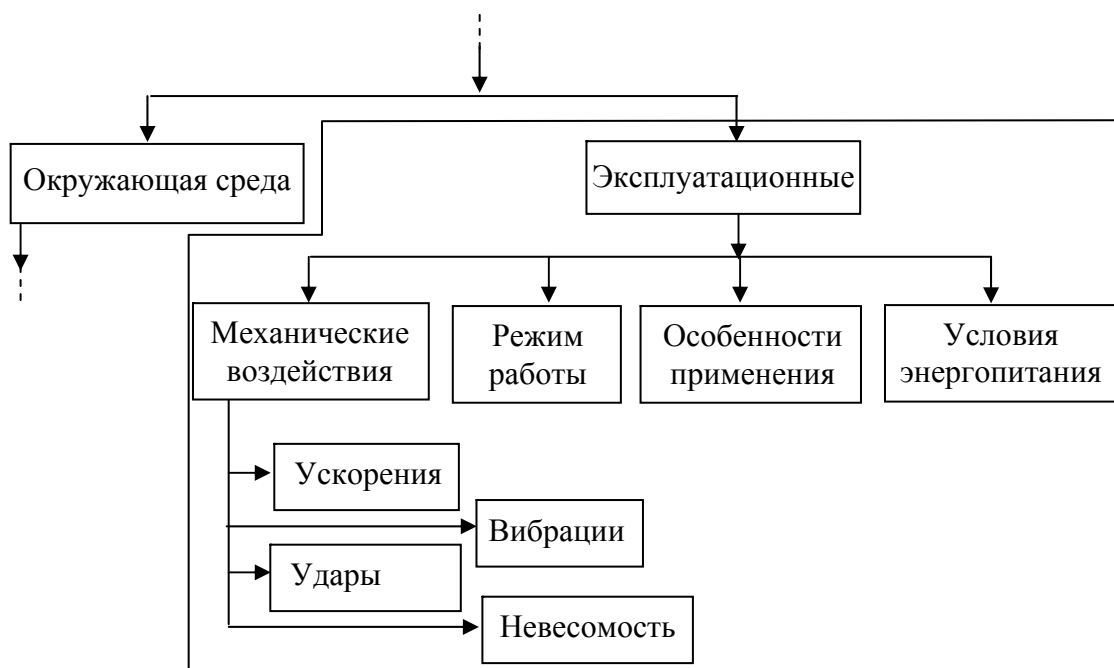


Рис. 2.9. Внешние объективные эксплуатационные факторы, воздействующие на ЭС

Кроме этого может изменяться освещенность объекта ЭС. Различают дневное, ночное и сумеречное освещение. Этот фактор влияет на выбор типа маркировки, необходимость подсветки органов управления и т. п.

*Условия энергоснабжения.* Различают два вида энергоснабжения: автономное и от первичных электросетей. В первом случае источниками энергии служат аккумуляторы, батареи (гальванические, солнечные и пр.). При питании от электрических сетей в аппаратуру, как правило, встраиваются вторичные источники питания (ВИП). Последнее увеличивает массу, объем изделия, а также тепловыделение.

*Механические воздействия* наблюдаются практически для любой аппаратуры независимо от объекта установки.

Обычно различают четыре вида механических воздействий:

- ускорения;
- вибрации;
- удары;
- невесомость.

*Ускорения* проявляются в виде однонаправленной, относительно долговременной, статической нагрузки.

*Вибрация* представляет собой знакопеременные нагрузки, обусловленные в первую очередь движущимся объектом установки ЭС (автомобиль, корабль, самолет и др.).

Как отдельный вид вибрационных воздействий в настоящее время выделяют акустические воздействия. Основное отличие акустической от механической вибрации состоит в том, что передача возмущающего воздействия

происходит не через элементы несущей конструкции, а через акустическую (воздействующую) среду.

*Удары* обусловлены быстрым изменением ускорения и различаются по степени жесткости. При равных значениях ускорений они менее опасны, чем вибрационные воздействия.

*Невесомость* как механический воздействующий фактор чаще всего проявляется в космических аппаратах – отсутствием реакции опоры.

## 2.9. Нормирование условий эксплуатации

**Нормальные значения воздействующих факторов.** Каждое из климатических и механических воздействий, рассмотренных в предыдущей лекции, можно задавать в виде конкретных значений параметров. Например, за нормальные значения климатических факторов внешней среды принимают следующие:

- температура  $25 \pm 10$  °С;
- относительная влажность воздуха 45–80 %;
- атмосферное давление 64,0–106,7 кПа (630–800 мм рт. ст.).

Как видно из приведенного примера, каждый параметр характеризуется не одним значением, а интервалом значений. Поэтому обычно ЭС, с точки зрения внешних воздействий, объединяются в группы, для которых количество внешних параметров и интервалы значений одинаковы.

Рассмотрим, что является критерием для такого объединения.

**Макроклиматические зоны.** Климатические воздействия на наземное ЭС определяются в первую очередь климатом в той или иной области, наличием морей и т. п. Поэтому оказалось целесообразным объединить ЭС в группы по климатическому исполнению.



В соответствии с ГОСТ 15150 выделены *макроклиматические зоны*, характеризующиеся следующими климатами:

- холодный – исполнение ХЛ;
- умеренный – исполнение У;
- умеренно-холодный – исполнение УХЛ;
- тропический сухой – исполнение ТС;
- тропический влажный – исполнение ТВ;
- морской – исполнение М.

Аппаратура, предназначенная для работы как в тропическом сухом, так в тропическом влажном климатах, изготавливается в тропическом исполнении – Т.

Аппаратура, предназначенная для работы в холодном, умеренном, умеренно-холодном и тропическом климатах, изготавливается в общеклиматическом исполнении – О.

Аппаратура, предназначенная для работы в тропическом и морском климатах, изготавливается в исполнении ТМ.

Аппаратура, предназначенная для работы в холодном, умеренном, умеренно-холодном, тропическом и морском климатах, изготавливается в исполнении ОМ.

Аппаратура, предназначенная для работы в любом климате, изготавливается во всеклиматическом исполнении – В.

Параметры всех климатических воздействий, определяемые макроклиматическим районом, корректно можно учитывать только для ограниченного числа ЭС, а именно для ЭС, работающих на открытом воздухе. Очевидно, что объект установки, например жилое помещение, изменяет параметры климатических воздействий.

**Категории исполнения ЭС.** Для учета этих изменений введено понятие «категория исполнения». В соответствии с ГОСТ 15150 определено пять категорий исполнения ЭС ([табл. 2.2](#)).

Каждое климатическое исполнение с учетом категории исполнения характеризуется конкретными воздействующими факторами: температурой ([табл. 2.3](#)), влажностью ([табл. 2.4](#)), давлением, влиянием дождя, пыли и т. д.

Такой климатический фактор, как давление, может меняться для ЭС с подъемом на высоту. Поэтому для аппаратуры, устанавливаемой на летательных аппаратах, задается группа ([табл. 2.5](#)), определяющая величину давления, при которой ЭС должны работать.

Таблица 2.2

### Характеристика категорий исполнения ЭС

| Укрупненная категория                                                                                                                                                                                                                     | Обозначение | Дополнительная категория                                                                                                                                                                                                            | Обозначение |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Для эксплуатации на открытом воздухе (воздействие совокупности климатических факторов, характерных для данного макроклиматического района)                                                                                                | 1           | Для работы и эксплуатационного хранения в помещениях категории 4 и для кратковременной работы в других условиях                                                                                                                     | 1.1         |
| Для эксплуатации под навесом или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе и имеется доступ наружного воздуха (кузова, навесы), а также в изделии категории 1 | 2           | Для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категорий 1; 1,1; 2, конструкция которых исключает возможность конденсации влаги на встроенных элементах (например, внутри радиоэлектронной аппаратуры) | 2.1         |
| Для эксплуатации в закрытых помещениях (объемах) с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий (например, в металлических с теплоизоляцией, каменных и подобных помещениях)                              | 3           | Для эксплуатации в нерегулярно отапливаемых помещениях                                                                                                                                                                              | 3.1         |
| Для эксплуатации в закрытых помещениях (объемах) с искусственно регулируемыми климатическими условиями (например, в закрытых отапливаемых или охлаждаемых и вентилируемых производственных и других помещениях)                           | 4           | Для эксплуатации в помещениях с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом                                                                                                                                         | 4.1         |
|                                                                                                                                                                                                                                           |             | Для эксплуатации в лабораторных, капитальных жилых и других подобного типа помещениях                                                                                                                                               | 4.2         |
| Для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью (например, в подвалах, судовых, корабельных помещениях, в которых возможно длительное наличие воды)                                                                                 | 5           | Для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категории 5, при условии отсутствия на них конденсации влаги                                                                                            | 5.1         |

Таблица 2.3

### Значения рабочих температур воздуха для умеренного климатического исполнения ЭС

| Исполнение изделия | Категории изделий | Температура воздуха, °С |        |
|--------------------|-------------------|-------------------------|--------|
|                    |                   | верхняя                 | нижняя |
| У                  | 1; 1.1; 2; 2.1; 3 | 40                      | – 45   |
|                    | 3.1               | 40                      | – 40   |
|                    | 5; 5.1            | 35                      | – 5    |

Таблица 2.4

**Значения влажности  
для умеренного и холодного климатических исполнений ЭС**

| Исполнение изделий | Категории изделий | Относительная влажность при 25 °С, % | Абсолютная влажность, г/м <sup>3</sup> |
|--------------------|-------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| У, УХЛ (ХЛ)        | 1; 2; 5           | 100                                  | 11                                     |
|                    | 1.1; 2.1; 3; 3.1  | 98                                   | 10                                     |
|                    | 5.1               | 98                                   | 11                                     |

Таблица 2.5

**Группа исполнения ЭС, устанавливаемых на летательные аппараты**

| Группа | Давление, кПа<br>(мм рт. ст.) | Высота,<br>тыс. м | Группа | Давление, кПа<br>(мм рт. ст.)     | Высота,<br>тыс. м |
|--------|-------------------------------|-------------------|--------|-----------------------------------|-------------------|
| а      | 70,0 (525)                    | 2,4               | и      | $1,3 \cdot 10^{-1}$ (1,0)         | 45,8              |
| б      | 60,0 (450)                    | 3,5               | к      | $1,3 \cdot 10^{-2}$ ( $10^{-1}$ ) | 63,6              |
| в      | 53,3 (400)                    | 4,3               | л      | $1,3 \cdot 10^{-2}$ ( $10^{-1}$ ) | 94,7              |
| г      | 26,7 (200)                    | 9,4               | м      | $1,3 \cdot 10^{-2}$ ( $10^{-1}$ ) | 200,0             |
| д      | 12,0 (90)                     | 14,4              | н      | $1,3 \cdot 10^{-2}$ ( $10^{-1}$ ) | Космос            |
| е      | 4,4 (33)                      | 20,0              | о      | $1,3 \cdot 10^{-2}$ ( $10^{-1}$ ) | Космос            |
| ж      | 2,0 (15)                      | 26,0              | п      | $1,3 \cdot 10^{-2}$ ( $10^{-1}$ ) | Космос            |
| з      | 0,6 (5)                       | 34,0              |        |                                   |                   |

Как было показано в предыдущей лекции, объект установки ЭС определяет и механические воздействия на них. По этим параметрам воздействия ЭС можно также сгруппировать, например, в стационарную, возимую и другие группы. Несмотря на то что, скажем, основным определяющим фактором при этом будет тип транспорта (колесный, гусеничный и т. д.), объединение в группы механических воздействий обусловлено и назначением ЭС.

**Нормирование для аппаратуры связи.** Для аппаратуры связи (ГОСТ 16019) установлено семь групп, отличающихся объектом установки и, соответственно, параметрами внешних воздействий:

С1 – стационарные, работающие в отапливаемых сооружениях;

С2 – стационарные, работающие на открытом воздухе или в неотапливаемых подземных сооружениях;

В3 – возимые, установленные в автомобилях, мотоциклах, в сельскохозяйственной и другой технике и работающие на ходу;

В4 – возимые, установленные во внутренних помещениях речных судов и работающие на ходу;

В5 – возимые, установленные в подвижных железнодорожных объектах и работающие на ходу;

Н6 – носимые и портативные, предназначенные для длительной переноски на открытом воздухе или в неотапливаемых наземных или подземных сооружениях, работающие и неработающие на ходу;

Н7 – портативные, предназначенные для длительной переноски на открытом воздухе при облегченных внешних воздействиях или в отапливаемых наземных и подземных сооружениях и работающие на ходу.

Из механических параметров (ГОСТ 16019) обычно выделяют прочность и устойчивость к механическим ударам и вибрациям, а также воздействие линейных ускорений. Понятно, что прочность задается для стационарной ЭС, а устойчивость – для возимой (см. [табл. 2.6](#), [табл. 2.7](#)).

**Нормирование для бытовой аппаратуры.** В отличие от аппаратуры связи бытовая аппаратура по условиям эксплуатации (ГОСТ 11478) подразделяется на четыре группы ([табл. 2.8](#)).

Для сравнения приведем нормы климатических и механических воздействий для бытовой ЭС группы II ([табл. 2.9](#)).

Таблица 2.6

**Нормы климатических и механических воздействий  
для стационарной аппаратуры групп С1 и С2**

| Параметры                                                                                                                                                     | Группа С1               | Группа С2 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------|
| Прочность при синусоидальных вибрациях:<br>частота $f$ , Гц<br>амплитуда $a$ , $\text{м/с}^2$                                                                 | 20<br>19,6              |           |
| Обнаружение резонансов в конструкции:<br>диапазон частот $f$ , Гц<br>амплитуда, мм                                                                            | 10–30<br>0,5–0,8        |           |
| Воздействие повышенной влажности:<br>относительная влажность, %<br>температура, °С                                                                            | 80<br>25                | 93<br>35  |
| Воздействие температуры:<br>пониженной, °С<br>повышенной, °С                                                                                                  | –40<br>55               | –40<br>60 |
| Воздействие пониженного атмосферного давления $p$ , кПа                                                                                                       | 61                      |           |
| Воздействие инея и росы при 0 °С                                                                                                                              | Нет                     | Есть      |
| Воздействие дождя                                                                                                                                             | Нет                     | Есть      |
| Прочность при транспортировании:<br>длительность ударного импульса $t_n$ , мс<br>частота повторения $f$ , $\text{мин}^{-1}$<br>амплитуда $a$ , $\text{м/с}^2$ | 5–10<br>40–80<br>49–245 |           |
| Воздействие соляного (морского) тумана                                                                                                                        | Есть                    | Нет       |
| Воздействие воздушно-пылевого потока:<br>скорость $v$ , м/с, более                                                                                            | –                       | 10        |

Таблица 2.7

**Нормы климатических и механических воздействий  
для возимой аппаратуры групп В3 и В5**

| Параметры                                                                                                                                                                                         | Группы В3 и В5              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Прочность при синусоидальных вибрациях:<br>частота $f$ , Гц<br>амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>                                                                                                   | 20<br>19,6                  |
| Обнаружение резонансов в конструкции:<br>диапазон частот $f$ , Гц<br>амплитуда, мм                                                                                                                | 10–30<br>0,5–0,8            |
| Устойчивость к синусоидальным вибрациям:<br>диапазон частот $f$ , Гц<br>амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>                                                                                          | 10–70<br>9,8–37             |
| Устойчивость к механическим ударам:<br>длительность ударного импульса $t_{и}$ , мс<br>частота следования $f$ , мин <sup>-1</sup><br>амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>                              | 5–10<br>40–80<br>147        |
| Прочность при механических ударах:<br>длительность ударного импульса $t_{и}$ , мс<br>частота следования $f$ , мин <sup>-1</sup><br>амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup> :<br>3-я группа<br>5-я группа | 5–10<br>40–80<br>147<br>245 |
| Воздействие повышенной влажности:<br>относительная влажность, %<br>температура, °С                                                                                                                | 93<br>40                    |
| Воздействие температуры:<br>пониженной, °С<br>повышенной, °С                                                                                                                                      | –40<br>60                   |
| Устойчивость к перепадам температур:<br>диапазон температур, °С<br>время изменения температуры, ч                                                                                                 | От – 50 до 60<br>2–6        |
| Воздействие пониженного атмосферного давления $p$ , кПа                                                                                                                                           | 61                          |
| Воздействие инея и росы при 0 °С                                                                                                                                                                  | Есть                        |
| Воздействие дождя и соляного (морского) тумана                                                                                                                                                    | Есть                        |
| Воздействие воздушно-пылевого потока:<br>скорость $v$ , м/с, более                                                                                                                                | 10                          |
| Прочность при транспортировании:<br>длительность ударного импульса $t_{и}$ , мс<br>частота следования $f$ , мин <sup>-1</sup><br>амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>                                 | 5–10<br>40–80<br>49–245     |

Таблица 2.8

## Группы бытовой ЭС

| Группа аппаратуры | Условия эксплуатации                                                                                | Категория исполнения по ГОСТ 15150 |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| I                 | В жилых помещениях                                                                                  | 4.2                                |
| II                | В транспортных средствах (встроенная)                                                               | 2.1                                |
| III               | На открытом воздухе, не рассчитанная для работы в условиях движения                                 | 1.1                                |
| IV                | На открытом воздухе, в том числе в условиях движения (на ходу, в салоне автомобиля, катера и т. д.) |                                    |

Таблица 2.9

**Нормы климатических и механических воздействий  
для бытовой ЭС группы II**

| Параметры                                                                                                                                                            | Группа II           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Отсутствие резонансов:<br>диапазон частот $f$ , Гц<br>амплитуда, мм                                                                                                  | 10–55<br>0,15       |
| Устойчивость к синусоидальным вибрациям:<br>диапазон частот $f$ , Гц<br>амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>                                                             | 10–150<br>19,6      |
| Прочность при синусоидальных вибрациях:<br>диапазон частот $f$ , Гц<br>амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>                                                              | 10–150<br>19,6      |
| Прочность при механических ударах:<br>длительность ударного импульса $t_{и}$ , мс<br>частота следования $f$ , мин <sup>-1</sup><br>амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>  | 16<br>60–120<br>98  |
| Устойчивость к механическим ударам:<br>длительность ударного импульса $t_{и}$ , мс<br>частота следования $f$ , мин <sup>-1</sup><br>амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup> | 16<br>60–120<br>98  |
| Прочность при транспортировании:<br>длительность ударного импульса $t_{и}$ , мс<br>частота следования $f$ , мин <sup>-1</sup><br>амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>    | 11<br>60–120<br>147 |
| Воздействие температуры:<br>пониженной, °С<br>повышенной, °С                                                                                                         | – 40<br>55          |
| Воздействие пониженного атмосферного давления $p$ , кПа (мм рт. ст.)                                                                                                 | 70 (525)            |
| Воздействие воздушно-пылевого потока:<br>скорость $v$ , м/с                                                                                                          | 0,5–1               |
| Воздействие соляного (морского) тумана                                                                                                                               | Нет                 |

Кроме того, учитывая особенности применения бытовой аппаратуры, а именно неподготовленный пользователь, широкий возрастной круг пользователей и т. п., для всех групп бытовой ЭС задается прочность при падении с высоты  $h$ , определяемой массой изделия:

- до 2 кг включительно – 1000 мм;
- свыше 2 до 5 кг включительно – 500 мм;
- свыше 5 до 10 кг включительно – 250 мм;
- свыше 10 до 50 кг включительно – 100 мм;
- свыше 50 кг – 50 мм.

Аналогично, для изделий измерительной техники, ЭВС, медицинской аппаратуры и других ЭС внешние воздействия задаются не в виде конкретных значений для каждого параметра, а укрупненными категориями. При этом количество параметров для каждой группы может быть разным.

Распределение внешних воздействий по некоторым эксплуатационным группам позволяет пользователю более просто определить пригодность применения той или иной аппаратуры.

### Контрольные вопросы

1. Какие бывают ограничения при конструкторском проектировании?
2. Какая информация может являться исходными данными для разработки ЭС?
3. Перечислите разделы, входящие в состав технического задания на проектирование ЭС?
4. Может ли корректироваться техническое задание в процессе разработки ЭС?
5. Какие факторы, воздействующие на ЭС, являются субъективными? Приведите примеры.
6. Какие факторы входят в группу внешних объективных воздействий? Приведите примеры влияния данных факторов на конструкцию ЭС.
7. Для чего необходимо нормирование условий эксплуатации?
8. Какие критерии выбираются для формирования групп по условиям эксплуатации?
9. Чем обусловлено введение нормируемого параметра – падение высоты для бытовой РЭС?

### 3. СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

[3.1. Цели и формы стандартизации.](#)

[3.2. Уровни стандартов.](#)

[3.3. Системы стандартов.](#)

[3.4. Основные положения ЕСКД:](#)

[Контрольные вопросы.](#)

Л и т е р а т у р а: [[38](#), [43](#), [44](#)].

С различными аспектами стандартизации человек сталкивается постоянно. Например, при покупке стационарно-бытовой ЭС пользователь не должен задумываться о том, подойдет ли вилка для подключения в сеть 220 В к установленным в квартире розеткам. Такой вопрос не должен стоять перед пользователем и при замене в портативной ЭС источников питания – аккумуляторов и батарей. Конечно, назначение и потребляемая мощность портативной аппаратуры требует применения различных автономных источников питания, отличных, например, максимальным током, емкостью, напряжением и т. д., но количество типоразмеров этих источников должно быть ограничено.

Аналогичный пример можно привести с ПЭВМ. Поскольку для этого класса ЭВС в последнее время характерно быстрое развитие, то необходим частый «апгрейд». Фирм, производящих узлы ПЭВМ (корпуса, материнские платы и т. д.) и комплектующие (звуковые и видеокарты и т. д.), достаточно много, однако в большинстве случаев замена морально устаревших элементов оборудования происходит без проблем.



Рис. 3.1. Дискеты различных фирм-производителей





Рис. 3.2. Оптические диски CD-RW разных размеров

Другой пример. Количество мобильных носителей информации ограничено. Наиболее часто применяются магнитные дискеты 3,5" ([рис. 3.1](#)) и оптические диски 3,5" или 5,25" ([рис. 3.2](#)). При большом числе размеров носителей информации на передней панели корпуса пришлось бы разместить число дисководов, практически равное числу носителей информации.

Правила стандартизации применяются и в оформлении конструкторской документации, т. е. при формализации результатов проектирования. Это стройная система определенных правил, начиная от ограниченного числа форматов конструкторской документации. Оговорены также правила проекционного черчения, расположение, состав и порядок технических требований. При разработке схем электрических используют определенные обозначения электрорадиоизделий – транзисторов, диодов, разъемов, реле и пр.

Конструктор должен понимать, что все его разработки должны соответствовать требованиям стандартизации, т. е. требованиям ГОСТов. Требования ЕСКД к оформлению конструкторской документации являются, по сути, неким «языком», который понятен всем знакомым с ним.

Важным аспектом стандартизации является и то, что при использовании в процессе конструирования средств автоматизации следует помнить о совместимости форматов файлов различных программных продуктов. Так, например, программа-трассировщик печатных плат должна «понимать» формат ранее начерченной принципиальной схемы, а также иметь возможность конвертирования в файлы разных форматов.

Более того, стандарты устанавливают параметрические ряды, требования к качеству, надежности, методам контроля и единство оценки качества изделий.

### 3.1. Цели и формы стандартизации

**Стандартизация** – процесс установления и применения правил с целью упорядочения деятельности в данной области на пользу и при участии всех сторон, в частности для достижения всеобщей оптимальной экономии с соблюдением правил техники безопасности. Она основывается на достижениях науки и техники и практического опыта, определяет основу не только настоящего развития, но и будущего.

Результатом стандартизации является стандарт.

**Стандарт** – нормативно-технический документ, устанавливающий комплекс норм, правил, требований к объекту стандартизации на основе достижений науки и техники и практического опыта.

Стандарты разрабатывают отраслевые министерства и НИИ.

Различают следующие *виды стандартов*:

- документ, содержащий ряд требований, норм, подлежащих выполнению в виде основной единицы или физической константы (А, М, °С, К, Na, число Авогадро и т. д.);
- предмет для физического сравнения (эталон метра, килограмма и т. д.);
- незаконные виды стандартов – мода, обычаи, десятичная система счета и т. д.

*Цель стандартизации* – повышение качества продукции. В связи с этим перед стандартизацией ставятся следующие задачи:

- превращение стандартов в средство внедрения новой техники;
- повышение эффективности стандартов для улучшения качества сырья, полуфабрикатов, продукции;
- планирование технического прогресса;
- создание межотраслевых систем стандартов, обеспечивающих оптимальные условия работы.

Решение поставленных задач возможно только при комплексном подходе, который обуславливает наличие следующих форм стандартизации:

- *комплексная стандартизация* – разработка единой системы стандартов на продукцию, полуфабрикаты, сырье и все то, что связано с продукцией (например, коробки, ящики, контейнеры, платформы, грузовики и пр.);
- *опережающая стандартизация*. В стандартах указываются требования к качеству изделия не только на один срок, но и на несколько (минимум на два) сроков и показано, как изменяются требования к качеству продукции;
- *межотраслевые стандарты* (ЕСКД, ЕСТД, ЕСТПП).

### 3.2. Уровни стандартов

Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что для достижения заданного качества продукции необходимо создать системную увязку между следующими группами стандартов, определяющих:

- материальное вхождение (полуфабрикаты, сырье, детали);
- нематериальное вхождение (методы расчета, методы контроля и измерения, процессы труда, пути получения информации);
- технологическое сопровождение (оборудование, инструмент, оснастка).

Исходя из иерархического построения общности людей (государство, регион и др.) существует и иерархическое соподчинение стандартов, которые разбиты на следующие уровни:

1. Международный стандарт (ISO, МЭК и др.).
2. Региональный стандарт (например, стандарты стран Общего рынка, ГОСТ).
3. Двухсторонний стандарт (распространяется только на две стороны – страны).
4. Национальный стандарт (действует только в рамках одной страны, например ГОСТ Р).
5. Отраслевой стандарт (ОСТ).
6. Стандарт предприятия (СТП).

В России есть особый вид стандарта между 5 и 6-м уровнями – это республиканский стандарт.

В сфере повышения качества продукции имеют место определенные трудности:

- повышение квалификации работников и неумение в то же время определять качество продукции;
- необходимость роста количества продукции при повышении ее качества;
- необходимость снижения себестоимости при постоянном росте объема или номенклатуры выпускаемой продукции.

В общем случае самое высокое качество продукции, устанавливаемое стандартами, – в Бельгии, самое низкое – в России и США. Это объясняется отсутствием узкой специализации производства.

Составной частью работ по стандартизации является нормализация, которая необходима для облегчения разработки и изготовления изделий. *Нормализация* – некоторые виды работ по стандартизации в машиностроении.

Основой нормализации являются ряды чисел, подчиняющиеся определенным закономерностям. Согласно ГОСТ 8032 устанавливается пять рядов предпочтительных чисел со знаменателем прогрессии  $\phi = \sqrt[n]{10}$ . Степени  $n$  корня приняты равными 5, 10, 20, 40, 80. Эти числа вместе с буквой  $R$  составляют обозначение ряда ([табл. 3.1](#)).

Таблица 3.1

Пять рядов предпочтительных чисел со знаменателем прогрессии  $\phi = \sqrt[5]{10}$

| Ряды   | $R5$                       | $R10$                        | $R20$                        | $R40$                        | $R80$                        |
|--------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $\phi$ | $\sqrt[5]{10} \approx 1,6$ | $\sqrt[10]{10} \approx 1,25$ | $\sqrt[20]{10} \approx 1,12$ | $\sqrt[40]{10} \approx 1,06$ | $\sqrt[80]{10} \approx 1,03$ |

Таблица 3.2

Основные ряды предпочтительных чисел в диапазоне 1–10

|       |                                                                   |
|-------|-------------------------------------------------------------------|
| $R5$  | 1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10                                           |
| $R10$ | 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4,6; 5; 6,3; 8; 10                    |
| $R20$ | 1; 1,12; 1,25; 1,4; 1,8; 2,0; 2,24; 2,5; 2,8; 3,15; 3,55; 4       |
| $R40$ | 1; 1,06; 1,12; 1,18; 1,25; 1,32; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2  |
| $R80$ | 1; 1,03; 1,06; 1,08; 1,12; 1,15; 1,18; 1,2; 1,25; 1,28; 1,36; 1,4 |

Таблица 3.3

Ряд нормальных размеров

|           |                                                                                             |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_{a80}$ | 1; 1,05; 1,1; 1,15; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,1; 2,2; 2,4; 2,5 и т. д. |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|

Величина любого члена ряда  $a_k = a_0 \phi^k$ , где  $k$  – порядковый номер числа,  $a_0$  – первый член ряда, которому присвоен нулевой номер.

Основные ряды предпочтительных чисел в диапазоне 1–10 представлены в [табл. 3.2](#). Численные значения всех членов рядов округлены с погрешностью не более  $\pm 1\%$ . Каждый более низкий ряд получается изъятием членов (через один) из ближайшего более высокого ряда.

Из основных рядов получают геометрические ряды для любого диапазона чисел. На базе основных рядов разработаны ряды нормальных линейных размеров (ГОСТ 6636) с несколько большим округлением чисел по сравнению с основными. В отличие от основных ряд нормальных размеров обозначают буквой  $R$  с индексом  $a$  ([табл. 3.3](#)).

ГОСТ 6636 охватывает линейные размеры в интервале от 0,001 до 10000 мм.

Применение гостированных линейных размеров целесообразно для поверхностей, подвергаемых точной механической обработке, особенно для диаметров посадочных соединений, что способствует нормализации режущего, контрольного и мерительного инструмента.

Применять нормализованные ряды для поверхностей, не нуждающихся в точной координации (для осевых размеров и размеров необрабатываемых поверхностей при литье и штамповке), нерационально. В таких случаях даже частичная нормализация для размеров, не давая никаких реальных преимуществ, только усложняет процесс проектирования и изготовления изделия.

### 3.3. Системы стандартов

В настоящее время в России созданы следующие системы стандартов:

1. Система государственной стандартизации и нормативно-технических документов.
  2. Единая система конструкторской документации (ЕСКД).
  3. Единая система технологической документации (ЕСТД).
  4. Система показателей качества продукции.
  5. Стандарты на аттестационную продукцию.
  6. Унифицированные системы документации (УДК).
  7. Система информационно-библиографической документации.
  8. Государственная система единства измерений (ГСИ).
  9. Единая система защиты от коррозии и старения материалов (ЕСЗКС).
  10. Стандарты на товары, поставляемые на экспорт.
  11. Прикладная.
  12. Система стандартов безопасности труда (ССБТ).
  13. Микрофильмирование.
  14. Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП).
  15. Разработка и постановка продукции на производство.
  16. Управление техпроцессами и др.
- Например, ГОСТ 12.2.007. ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.

### 3.4. Основные положения ЕСКД

**Виды изделий.** *ЕСКД* – комплекс государственных стандартов, устанавливающих порядок разработки, оформления и обращения КД.

Стандарты ЕСКД распространяются на все виды КД и документацию по хранению, внесению изменений в КД, нормативно-техническую документацию, а также на научно-техническую и учебную литературу, в которой они могут быть применены.

Стандарты в ЕСКД распределяются по классификационным группам, представленным в [табл. 3.4](#).

ГОСТ 2.101 устанавливает виды изделий. *Изделием* называется любой предмет или набор предметов производства, подлежащие изготовлению на производстве.

К *изделиям основного производства* относят изделия, предназначенные для поставки (иначе говоря, для реализации), к *изделиям вспомогательного производства* – изделия, предназначенные только для собственных нужд предприятия-изготовителя.

## Классификационные группы стандартов в ЕСКД

| Шифр группы | Содержание стандартов в группе                                                    | Номера стандартов |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 0           | Общие положения                                                                   | 2.000–2.099       |
| 1           | Основные положения                                                                | 2.101–2.199       |
| 2           | Классификация и обозначение изделий в конструкторской документации                | 2.201–2.999       |
| 3           | Общие правила выполнения чертежей                                                 | 2.301–2.399       |
| 4           | Правила выполнения чертежей изделий машиностроения и приборостроения              | 2.401–2.499       |
| 5           | Правила обращения КД (учет, хранение и т. д.)                                     | 2.501–2.599       |
| 6           | Правила выполнения эксплуатационной и ремонтной документации                      | 2.601–2.699       |
| 7           | Правила выполнения схем и условные графические обозначения, используемые в схемах | 2.701–2.799       |
| 8           | Правила выполнения строительной и судостроительной документации                   | 2.801–2.899       |
| 9           | Прочие стандарты (разные правила оформления КД)                                   | 2.901–2.999       |

Устанавливаются следующие виды изделий:

- детали;
- сборочные единицы;
- комплекты;
- комплексы.

Из указанных только деталь, или неспецифицируемое изделие, не имеет составных частей. Изделия, состоящие из двух или более частей, являются специфицируемыми.

**Комплектность КД.** ГОСТ 2.102 устанавливает виды и комплектность КД на изделия всех отраслей промышленности.

Документы в зависимости от стадии разработки изделия подразделяются на проектные (техническое предложение, эскизный проект, технический проект) и рабочие (рабочая документация).

К конструкторским документам относят графические и текстовые документы, которые в отдельности или совокупности определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки или изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта.

Основные виды конструкторских документов приведены в [табл. 3.5](#).

Классификация конструкторских документов в зависимости от способа их выполнения и характера использования представлена в [табл. 3.6](#).

При определении комплектности КД на изделие различают:

- основной конструкторский документ;
- основной комплект КД;
- полный комплект КД.

Основной конструкторский документ изделия в отдельности или в совокупности с другими записанными в нем конструкторскими документами, полностью и однозначно определяет данное изделие и его состав.

За основной конструкторский документ принимают:

- для детали – чертеж детали;
- для сборочных единиц, комплексов, комплектов – спецификацию.

Таблица 3.5

**Основные виды конструкторских документов**

| Вид документа                  | Содержание документа                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Шифр              |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Чертеж детали                  | Изображение детали и данные для ее изготовления и контроля                                                                                                                                                                                                                                                          |                   |
| Сборочный чертеж               | Изображение изделия и другие данные для его сборки и контроля                                                                                                                                                                                                                                                       | СБ                |
| Чертеж общего вида             | Представление о конструкции изделия, взаимодействии его составных частей и принцип работы                                                                                                                                                                                                                           | ВО                |
| Теоретический чертеж           | Геометрическая форма изделия и координаты расположения его составных частей                                                                                                                                                                                                                                         | ТЧ                |
| Габаритный чертеж              | Контурное (упрощенное) изображение изделия с габаритными, присоединительными и установочными размерами                                                                                                                                                                                                              | ГЧ                |
| Монтажный чертеж               | Контурное (упрощенное) изображение изделия, а также данные для его монтажа                                                                                                                                                                                                                                          | МЧ                |
| Электромонтажный чертеж        | Контурное (упрощенное) изображение изделия, а также данные для его электрического монтажа                                                                                                                                                                                                                           | МЭ                |
| Схема                          | Условное изображение или обозначение составных частей изделия и связей между ними                                                                                                                                                                                                                                   | ГОСТ 2.701, 2.702 |
| Перечень элементов             | Состав сборочной единицы, комплекса или комплекта                                                                                                                                                                                                                                                                   | ПЭ                |
| Техническое задание            | Требования, которым должна отвечать конструкция ЭС в соответствии с определяемыми ее назначением, областью применения, условиями эксплуатации, типом производства, ограничениями, связанными с условиями эксплуатации, обслуживанием, производством ЭС, принципами функционирования, а также сроками проектирования | ТЗ                |
| Пояснительная записка          | Описание устройства и принципа действия разрабатываемого изделия, а также обоснование принятых при его разработке технико-экономических решений                                                                                                                                                                     | ПЗ                |
| Технические условия            | Потребительские (эксплуатационные) показатели изделия и методы контроля его качества                                                                                                                                                                                                                                | ТУ                |
| Программа и методика испытаний | Технические данные, подлежащие проверке при испытании изделия, а также порядок их контроля                                                                                                                                                                                                                          | ПИ                |
| Таблица                        | Совокупность сведений об изделии, представленных в таблице                                                                                                                                                                                                                                                          | Т                 |
| Расчеты                        | Расчет параметров и величин (например, расчет на прочность, расчет размерных цепей, расчет уровня стандартизации и унификации)                                                                                                                                                                                      | РР                |



Таблица 3.6

**Классификация КД в зависимости от способа их выполнения  
и характера использования**

| Наименование документа | Определение                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Оригиналы              | Документы, выполненные на любом материале и предназначенные для изготовления по ним подлинников                                                                                                                                                                                                                         |
| Подлинники             | Документы, оформленные подлинными установленными подписями и выполненные на любом материале, позволяющем многократное воспроизведение с них копий. Допускается в качестве подлинников использовать оригиналы, фотокопии или экземпляры образцов, издаваемых типографским способом, оформленных заверительными подписями |
| Дубликаты              | Копии подлинников, обеспечивающие идентичность воспроизведения подлинника, выполненные на любом материале, позволяющем снимать с них копии                                                                                                                                                                              |
| Копии                  | Документы, выполненные способом, обеспечивающим их идентичность с подлинником (дубликатом), и предназначенные для непосредственного использования при разработке в производстве, эксплуатации и ремонте изделий                                                                                                         |

Изделие, примененное по конструкторским документам, выполненным в соответствии со стандартами ЕСКД, записывают в документах других изделий, в которых оно применено по обозначению своего основного конструкторского документа. Считается, что такое изделие применено по своему основному КД.

Основной комплект КД изделия объединяет КД, относящиеся ко всему изделию. Конструкторские документы составных частей в основной комплект документации изделия не входят.

### Контрольные вопросы

1. Роль стандартизации в процессе проектирования электронных средств.
2. Что такое стандартизация и нормализация в конструировании ЭС?
3. Каковы основные положения ЕСКД?
4. Перечислите основные виды конструкторских документов.
5. Какие конструкторские документы относятся к группе текстовых?
6. Каковы требования к построению текстовых документов?
7. Какие конструкторские документы относятся к группе графических?
8. Назначение электрической функциональной схемы.
9. Назначение электрической структурной схемы.



## 4. КОМПОНОВКА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

[4.1. Задачи компоновки.](#)

[4.2. Общая методология проектирования.](#)

[4.3. Конструктивная иерархия.](#)

[4.4. Методы выполнения компоновочных работ.](#)

[4.5. Выполнение компоновочных работ в зависимости от стадии проектирования.](#)

[4.6. Виды компоновки ЭС.](#)

[4.7. Вопросы эргономики при проектировании ЭС.](#)

[4.8. Сенсорный вход оператора и его параметры.](#)

[4.9. Особенности визуального восприятия информации.](#)

[4.10. Особенности слухового восприятия информации.](#)

[4.11. Характеристика условий работы человека-оператора.](#)

[4.12. Требования к уровню шума и вибрации в помещениях с электронной аппаратурой.](#)

[4.13. Требования к микроклимату в помещениях с электронной аппаратурой.](#)

[4.14. Требования к рабочему месту оператора.](#)

[4.15. Техническая эстетика в проектировании ЭС.](#)

[4.16. Компоновка передних панелей ЭС.](#)

[4.17. Выбор цветофактурных решений.](#)

[4.18. Кодирование визуальной информации.](#)

[4.19. Построение систем кодирования зрительной информации.](#)

[Контрольные вопросы.](#)

Л и т е р а т у р а: [14, 15, 21, 24, 29, 42, 48, 49].

### 4.1. Задачи компоновки

Процесс компоновки ЭС начинается, как правило, с первого этапа конструирования изделия и длится вплоть до выпуска рабочей документации. В общем случае конструирование включает нахождение геометрических связей составных частей изделия, т. е. размещение этих частей на плоскости или в пространстве.

**Компоновка – часть процесса конструирования, при котором определяются конфигурация и габариты изделия в целом и его составных частей, а также взаимное расположение отдельных деталей, узлов и блоков.**

Компоновка ЭС должна отвечать всем требованиям ТЗ.

В зависимости от принятой компоновочной схемы аппаратура может быть выполнена в виде функциональных узлов или в виде моноблока.

*Функциональный узел* – часть сложного изделия, которая выполняет простейшие преобразования и имеет конструктивную и технологическую автономность, но не может быть использована без других функциональных узлов.

*Моноблок* – совокупность нескольких функциональных узлов, установленных на общее основание и соединенных электрически.

Компоновку обычно выделяют в отдельный этап разработки изделия, однако некоторые ее элементы можно увидеть на любом этапе разработки ЭС, в связи с постоянной оптимизацией изделия.

## 4.2. Общая методология проектирования

При проектировании изделий применяется много методов получения решений поставленной задачи, основными из которых являются следующие.

**Инверсия, или «сделай наоборот»,** – метод получения нового решения путем отказа от традиционного решения. Новое решение является обычно диаметрально противоположным известному. В случае если речь идет о составных элементах объекта, то они обычно меняются местами.

*Принципы инверсии:*

- снаружи – внутри;
- вертикально – горизонтально;
- вертикально – вверх дном (вверх ногами);
- с лицевой стороны – с обратной стороны;
- поверхность охватывающая – поверхность охватываемая;
- симметрично – асимметрично;
- ведущее – ведомое;
- жесткое – гибкое;
- растяжение – сжатие и др.

Приведем два примера использования принципа инверсии.

*Снаружи – внутри.* На деках магнитофонов в принципе возможно размещение кассетоприемников двумя вариантами: в центре передней панели (органы управления на периферии) и по ее краям (органы управления в центре). Однако в последнее время практически все ведущие фирмы производители бытовой ЭС остановились на втором варианте, приведенном на [рис. 4.1](#).

*С лицевой стороны – с обратной стороны.* Наглядным примером инверсии с применением рассматриваемого принципа является организация процесса нанесения изображения в матричных и лазерных принтерах. В первом случае она наносится на внешнюю сторону листа ([рис. 4.2, а](#)), а во втором – на внутреннюю ([рис. 4.2, б](#)).



Рис. 4.1. Расположение кассетоприемников на передней панели магнитофона

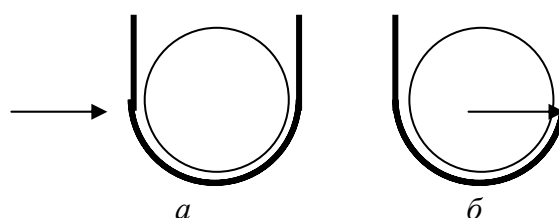


Рис. 4.2. Пример инверсии

**Аналогия, или метод прецедента,** – использование решения из других областей науки и техники. Этот метод применяется при создании конструкций аналогичных ранее разработанным (часто при проектировании бытовой ЭС для расширения номенклатуры изделий с целью продвижения на рынке товаров одной фирмы) и используется в проектировании очень широко, так как применение готовых и отработанных ранее конструктивных решений приводит к существенному сокращению сроков проектирования и освоения нового изделия в производстве.

**Комбинирование** – использование в конструкции в разном порядке и в разных сочетаниях отдельных элементов готовых решений. При этом можно найти новое качество, дополняющий положительный эффект. Например, известны два основных принципа построения бытовых аудиокomплексов: моноблочный (рис. 4.3) и полиблочный. В первом случае реализуется подход «всё в одном флаконе». Такое построение позволяет минимизировать массогабаритные характеристики, уменьшить занимаемую площадь и более рационально решить вопрос о размещении устройства на месте эксплуатации. Во втором случае можно значительно улучшить качественные показатели изделия.



Рис. 4.3. Моноблочное исполнение бытовой ЭС

Еще один пример: разные комбинации в размещении акустических систем позволяют реализовать монофоническое, стереофоническое либо квадрофоническое звучание.

Метод комбинирования может применяться по трем схемам объединения элементов:

- новое + новое;
- новое + старое;
- старое + старое.

Возможность применения метода комбинирования учитывается при создании ПЭВМ. В последнее время вычислительная техника интенсивно

развивается, и пользователь не имеет возможности постоянно работать на полностью новой технике. Поэтому обновление персонального компьютера ведется периодически, путем постепенной замены тех или иных составляющих – процессора, памяти, внешних устройств и т. д.

**Компенсация** – уравнивание (нивелирование, устранение и т. д.) нежелательных и вредных факторов средствами противоположного действия. Например, для компенсации температурного изменения емкости применяют последовательную схему включения конденсаторов с разным температурным коэффициентом емкости (ТКЕ) – положительным и отрицательным, а для компенсации зависимости воспринимаемой человеком громкости от акустического давления при разных уровнях выходной мощности в качестве регуляторов громкости в усилителях звуковой частоты применяют резисторы с нелинейной зависимостью сопротивления от положения регулятора.

**Динамизация** – превращение неподвижных и неизменных по форме элементов конструкции в подвижные и изменяемые. Например, применение индикаторов уровня сигнала в виде светоиндикаторных устройств на лицевых панелях аудиотехники (усилители, магнитофоны и пр.) «оживляет» статичную конструкцию и привлекает внимание. Хотя, если говорить о контроле за уровнем записи или воспроизведения, то для этих целей лучше подходят стрелочные индикаторы. Другой пример: вертикальное расположение регуляторов тембра в многополосных темброблоках позволяет наглядно представить вид заданной амплитудно-частотной характеристики ([рис. 4.4](#)).

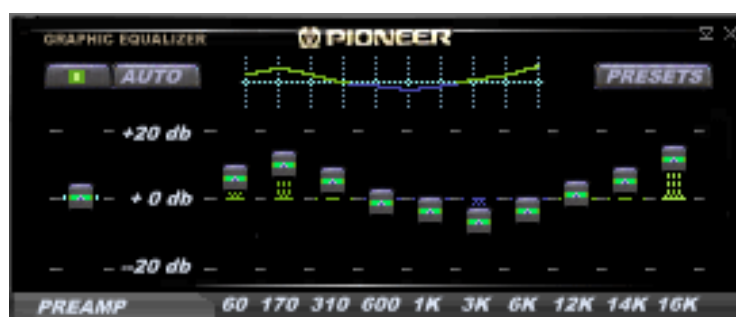


Рис. 4.4. Пример динамизации

**Агрегатирование** – создание комплексов из множества объектов, способных выполнять различные функции либо существовать в различных условиях. Это достигается путем изменения состава объекта или структуры его составных частей.

*Основные способы агрегатирования:*

- *соединение устройств с самостоятельным объектом, представляющим комплекс.* Например, измерительный прибор с разными датчиками может выполнять измерение различных параметров – температуры, давления и т. д.;
- *агрегатирование присоединением:* к базовой составной части могут присоединяться различные зависимые составные части. Например, один

- и тот же системный блок ПЭВМ может использоваться с различными видами мониторов, клавиатур и пр.;

- *агрегатирование без присоединения*: составные части могут выполнять самостоятельные и независимые функции. Например, при формировании рабочего места регулировщика (настройщика) ЭС используются обычно выполняющие самостоятельные функции приборы, такие как источники

- питания, осциллографы, генераторы и пр.;

- *агрегатирование изменением*: в объекте могут применяться всевозможные варианты составных частей при различной компоновке. Например, в корпусе системного блока ПЭВМ могут размещаться считыватели различных носителей информации – магнитной, оптической и т. д.

**Блочно-модульное конструирование** предусматривает создание изделий на основе модулей и блоков. *Модуль* – составная часть изделия, состоящая преимущественно из унифицированных или стандартных элементов

различного функционального назначения. Этот принцип положен в основу создания конструкций кассетного исполнения.

**Резервирование (дублирование)** – увеличение числа элементов для повышения надежности изделия в целом. Существуют различные схемы резервирования ЭС: горячее, холодное и др.

**Метод расчленения** заключается в разделении традиционных технических объектов с целью упрощения выполняемых ими функций и операций.

**Идеализация** – замена реальных объектов нереальными (моделями), с неосуществимыми свойствами, и изучение их как идеальных (точка, линия, абсолютно твердое (черное) тело и др.). Этот метод позволяет значительно упростить сложные системы, обнаружить существенные связи и применить математические методы исследования. Идеализация применяется при построении всех моделирующих САПРов.

### 4.3. Конструктивная иерархия

Все ЭС можно представить как некоторую иерархию ([рис. 4.5](#)).

**Иерархия – расположение составных частей целого в порядке подчинения.**

В радиоаппаратостроении выделение составных частей производится исходя из следующих соображений:

во-первых, каждая структурная единица должна иметь четко выраженные входные и выходные функции (радиотехнические, электротехнические, механические);

во-вторых, должна быть конструктивная законченность, т. е. один конструктивно законченный ФУ может объединять несколько ФУ, выделенных по радиотехническому или электротехническому назначению;

в-третьих, для каждого структурного уровня должна быть технологическая автономия, т. е. независимость изготовления.

Таким образом, разделение ЭС на структурные уровни позволяет:

- организовать производство по независимым циклам для каждого структурного уровня;
- автоматизировать процессы сборки и монтажа;
- сократить период настройки за счет предварительной настройки составляющих конструктивных единиц;
- автоматизировать решение задач размещения элементов и трассировки межсоединений;
- унифицировать стендовую аппаратуру для испытаний конструктивных единиц, повысить надежность.



Рис. 4.5. Пример иерархии ЭС

Одним из направлений в выделении структурных единиц с точки зрения конструктивной обособленности является создание модулей. По конструктивной реализации они делятся на плоские, объемные, герметичные, этажерочные и др.

Применение модульных конструкций позволяет реализовать указанные преимущества иерархии ЭС и, в частности, обладает следующими особенностями:

- получение стандартных, универсальных, проверенных и оптимизированных функциональных блоков;
- обеспечение механизации технологического процесса;
- облегчение обнаружения неисправности (как в аппаратуре в целом, так и непосредственно в модуле);
- минимизация времени восстановления (смена модуля);



- простота введения модификации и улучшения функционирования системы путем замены модулей;
- возможность организации массового производства;
- получение определенной степени унификации (упрощение и быстрота новых разработок);
- упрощение работы с модулями, их монтажа и хранения благодаря типизации их размеров и их небольшому весу;
- гибкость системной разработки в сочетании со стандартизацией, качеством, экономией;
- некоторое уменьшение плотности компоновки;
- сокращение номенклатуры покупных и оригинальных деталей и ЭРЭ.

## **4.4. Методы выполнения компоновочных работ**

Методы выполнения компоновочных работ делятся на две группы: аналитические и модельные. В первую группу входят численные и номографические, во вторую – натурные, аппликационные, модельные, графические и другие, основой которых является та или иная модель.

### **4.4.1. Аналитическая компоновка**

*Аналитическая компоновка* основана на анализе численных значений различных компоновочных характеристик: геометрических размеров элементов, их объемов, масс, потребляемой энергии и т. д.

Имея соответствующие компоновочные характеристики и зная законы их суммирования, можно вычислить компоновочные характеристики изделия и его составных частей. Сложнее при этом вычислить объемы деталей сложной геометрической формы. Обычно их разбивают на ряд простых фигур,

число которых бывает значительным. Поэтому при аналитической компоновке число замещающих фигур стремятся свести к минимуму, а размеры их взять такими, чтобы сразу можно было получить значение установочного объема и подобных ему параметров.

Процессы преобразования сигналов в ЭС выполняются с помощью так называемых активных материалов, но они, в свою очередь, требуют обязательного использования вспомогательных и конструктивных материалов. Сумма объемов этих материалов и определяет физический объем ЭРЭ, который можно выразить как

$$V_{\text{физ}} = V_{\text{акт}} + V_{\text{всп}} + V_{\text{констр}}, \quad (4.1)$$

где  $V_{\text{акт}}$  – объем, занимаемый активными материалами, без которых принципиально невозможно выполнение того или иного процесса, обеспечивающего нормальное функционирование изделия (кристалл);  $V_{\text{всп}}$  – объем, занимаемый вспомогательными материалами, обеспечивающими активным материалам выполнение того или иного физического процесса (изоляция, покрытия, монтажные провода и т. д.);  $V_{\text{констр}}$  – объем, занимаемый конструктивными материалами, обеспечивающими неизменность положения в пространстве активных и вспомогательных материалов для выполнения ими физических функций, а также дополнительную защиту от внешних воздействий (шасси, корпуса и т. д.).

Под  $V_{\text{физ}}$  (рис. 4.6) понимается объем жидкости, вытесненный при погружении в нее ЭРЭ или других изделий.

Расчетным параметром при аналитической компоновке ЭС является не физический объем ( $V_{\text{физ}}$ ), а установочный –  $V_{\text{уст}}$  (рис. 4.7):

$$V_{\text{уст}} = V_{\text{физ}} + V_{\text{монт}} + V_{\text{доп}}, \quad (4.2)$$

где  $V_{\text{монт}}$  – объем, необходимый для монтажа ЭРЭ в изделии;  $V_{\text{доп}}$  – дополнительный объем, получающийся после монтажа ЭРЭ, в котором другие ЭРЭ не устанавливаются.

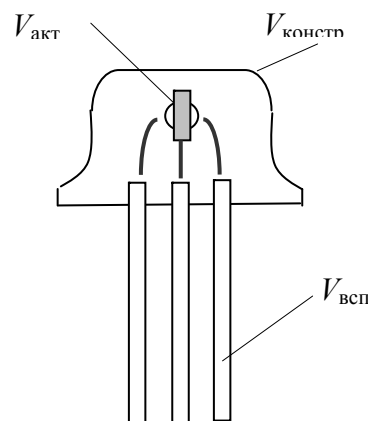


Рис. 4.6. Состав физического объема ( $V_{\text{физ}}$ )



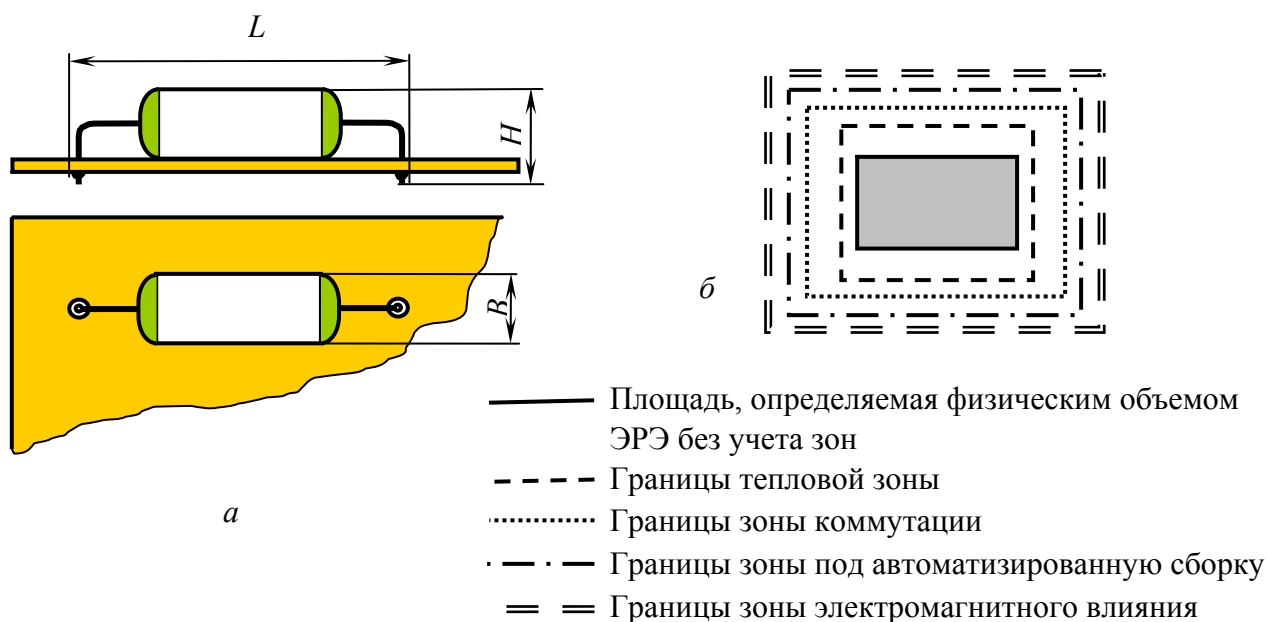


Рис. 4.7. Установочный объем (а) и возможные зоны (б), учитываемые в процессе определения установочных площадей (границы зон показаны условно)

В первом приближении можно принять, что установочный объем определяется только длиной  $L$ , шириной  $B$  и высотой  $H$  (рис. 4.7, а), которые обусловлены в рассматриваемом случае вариантом установки ЭРЭ на печатную плату:

$$V_{\text{уст}} = BLH. \quad (4.3)$$

Однако, как видно из рис. 4.7, б, дополнительный объем может определяться достаточно большим количеством факторов. В случае когда известны только габаритные размеры ЭРЭ, приближенно оценить установочный объем и установочную площадь  $S_{\text{уст}}$  можно по следующим выражениям:

$$V_{\text{уст}} = 1,5BLH; \quad (4.4)$$

$$S_{\text{уст}} = 1,3BL. \quad (4.5)$$

Основой аналитической компоновки является выражение вида

$$K_{\text{п}} = K_{\text{ув}} \sum_{i=1}^n N_i = \left( \frac{1}{K_{\text{зап}}} \right) \sum_{i=1}^n N_i, \quad (4.6)$$

где  $K_{\text{п}}$  – компоновочный параметр (вес, объем, площадь);  $K_{\text{ув}}$  – коэффициент увеличения;  $n$  – число составляющих компоновочных параметров;  $N_i$  – элементарный (единичный) компоновочный параметр  $i$ -го элемента;  $K_{\text{зап}}$  – коэффициент заполнения.

Для объема  $V$ , массы  $G$  и потребляемой мощности  $P$  исходные выражения имеют вид

$$V = \left( \frac{1}{K_{\text{зап}}} \right) \left( \sum_{i=1}^n V_{Ai} + \sum_{i=1}^n V_{Bi} \right) = \left( \frac{1}{K_{\text{зап}}} \right) V_{\text{уст}}, \quad (4.7)$$

$$G = G'V, \quad (4.8)$$

$$P = \left( \frac{1}{K_{\text{п.п.}}} \right) \left( \sum P_{Ni} \right), \quad (4.9)$$

где  $V_{Ai}$ ,  $V_{Bi}$  – установочные объемы единичных элементов;  $G$  – масса изделия;  $G'$  – объемная масса изделия;  $P$  – потребляемая мощность изделия;  $K_{\text{п.п.}}$  – коэффициент потерь мощности при питании;  $P_{Ni}$  – рассеиваемая мощность  $i$ -го элемента.

Таблица 4.1

**Значения объемной массы и коэффициента заполнения  
ЭС различного назначения**

| Аппаратура                   | $G'$ (кг/дм <sup>3</sup> ) | $K_{\text{зап}}$ |
|------------------------------|----------------------------|------------------|
| Передающая:                  |                            |                  |
| с естественным охлаждением   | 0,55                       | 0,11             |
| с принудительным охлаждением | 0,6                        | 0,27             |
| для бортовой аппаратуры      | 0,9                        | 0,59             |
| Приемная:                    |                            |                  |
| с естественным охлаждением   | 0,45                       | 0,18             |
| с принудительным охлаждением | 0,7                        | 0,63             |
| для бортовой аппаратуры      | 0,9                        | 0,68             |
| Релейная:                    |                            |                  |
| с естественным охлаждением   | 0,65                       | 0,13             |
| с принудительным охлаждением | 0,8                        | 0,32             |
| для бортовой аппаратуры      | 1,1                        | 0,94             |
| Питания:                     |                            |                  |
| с естественным охлаждением   | 0,55                       | 0,28             |
| с принудительным охлаждением | 0,6                        | 0,44             |
| для бортовой аппаратуры      | 0,9                        | До 0,95          |

Обобщенные значения объемной массы изделия  $G'$  и коэффициента заполнения  $K_{\text{зап}}$  в зависимости от типа аппаратуры приведены в [табл. 4.1](#).

Аналитическая компоновка выполняется по перечням элементов, однако она не обладает наглядностью и не позволяет построить пространственный компоновочный эскиз.

Хорошие результаты аналитическая компоновка дает при расчете печатных плат, схемы которых построены с использованием микросхем в одинаковых корпусах.

#### 4.4.2. Модельная компоновка

Модельная компоновка осуществляется с использованием объемных и плоских моделей ЭРЭ. В первом случае мы имеем дело с объемной модельной компоновкой, во втором – с аппликационной компоновкой.

*Объемная модельная компоновка* дает более наглядное представление об изделии, но требует более сложных составных частей. При этом часто используют различные упрощения формы реальных изделий, причем не только составляющих изделие элементов, но и шасси, корпуса и т. д. Объемные модели изготавливают из любых легкообрабатываемых материалов (картон, пенопласт и др.). Когда вместо объемных моделей используются непосредственные детали, говорят о *натурной компоновке*.

*Аппликации* – плоские модели ЭРЭ из бумаги, картона, кальки, стали.

С широким внедрением ЭВМ модельная компоновка (как плоская, так и объемная) стала возможна на вычислительных машинах. Однако в ряде случаев натурная компоновка необходима (исследование аэродинамических процессов, тепловых напряженностей и т. д.).

Для оценки теплового режима может быть использована также *изотермическая компоновка*. Для этих целей применяется полимерная пленка, изменяющая свой цвет в зависимости от изменения температуры. Интервал рабочих температур – от минус 20 до 150 °С. Разрешающая способность по температуре – доли градуса.

#### 4.4.3. Графическая компоновка

Графическая компоновка является основным способом детальной проработки вариантов размещения элементов конструкции, получения документации. Это самый трудоемкий метод компоновки.

Обычно графическая компоновка начинается с размещения органов управления и контроля на передней (задней) панели изделия самого высокого структурного уровня (прибора, блока, пульта, стойки и т. д.), исходя из требований эргономики и технической эстетики. Затем переходят к компоновке более низких структурных уровней.

### 4.5. Выполнение компоновочных работ в зависимости от стадии проектирования

На подготовительном этапе проектирования, когда проводится определение укрупненных компоновочных характеристик изделия в целом, используются аналитическими методами компоновки.

На стадии эскизного проектирования выполняется наибольшее число компоновочных работ и используются все методы компоновки. На этом этапе определяются компоновочные характеристики отдельных ФУ и каскадов ЭС, выполняются эскизы органов управления и контроля. Результатом этой стадии проектирования является составление общей компоновочной схемы изделия с разбивкой ее на отдельные конструктивно законченные части:

компоновка рабочего места оператора, компоновочный эскиз расположения изделия на объекте установки.

На стадии технического проектирования выполняются компоновочные работы для всех ФУ и блоков. Основные методы компоновки – модельный и графический.

#### 4.6. Виды компоновки ЭС

Современные ЭС различаются по уровню сложности и, следовательно, габаритам и весу. В зависимости от назначения и объекта установки габариты и вес ЭС регламентируются соответствующими ГОСТами, исходя из удобства транспортирования и размещения изделия.

Если аппаратура состоит из нескольких конструктивно законченных изделий, то возможны два вида компоновочных схем. При *централизованной компоновке* все оперативные органы управления настройки и индикации размещают в блоке управления. При необходимости блоки управления всех или части устройств komponуют в пульт управления, обслуживаемый оператором. При *децентрализованной компоновке* каждый прибор, блок, пульт имеют свои органы управления, настройки и контроля. Однако в сложных системах чаще применяется совмещение обоих видов компоновочных схем.

#### 4.7. Вопросы эргономики при проектировании ЭС

Из сказанного ранее следует, что компоновка аппаратуры должна проводиться исходя из двух независимых посылов.

Первый посыл: размещение блоков в стойке, функциональных узлов в блоке, компонентов в функциональных узлах должно обеспечивать надежное функционирование изделия. В качестве примера рассмотрим, где должен быть установлен блок питания в стойке. Здесь возможны два основных варианта: блок питания расположен внизу ([рис. 4.8, а](#)) или вверху ([рис. 4.8, б](#)) стойки.

Исходя из того, что блок питания является, как правило, одним из наиболее тепловыделяющих блоков, его размещение вверху стойки наиболее оправдано: проще обеспечить нормальный тепловой режим компонентов, рас-

положенных в других блоках. Тем не менее в аппаратуре первых поколений ЭС блок питания размещался внизу. Это связано с использованием преобразования по низкой частоте (50 или 400 Гц). Соответственно массогабаритные характеристики трансформаторов, выпрямляющих элементов и сглаживающих фильтров были достаточно большие, и размещение блоков питания вверху смещало вверх и центр тяжести, что приводило к неустойчивости стойки.

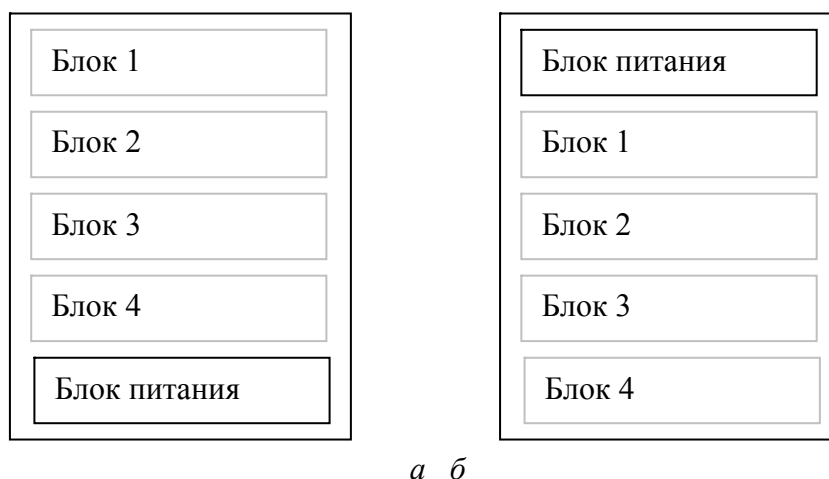


Рис. 4.8. Компоновочные схемы стойки

Применение преобразования по высокой частоте (десятки килогерц) в современных изделиях, например в телекоммуникационных стойках, позволило поместить блок питания вверху без ухудшения устойчивости стойки на месте эксплуатации.

Другим посылом при компоновке является адаптация изделия к возможностям человека.

Дальнейшее совершенствование и усложнение ЭС вступает в противоречие с возможностями человека, который ею управляет. Современная радиотехническая аппаратура предъявляет повышенные требования к человеку-оператору, в том числе к его оперативно-технической, познавательной, эмоциональной деятельности, к его возможностям и способностям. Не менее важно и то, что человек со своей стороны предъявляет более высокие требования к технике. Для выполнения этих требований необходим поиск таких конструктивных решений ЭС, когда не человек приспосабливается к технике в силу своих субъективных умений, а новая техника создается в соответствии с возможностями человека-оператора, активно формируя его способности.

Качественные различия между человеком и техникой не исключают возможности рассматривать их в определенном отношении как звенья единой системы «человек – техника» (ЧТС), в которой ведущая роль отводится человеку. При этом установлены противоречивые особенности оператора как звена системы ЧТС. С одной стороны, человек обладает огромными резервами памяти, логическим и образным мышлением, способностью к быстрой адаптации и обработке большого объема информации. С другой стороны, он представляет собой медленно действующее, эмоциональное, подверженное

утомлению и недостаточно надежное в силу своей субъективности звено, критичное в отношении параметров окружающей среды: температуры, давления, влажности, механических, акустических и других воздействий.

Деятельность оператора в системе ЧТС включает несколько этапов: восприятие информации, ее осмысление, хранение, принятие решения, выполнение управляющего действия и контроль результатов.

Восприятие информации происходит путем воздействия сигнала на *анализаторы* – нервные окончания, связанные с органами чувств человека. При работе человека с техникой задействованы зрительные, слуховые и тактильные (осязательные) анализаторы.

*Эргономика* (греч. *ergon* – работа, *nomos* – закон) – наука о взаимодействии человека-оператора с машиной и средой, объединенных в единую человекомашинную (эргатическую) систему (ЧМС). Убедительным примером необходимости развития этой науки в области радиотехники и конструирования ЭС является сравнительный анализ надежности существующих американских ракетных систем, который показал, что ошибки человека-оператора составляют 20–53 % всех отказов в системе.

При проектировании эргономичной ЭС необходимо учитывать физиологические, психофизиологические и психологические требования.

*Физиологические требования* определяют соответствие изделия физиологическим свойствам человека, например углу оптимального или максимального поворота глаз, головы и др.

*Психофизиологические требования* – соответствие особенностям функционирования органов чувств человека (порог цветового или углового восприятия зрением, скорость восприятия информации и т. п.).

*Психологические требования* – соответствие изделия психологическим особенностям человека: особенностям восприятия, мышления, ассоциации цветоощущения и т. д.

Кроме того, эффективность работы пользователя ЭС (оператора и др.) зависит от факторов, определяющих время получения информации и время ее оценки и переработки.

*Факторы, определяющие время получения информации:* тип индикации; виды и число индикаторов; читаемость букв, цифр, знаков; световые характеристики – освещенность, яркость, цветовой тон и цветовая контрастность.

*Факторы, определяющие время оценки и переработки информации:* способ кодирования; степень сложности информационной модели; объем информации и динамика смены информации.

Прежде чем подробно остановиться на параметрах оператора и технических средств в их согласовании, отметим некоторые общие правила разработки ЧМС.

1. Необходимо применять *системный подход*, а именно:

- а) выяснять взаимосвязи и свойства совокупности объектов, входящих в систему, в том числе оператора;

б) создавать и применять такие системы, которые давали бы компромиссы между «железом» – оператором – средой для оптимизации основной целевой функции всей системы (получить оптимальную систему для всех оптимальных звеньев невозможно).

2. Несмотря на совместное выполнение функций оператором и «машинной», каждая из этих составляющих ЧМС подчиняется в своей работе собственным, свойственным ей принципам и закономерностям.

3. Необходимо помнить, что оператор «не любит крайностей»: ему плохо работается как при дефиците, так и при избытке времени (при предъявлении информации), как при ярком освещении, так и в темноте и т. д.

4. Система должна быть сконструирована так, чтобы оператор мог непрерывно принимать участие в ее функционировании на уровне, соответствующем возможностям пользователя (низкий уровень интереса к работе и неудовлетворенное моральное состояние оператора могут быть связаны с двумя обстоятельствами: оператор имеет низкую квалификацию, а управление аппаратурой требует высокой квалификации и, наоборот, требуется низкая квалификация от высококвалифицированного оператора).

5. Максимальная автоматизация процессов не всегда полезна: думающий оператор занимает центральное место в системе «человек – машина», поэтому задача состоит не в том, чтобы показать высокую автоматизацию системы, а в том, чтобы доказать необходимость автоматизации. Машина служит не для вытеснения и замены оператора, а для умножения его способностей.

## 4.8. Сенсорный вход оператора и его параметры

Человек воспринимает поступающую из окружающей среды информацию с помощью органов зрения, слуха, осязания, вкуса, обоняния, болевых ощущений, время реакции которых отражено в [табл. 4.2](#).

Таблица 4.2

### Способы получения информации человеком

| Способ получения информации                  | Время реакции, мс |
|----------------------------------------------|-------------------|
| Тактильный (прикосновение)                   | 105 ±10 %         |
| Слуховой (звук)                              | 150 ±20 %         |
| Зрительный (свет)                            | 185 ±19 %         |
| Обонятельный (запах)                         | 350 ±11,4 %       |
| Температурный (тепло – холод)                | 940 ±70 %         |
| Вкусовой (кислое, сладкое, горькое)          | 695 ±55 %         |
| Движение (действие на вестибулярный аппарат) | 600 ±33 %         |
| Болевой                                      | 510 ±75 %         |

Каждый из этих органов имеет свой *порог чувствительности, пропускную способность, область применения* в ЧТС. Различают *сенсорный вход* человека-оператора (зрение, слух, осязание, обоняние и т. п.) и *моторный выход* – рабочие движения рук, ног, туловища, характеризующие пространство, временные и силовые показатели.

Отметим некоторые общие свойства сенсорного входа человека-оператора.

*Первое свойство.* Человек не может решать простую задачу на различение одиночных моносигналов, если их число превышает 7 («магическое» число  $7 \pm 2$ ).

В одном из опытов испытуемым предлагали различить тоны по частоте в диапазоне от 100 Гц до 8 кГц. Ошибок не было при двух-трех тонах, предъявляемых отдельно. При четырех тонах начали появляться ошибки. При пяти тонах число ошибок возросло, а при 9 тонах была сплошная путаница. Аналогичные результаты дали опыты со зрением, с кожной и вкусовой чувствительностью.

*Второе свойство.* При усложнении информации (увеличение числа признаков сигналов, например оттенка и насыщенности цветовых тонов раздражителей) количество воспринимаемой информации увеличивается (с 7 до 11–15 цветов).

*Третье свойство.* Наибольшей пропускной способностью информации обладает зрительный аппарат (5 бит/с), затем слуховой, которые чаще задействуются в ЧТС.

*Четвертое свойство.* Перекодирование информации резко снижает пропускную способность сенсорного входа оператора.

*Пятое свойство.* Перегрузка информацией и дефицит времени снижают пропускную способность оператора. В одном из американских исследований изучали работу операторов в кабине космического тренажера. Испытуемым подавали световые сигналы, на которые они должны были отвечать определенным образом. Если сигналы подавались один раз за 9–10 с, то операторы работали нормально. Когда же темп подачи информации возрос в 10 раз (количество сигналов в секунду), то наблюдалась перегрузка информацией (пропуск информации и неверные ответы). Интересно отметить, что когда темп подачи сигналов уменьшился в 10 раз по сравнению с нормальным, то пропуски информации и ошибки вновь участились. Отсюда следует, что наибольшая чувствительность и пропускная способность сенсорного входа человека зависят от частоты предъявления информации.

Основным источником получения информации в системе «оператор – ЭС» является зрительный аппарат оператора, свойства которого рассмотрим более подробно.



## 4.9. Особенности визуального восприятия информации

Основным органом чувств человека, позволяющим воспринимать информацию о форме, цвете, яркости и движению с пульта управления, передней панели прибора, тары, упаковки и др., является зрение. Глаз человека обладает рядом свойств, которые необходимо учитывать при конструировании средств отображения информации.

Основные характеристики зрительного анализатора пользователя ЭС приведены на [рис. 4.9](#).



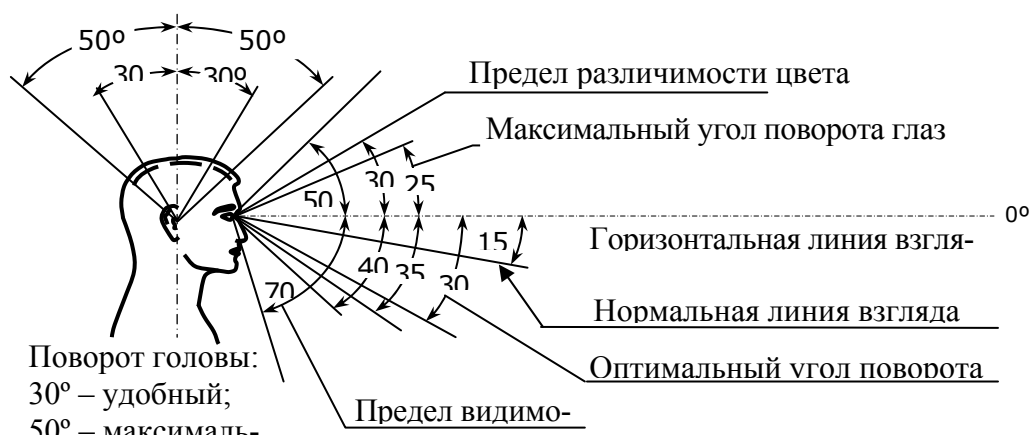
Рис. 4.9. Характеристики зрительного анализатора

#### 4.9.1. Пространственные характеристики зрительного анализатора

Поле зрения характеризуется углами обзора в вертикальной и горизонтальной плоскостях при неподвижном положении головы (рис. 4.10). Очевидно, что при поворотах и наклоне головы углы обзоров значительно увеличиваются. С учетом бокового зрения поле последнего также увеличивается.



*a*



*b*

Рис. 4.10. Поле зрения: *a* – в вертикальной плоскости;  
*b* – в горизонтальной плоскости

Исходя из параметров поля зрения человека, представленных на рис. 4.10, разработаны эргономические требования по формированию зон обзора оператора (ГОСТ 12.2.032). Рекомендуемые зоны обзора приведены на рис. 4.11. Указанные зоны обзора оптимальны для прямого зрения. Следует отметить, что перемещения лучше воспринимаются боковым зрением.

В зонах  $\pm 15^\circ$  от сагиттальной плоскости и нормальной линии взгляда размещаются индикаторы и другие визуальные объекты, требующие быстрого и безошибочного считывания информации.

В зонах до  $\pm 30^\circ$  от сагиттальной плоскости и нормальной линии взгляда размещаются индикаторы и другие визуальные объекты, требующие менее быстрого считывания информации. В этих зонах требуется движение глаз.

В зонах до  $\pm 60^\circ$  от сагиттальной плоскости и нормальной линии взгляда размещаются индикаторы и другие визуальные объекты, не требующие быстрого считывания информации. В этих зонах требуется движение глаз и головы.

*Острота зрения*, или *разрешающая способность*, – свойство глаза обнаруживать малые объекты и различать тонкие детали. Она меняется в зависимости от вида объекта, спектрального распределения энергии излучения освещенности фона, контраста между объектом и фоном и скорости движения объекта.

С увеличением освещенности уменьшается время инерции глаза и снижается порог контрастной чувствительности. При этом острота зрения увеличивается. Глаза характеризуют *порогом разрешения* – минимальным угловым промежутком между равноудаленными точками, при котором они воспринимаются глазом раздельно. Предельный угол разрешения  $L'$  имеет порядок несколько десятых угловой минуты. Связь между ним и порогом контрастной чувствительности глаза  $K_0$  определяется по формуле  $L' = CK_0$ , где  $C$  – постоянная, не зависящая от яркости поля адаптации. Таким образом, острота зрения является функцией контрастной чувствительности глаза.

Острота зрения тесно связана с *аккомодацией* (скорость фиксации в поле зрения) – процессом фокусирования хрусталика глаза на объекте. Минимальное расстояние для аккомодации зависит от возраста человека ([табл. 4.3](#)). Если объект расположен далее 6 м, то он находится в оптической бесконечности и аккомодация не требуется.

*Объемное восприятие*, или *стереоскопичность*, – возможность восприятия двух различных изображений, которые определены одним световым раздражителем. Стереоскопичность имеет *порог глубины* 5 угл. с.

Стереоскопичность связана с *конвергенцией* – нацеливанием чувствительности глаза на одну точку при совместном действии глазных мышц и хрусталика. Среднее время, необходимое для нацеливания и фокусировки глаз на новую точку, составляет примерно 165 мс.

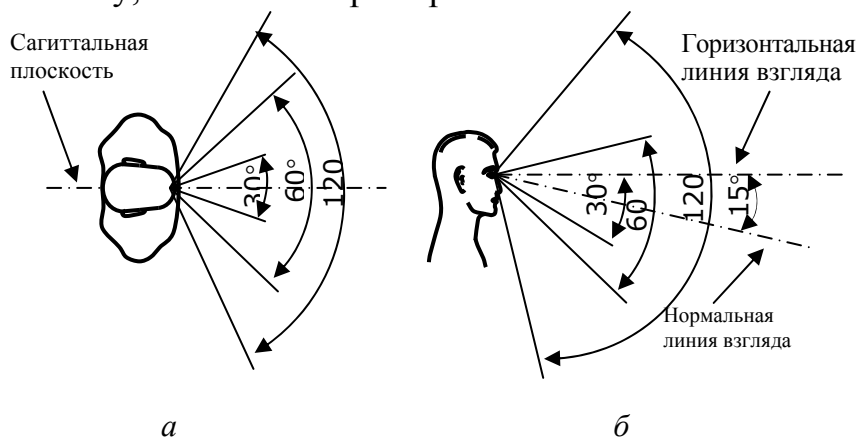


Рис. 4.11. Рекомендуемые зоны обзора: *а* – в горизонтальной плоскости; *б* – в вертикальной плоскости

Таблица 4.3

**Зависимость расстояния для аккомодации от возраста человека**

| Возраст, лет | Расстояние, мм |
|--------------|----------------|
| 5–6          | 60             |
| 20           | 100            |
| 40           | 220            |
| 60           | 1000           |

Возможность объемного восприятия объектов учитывается при разработке объемной маркировки и размещении индикаторов со стрелочными указателями, для обеспечения считывания показаний с последних с минимальным параллаксом.

**4.9.2. Энергетические характеристики зрительного анализатора**

**Диапазон воспринимаемых яркостей.** Благодаря адаптации человек воспринимает огромный диапазон яркостей – от  $10^{-6}$  до  $10^6$  кд/м<sup>2</sup>, т. е. 12 порядков. При яркости  $10^{12}$  кд/м<sup>2</sup> наступает ослепление. В пределах поля зрения оператора перепады яркости не должны быть более 1:30.

Оптимальная яркость фона, обеспечивающая наибольшую разрешающую способность зрения, составляет  $10^4$  кд/м<sup>2</sup>.

Надо также иметь в виду, что как при значительном увеличении яркости, так и при значительном ее уменьшении число различимых цветовых тонов уменьшается.

Яркость фона (или объекта)  $B$ , кд/м<sup>2</sup>, зависит от освещенности и коэффициента отражения поверхности:

$$B = \frac{\rho E}{\pi}, \quad (4.10)$$

где  $p$  – коэффициент отражения поверхности;  $E$  – освещенность, лк.

Каждый цвет имеет свой коэффициент отражения (табл. 4.4).

Чувствительность глаза в первую очередь зависит от уровня освещенности и яркости. Различают абсолютный и дифференциальный (контрастный) пороги чувствительности глаза.

*Абсолютным порогом световой чувствительности глаза* называют минимально обнаруживаемую величину яркости светового пятна на черном фоне при отсутствии какого-либо освещения. Он лежит в диапазоне  $10^{-6}$ – $10^{-9}$  кд/м<sup>2</sup>. Это означает, что световые ощущения в условиях абсолютной темноты могут быть вызваны лучистой энергией всего в несколько квантов.

Таблица 4.4

**Зависимость коэффициента отражения от цвета поверхности**

| Цвет поверхности | Коэффициент отражения | Цвет поверхности | Коэффициент отражения |
|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Белый            | 0,85                  | Синий:           |                       |
| Желтый:          |                       | светлый          | 0,55                  |
| светлый          | 0,75                  | средний          | 0,35                  |
| средний          | 0,65                  | темный           | 0,13                  |
| Серый:           |                       | Красный темный   | 0,15                  |
| светлый          | 0,75                  | Коричневый       | 0,10                  |
| средний          | 0,55                  | Черный           | 0,07                  |
| темный           | 0,30                  |                  |                       |
| Зеленый:         |                       |                  |                       |
| светлый          | 0,65                  |                  |                       |
| средний          | 0,52                  |                  |                       |
| темный           | 0,12                  |                  |                       |

**Чувствительность к изменению цветового тона.** В 1924 г. Международная комиссия по освещению установила стандартную функцию относительной видности, которая является спектральной чувствительностью зрения стандартного наблюдателя и представляет собой зависимость воспринимаемой яркости от длины волны при постоянной мощности излучения монохроматического источника света (рис. 4.12).

Из рис. 4.12 видно, что ощущаемая яркость в дневном освещении достигает максимума при  $\lambda = 550$  нм (зеленый цвет). При длинах волн 510 и 610 нм относительная спектральная световая эффективность равна 0,5. При 472 нм (синий) и 650 нм (красный) чувствительность нормального человеческого глаза к яркости составляет около 0,1 его чувствительности к излучению при 550 нм.

Наиболее заметны различия цветового тона в диапазоне волн 480–640 нм (от голубых до красных цветов), особенно на волнах 500 и 600 нм (голубовато-зеленый и оранжевый цвета), на которых глаз различает изменения преобладающей длины волны приблизительно на 1 нм. В нормальных условиях зрения может различать 150 спектральных и 30 высоконасыщенных пурпур-

ных цветов (к спектральным относятся цвета, присутствующие в солнечном излучении или в излучениях других источников – лампы накаливания, дневного света и т. д.).

**Чувствительность к изменению насыщенности.** Чувствительность зрения к изменениям чистоты цвета больше для сильнонасыщенных и мало-насыщенных цветов. При средней насыщенности цветов зрение малочувствительно к ее изменениям. Чувствительность к изменениям насыщенности желтого цвета является наименьшей, для синего и красного – наибольшей. Обнаружено, что если, не изменяя чистоты цвета, изменить его цветовой тон, то чистота цвета может казаться различной. А если при неизменной преобладающей длине волны изменить чистоту цвета, то цветовой тон может казаться изменяющимся.

**Чувствительность к изменению яркости.** При достаточно большой яркости светового потока (не менее  $1 \text{ кд/м}^2$ ) максимальная чувствительность глаза на длине волны 550 нм. Мощность монохроматического излучения, умноженная на длину волны, дает световую мощность этого излучения. При уменьшении мощности излучения максимум чувствительности глаза сдвигается в сторону более коротких световых волн. При ослаблении яркости различаются только красные, зеленые и фиолетовые цвета, а оранжевые, желтые и голубые воспринимаются красными, зелеными и синими соответственно (эффект Безольда – Брюкке).

При малой яркости светового потока, менее  $1 \text{ кд/м}^2$ , максимальная чувствительность на волне 510 нм и глаз не различает цвета, зрение становится ахроматическим (бесцветным).

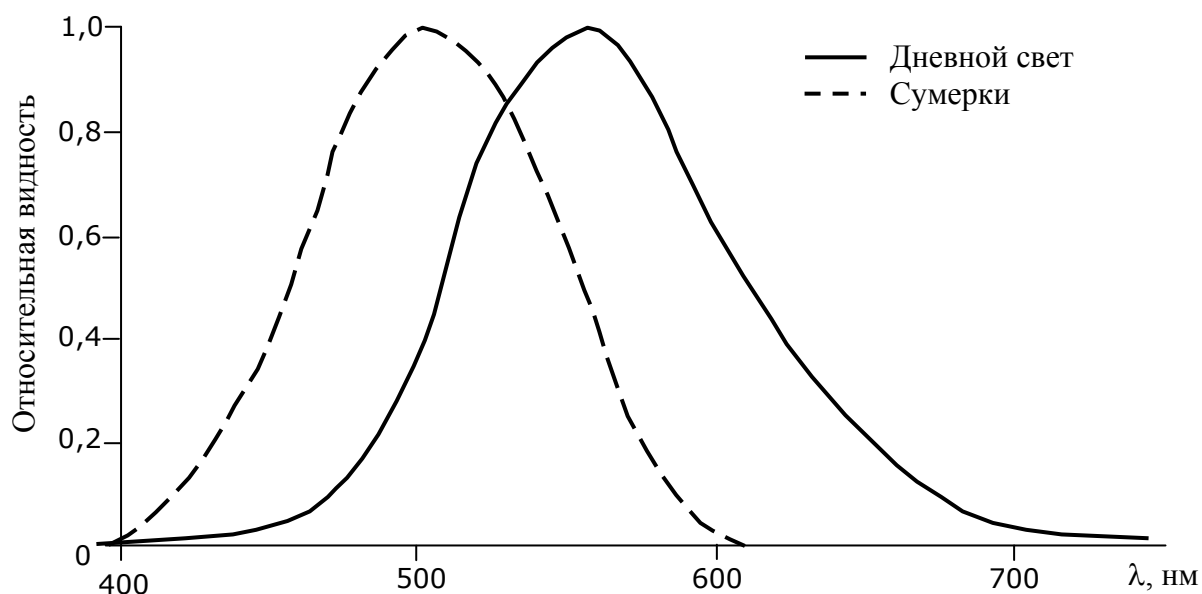


Рис. 4.12. Зависимость ощущаемой яркости монохроматического излучения от длины волны

Цветовое восприятие глаза заключается в его способности различать цвета по цветовому фону, насыщенности и контрастности. На деятельность оператора влияние цвета велико. Наиболее часто он используется как один из способов кодирования информации (цветокодовая маркировка) и для эстетического оформления рабочей зоны, включая композиционное формирование передних панелей приборов и пультов.

Процесс восприятия цвета глазом называется *цветовым (хроматическим) зрением*. Известно, что глаз человека имеет два вида световоспринимающих клеток, называемых *колбочками* и *палочками*, расположенных на сетчатке и являющихся окончаниями нервных волокон. Колбочки создают ощущение яркости и цвета светового потока, а палочки реагируют только на его яркость и позволяют человеку видеть слабоосвещенные предметы. Соответственно, восприятие цвета зависит от освещенности изделия, его размеров и т. д.

Глаз человека воспринимает электромагнитные колебания от любого источника в диапазоне длин волн 380–780 нм, называемом *видимым спектром*, и создающем в зрительном аппарате человека ощущение света. В зависимости от длины волны монохроматические световые потоки человек воспринимает как различные цветовые пятна ([табл. 4.5](#)). Существует семь основных участков (цветов) видимого спектра. Эти цвета, называемые *спектральными*, входят в состав солнечного света.

Таблица 4.5

**Спектральный состав видимого света**

| Длина волны, нм | Цвет      | Длина волны, нм | Цвет       |
|-----------------|-----------|-----------------|------------|
| 780–605         | Красный   | 500–470         | Голубой    |
| 605–590         | Оранжевый | 470–430         | Синий      |
| 590–560         | Желтый    | 430–380         | Фиолетовый |
| 560–500         | Зеленый   |                 |            |

Цветовые ощущения, которые возникают в зрительном аппарате человека, определяются психофизическими и психологическими факторами, т. е. зависят от спектрального состава излучения, воспринимаемого глазом, и свойства зрения. Кроме того, при наблюдении не самосветящихся тел, а отражающих или пропускающих свет спектральный состав света определяется спектральными свойствами как этих тел, так и освещающего их светового потока. Например, при освещении предмета поочередно источниками света с различными спектрами излучаемой энергии (лампой накаливания, лампой дневного света и т. д.) цветопередача одной и той же поверхности может меняться [5].

Поскольку зрительный аппарат человека обладает интегральной чувствительностью, т. е. реагирует на сумму всех составляющих видимого спектра, то ощущение одинакового света могут создаваться при различных спек-

тральных составах света, воздействующего на глаз. Это явление называется *метаморизмом*, а два световых потока с различными по составу спектрами, создающих у наблюдателя ощущение одинакового света, называют *метаморической парой*.

Каждому цвету соответствует *дополнительный* к нему *цвет*, обладающий следующим свойством: при смешении (сложении) в определенных пропорциях спектров основного и дополнительного цветов у наблюдателя создается ощущение белого цвета. Например: для желтого цвета дополнительным является синий, для оранжевого – голубой, для зеленого – пурпурный и т. д. Сочетания дополнительных цветов между собой в одной композиции являются наиболее сложными и негармоничными для восприятия наблюдателя, поэтому должны использоваться редко и осторожно.

**Психологические и психофизические характеристики цвета.** Многочисленными исследованиями установлено, что воспринимаемые цвета имеют до пяти различных свойств. Обычно достаточно характеризовать свет тремя параметрами (это верно, по крайней мере, для психофизического и изолированного психологического цветов). Существует две системы таких параметров, различающихся выбором вида характеристик – психологических (субъективных) или психофизических (объективных).

*Психологические характеристики цвета* оцениваются наблюдателем по зрительному ощущению светового потока, воспринимаемого глазом: это наблюдаемые яркость, цветовой тон и насыщенность цвета. Они зависят от условий наблюдения и состояния наблюдателя.

Наблюдаемая (ощущаемая, кажущаяся, воспринимаемая) *яркость цвета* есть оценка ощущения наблюдателя интенсивности (мощности) свечения цветной поверхности (светового излучения). Эта характеристика оценивается такими определениями, как слепящий, очень яркий, яркий, светлый, темный. Возможно применение также понятия *светлота цветового тона* – это относительная оценка ощущения яркости цвета, определяемая визуальным (зрительным) сравнением в одних условиях яркости данного цвета с яркостью другого (светлее, темнее) или с яркостью белой поверхности.

Под *цветовым тоном (оттенком)* понимают свойство цвета, позволяющее наблюдателю оценить цвет как красный, желтый, зеленый, голубой, синий и т. д. Это главная характеристика цвета, благодаря которой цвета получили свои названия. Человек различает около 120–200 основных цветовых тонов.

*Насыщенность цвета* отражает степень «его свободы» от примеси белого цвета. Визуально оценивая насыщенность, мы оцениваем долю спектрального (монохроматического) цвета, который в смеси с белым образует данный цвет. Точнее говоря, насыщенность – это число порогов, т. е. едва заметных переходов, отделяющих данный цвет от белого равной с ним яркости. Число таких порогов может быть 150–200. Спектральные цвета имеют максимальную насыщенность, а насыщенность белого равна нулю.



Цветовой тон, светлота, насыщенность определенным образом взаимосвязаны. Например, цветовой тон незначительно меняется при изменении светлоты и насыщенности. При большой яркости все спектральные цвета сдвигаются в сторону синих или желтых цветов, а при малой яркости – в сторону красных или зеленых. Если учитывать различие цветов по яркости, цветовому тону и насыщенности, то человек различает около 10 млн. цветов, отличных друг от друга по трем указанным параметрам.

Физическими приборами (объективно) можно измерить следующие параметры светового потока: яркость (в абсолютных единицах), преобладающую длину волны и чистоту цвета. Они являются тремя составляющими *психофизических характеристик цвета*.

Под *яркостью цвета* понимается сила света, излучаемая в данном направлении единицей площади в пределах телесного единичного угла. Она измеряется в канделах на метр квадратный.

Под преобладающей *длиной волны* цвета понимают длину волны монохроматического света  $\lambda_d$ , цветовой тон которого такой же, как у данного цвета.

*Колориметрическая чистота цвета* определяет относительное содержание в нем спектрального цвета.

Как было сказано выше, глаз человека различает объекты не только по яркости, но и по цвету. Величина, обратная интенсивности лучистой энергии (необходимой для вызывания у человека впечатления определенной яркости) и характеризующая чувствительность глаза к излучению на той или иной частоте (к цвету), называется *видностью*. В условиях сумеречного зрения максимум функции видности несколько смещается в сторону уменьшения длины волны ([см. рис. 4.12](#)), т. е. максимум чувствительности из желто-зеленой области перемещается в зеленую (с 550 до 510 нм).

Контраст выступает как одно из эргономических условий качества маркировки и активизирует форму цветовой гармонии лицевых панелей. Когда оператор работает в условиях далеких от абсолютного порога чувствительности, то возможность раздельного видения предметов определяется не абсолютной чувствительностью глаза, а его способностью различать локализованные в отдельных местах контрасты яркости.

Численно контрастность  $K$  при яркости фона  $B_\phi$  больше яркости объекта  $B_o$  можно определить по формуле

$$K = \left( \frac{B_\phi - B_o}{B_\phi} \right) \cdot 100 \%. \quad (4.11)$$

Для обратного контраста, т. е. при  $B_\phi$  меньше  $B_o$

$$K = \left( \frac{B_o - B_\phi}{B_o} \right) \cdot 100 \%. \quad (4.12)$$

Порог контрастной чувствительности глаза изменяется с изменением яркости поля адаптации и связан с такими характеристиками зрения, как инерция и острота зрения. От контраста, углового размера изображения, яркости поля адаптации и времени наличия изображения в поле зрения зависит порог видимости. Увеличение яркости поля адаптации и площади маркируемого символа ведет к уменьшению порога контрастной чувствительности глаза.

В число «канонических» контрастов входят:

- *контраст по цветовому тону*. Наиболее сильный контраст обеспечивают красный, синий и желтый цвета в их определенной насыщенности;
- *контраст по светлоте*. Максимально контрастируют белый и черный цвета;
- *контраст теплых и холодных цветовых тонов* обеспечивают красно-оранжевые и сине-зеленые цвета;
- *контраст дополнительных цветов* – максимально интенсивный контраст, но при смешивании эти цвета дают серый цвет;
- *контраст по насыщенности* создается разной интенсивностью цветов.

Рекомендуемая контрастность составляет от 65 до 95 %, а оптимальная (в условиях длительной работы) – от 85 до 95 %.

#### 4.9.3. Информационные характеристики зрительного анализатора

**Объем восприятия.** Количество воспринимаемой зрительной информации вычисляется по формулам

$$F(z) = \sum_{i=1}^N I(i)/T; \quad (4.13)$$

$$I(i) = n \lg 2 (x - x_-)/2y = n \lg 2 N(i), \quad (4.14)$$

где  $T$  – время между двумя посылками информации;  $n$  – количество измеряемых параметров;  $x, x_-$  – диапазон измерения контролируемых величин;  $y$  – погрешность измерения;  $N(i)$  – длина алфавита сообщения.

При равномерном поступлении любых символов количество информации в битах определяется по формуле

$$K_i = n \lg 2 N, \quad (4.15)$$

где  $n$  – число правильно опознанных оператором символов;  $N$  – число символов, поступающих с лицевой панели для отображения информации.

**Пропускная способность.** Этот параметр обладает следующими основными свойствами:

- человек не может решать простую задачу на различение одиночных моносигналов, если их число превышает 7;

- при усложнении информации (увеличение числа признаков сигналов, например оттенка и насыщенности цветовых тонов раздражителей) количество воспринимаемой информации увеличивается (с 7 до 11–15 цветов);
- наибольшей пропускной способностью информации обладает зрительный аппарат (5 бит/с), затем слуховой, которые чаще используются в работе оператора;
- перекодирование информации резко снижает пропускную способность оператора;
- перегрузка информацией и дефицит времени также снижают пропускную способность оператора.

Скорость восприятия информации с прибора, или пропускная способность оператора (бит/с), рассчитывается как

$$F_{\text{оп}} = K_i/T, \quad (4.16)$$

где  $T$  – время отображения (предъявления) информации, с.

Если информация появляется со скоростью  $F_{\text{и}}$ , то для безошибочной работы системы необходимо выполнение условия  $F_{\text{оп}} = F_{\text{и}}$ , что соответствует прямой 1 на [рис. 4.13](#). Оператор начинает допускать ошибки за пределами интервала  $0,1 \text{ бит/с} \leq F_{\text{и}} \leq 5,5 \text{ бит/с}$  (пунктирные линии 2, 3 на [рис. 4.13](#)).

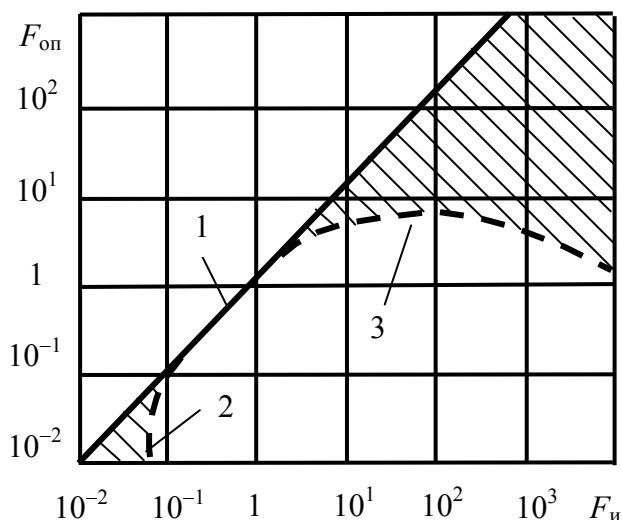


Рис. 4.13. График зависимости пропускной способности оператора от частоты предъявления информации

При  $F_{\text{и}} \leq 0,1 \text{ бит/с}$  ошибки появляются вследствие самопроизвольного отвлечения оператора: он не может постоянно смотреть на индикатор, панель прибора или пульта, на которых ничего не изменяется.

При  $F_{\text{и}} \geq 5,5 \text{ бит/с}$  оператор не успевает усваивать информацию в течение длительного времени из-за утомления. Происходит пропуск символов информации. Если информация предъявляется одновременно от нескольких индикаторов (измерительных приборов), то оператор должен осуществить

поиск нужных ему символов. Увеличение затрат времени будет определяться числом движений глаз и средней длительностью фиксаций.

Таким образом, разрабатывая лицевую панель, конструктор должен предусмотреть согласование потока информации, поступающей с нее, с физиологическими возможностями человека.

#### 4.10. Особенности слухового восприятия информации

Слуховое восприятие обеспечивает человеку-оператору прием звуковых колебаний от источника звука. Слух человека способен воспринимать звуковые колебания в частотном диапазоне от 16 до 20000 Гц. Звуки с частотами ниже 16 Гц относятся к *инфразвуку*, с частотами выше 20000 Гц – к *ультразвуку*.

Степень восприятия звука ухом человека зависит от частоты, энергетической характеристики звукового поля и состояния слухового аппарата человека в данный момент времени.

*Громкость* – субъективный аналог интенсивности звука, оцениваемой в единицах звуковой энергии (Вт/см) или в относительных единицах – децибелах (дБ).

В [табл. 4.6](#) представлена усредненная оценка действия звука различной интенсивности на частоте 1000 Гц на человека.

Как правило, источником звуковой энергии являются поверхности конструкций, совершающие колебания, которые и создают акустическое поле шумящего объекта. Образующееся акустическое поле характеризуется звуковым давлением  $P$  (Па) и колебательной скоростью  $v$  (м/с), возникающими в точке воздушной среды при прохождении через нее звуковой волны.

*Энергетическими характеристиками* акустического поля являются:

- *интенсивность*  $I$  (Вт/м<sup>2</sup>) – количество энергии упругих волн, проходящих за единицу времени через единицу поверхности в направлении нормали;

- *мощность излучения*  $N_{\text{изл}}$  (Вт) – количество энергии, проходящей за единицу времени через замкнутую поверхность, огибающую поверхность звука;
- *плотность энергии звуковых волн*  $W$  (Вт · с/м<sup>-3</sup>) – количество энергии, содержащееся в объеме среды.

Таблица 4.6

**Усредненная оценка действия шума на человека-оператора**

| Субъективная оценка        | Уровень звука, дБ | Сила звука, Вт/м <sup>2</sup> |
|----------------------------|-------------------|-------------------------------|
| Порог слышимости           | 0                 | $10^{-12}$                    |
| Шум заметен                | 40                | $10^{-8}$                     |
| Шум беспокоит              | 50                | $10^{-7}$                     |
| Шум мешает                 | 70                | $10^{-5}$                     |
| Разговор не возможен       | 90                | $10^{-3}$                     |
| Шум подавляет и раздражает | 120               | $10^0$                        |
| Болевой порог              | 130               | $10^2$                        |

Важную роль при расчете акустического поля имеет характеристика направленности звукоизлучения источника, т. е. угловое пространственное распределение интенсивности звука. Применяется также оценка уровня шума (дБ), однако при конструкторских расчетах ее используют редко.

#### 4.11. Характеристика условий работы человека-оператора

Мобилизационные возможности каждого человека зависят от многих факторов, основными из которых являются комфортные условия работы ([рис. 4.14](#)).

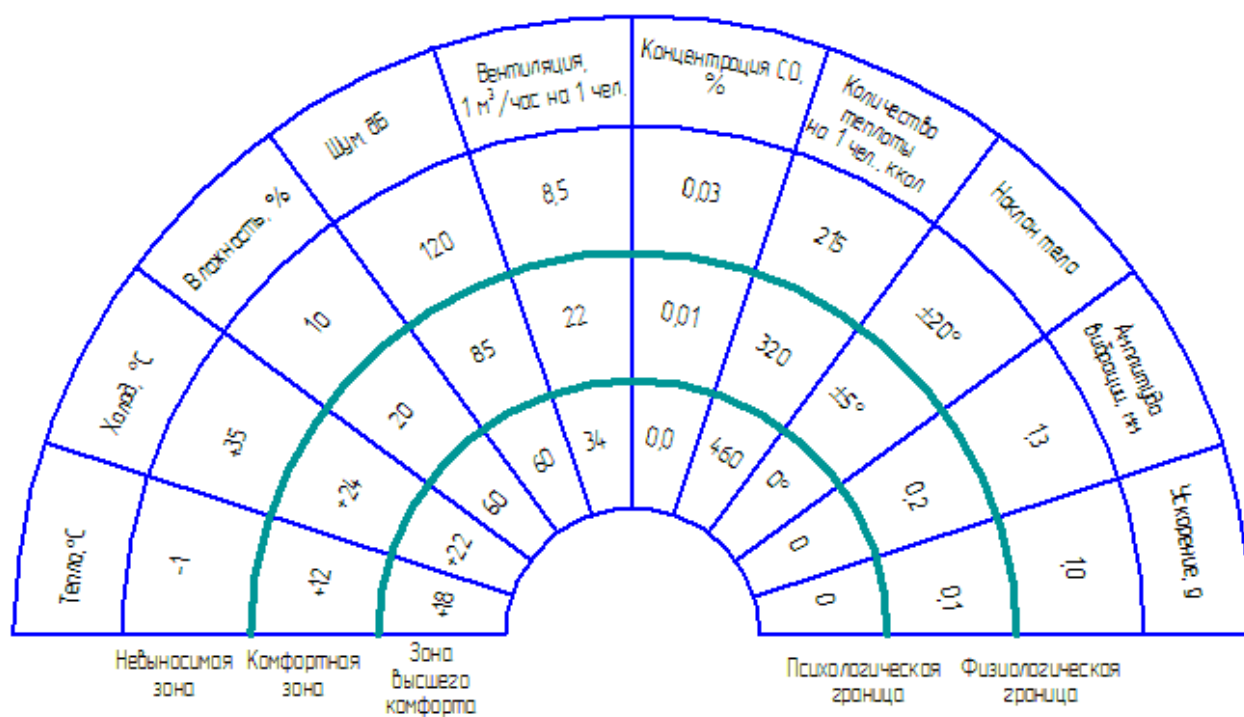


Рис. 4.14. Номограмма для определения условий работы

Однако иногда стремление к обеспечению комфортных условий приводит к негативным последствиям.

#### 4.12. Требования к уровню шума и вибрации в помещениях с электронной аппаратурой

Длительное воздействие системы акустических шумов различного происхождения и вибрации отрицательно влияет на общее функциональное состояние человека-оператора.

Таблица 4.7

Допустимые нормы вибрации на рабочих местах с ЭС

| Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц | Допустимые значения |    |                  |    |
|-------------------------------------------------|---------------------|----|------------------|----|
|                                                 | по виброускорению   |    | по виброскорости |    |
|                                                 | мс <sup>-2</sup>    | дБ | мс <sup>-1</sup> | дБ |
| 2                                               | 5,3·10              | 25 | 4,5·10           | 79 |
| 4                                               | 5,3·10              | 25 | 2,2·10           | 73 |
| 8                                               | 5,3·10              | 25 | 1,1·10           | 67 |
| 16                                              | 1,0·10              | 31 | 1,1·10           | 67 |
| 31,5                                            | 2,1·10              | 37 | 1,1·10           | 67 |
| 63                                              | 4,2·10              | 43 | 1,1·10           | 67 |

При работе с ЭС уровень звука на рабочем месте не должен превышать 50 дБ, а уровень вибрации – допустимых значений, приведенных в Санитарных нормах вибрации на рабочих местах ([табл. 4.7](#)).

Оборудование (принтеры, ксероксы и т. п.), уровень шума которого превышает нормированные, должно располагаться в отдельных помещениях.

Для снижения уровня шума используют звукопоглощающие материалы (например, занавески из плотной ткани).

#### 4.13. Требования к микроклимату в помещениях с электронной аппаратурой

В помещениях с ЭС (системы управления, ЭВМ и др.) должны обеспечиваться оптимальные для человека-оператора параметры микроклимата, приведенные в [табл. 4.8](#). Скорость движения воздуха при этом должна быть не более 0,1 м/с.

Для обеспечения необходимых параметров микроклимата помещение должно быть подключено к системе отопления и оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией. Для повышения влажности воздуха следует применять увлажнители воздуха, ежедневно заправляемые дистиллированной или кипяченой питьевой водой.

Уровни положительных и отрицательных аэроионов в воздухе помещений должны соответствовать нормам, приведенным в [табл. 4.9](#).

Таблица 4.8

**Оптимальные и допустимые параметры температуры  
и относительной влажности воздуха в помещениях с ЭС**

| Оптимальные параметры |                            | Допустимые параметры |                            |
|-----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| Температура, °С       | Относительная влажность, % | Температура, °С      | Относительная влажность, % |
| 19                    | 62                         | 18                   | 39                         |
| 20                    | 58                         | 22                   | 31                         |
| 21                    | 55                         | —                    | —                          |

Таблица 4.9

**Уровни ионизации воздуха помещений**

| Уровни ионизации воздуха | Число ионов в 1 см <sup>3</sup> воздуха |           |
|--------------------------|-----------------------------------------|-----------|
|                          | $n^+$                                   | $n^-$     |
| Минимально допустимый    | 400                                     | 600       |
| Оптимальный              | 1500–3000                               | 3000–5000 |
| Максимально допустимый   | 50000                                   | 50000     |

Содержание вредных химических веществ в атмосфере помещений не должно превышать среднесуточных концентраций для атмосферного воздуха.

#### **4.14. Требования к рабочему месту оператора**

При эксплуатации ЭС (ПЭВМ, распределительная вычислительно-телекоммутационная сеть и т. д.) компоновка и организация рабочего места человека-оператора должны прежде всего основываться на учете его антропометрических и психофизических параметров.

Перед разработкой плана размещения оборудования необходимо установить:

- основные ограничения на размещение оборудования, исходя из спецификации ЭС и условий его эксплуатации;
- перечень элементов, узлов, блоков и элементов контроля и управления, которые должны быть доступны человеку-оператору при обслуживании вычислительной техники;
- перечень необходимых зрительных и звуковых информационных указателей;
- требования к внешним условиям работы (шумы, вибрации, климат).

После определения данных показателей можно приступить к планировке рабочего места, размещению необходимого основного и вспомогательного оборудования и т. п. При этом следует исходить из общих базовых требований к размерам рабочих зон, приведенным на [рис. 4.15](#).

Под *рабочим местом* понимается зона, которая оснащена необходимыми техническими средствами и служит для выполнения должностных обязанностей человека-оператора. При эксплуатации современного ЭС рабочие



места можно разделить на две категории: рабочее место человека-оператора, выполняющего чаще всего диспетчерские функции, и рабочее место вспомогательного персонала (руководство, программисты, ремонтники, технический персонал).

При проектировании рабочего места необходимо учитывать рабочую позу человека, требования к углу обзора, наличие функциональных рабочих поверхностей (например, для письма или монтажа) и пространства для размещения оборудования, конфигурацию и размеры органов управления, последовательность поступления и вид обработки информации, частоту использования органов управления и их связь с элементами индикации.

Рабочие зоны, в зависимости от пространственного положения человека-оператора, делят на зоны для работы стоя и сидя ([рис. 4.16](#)).

При конструировании рабочего места у стоек для работы стоя все пределы досягаемости и максимального поля зрения должны приниматься из расчета нормальной работы оператора низкого роста. В этом случае высокий человек достанет любой орган управления. Если же рабочее место представляет собой закрытое помещение, то его нужно проектировать под оператора высокого роста, тогда люди среднего и низкого роста будут чувствовать себя в таком помещении комфортно.

Схемы размещения рабочих мест должны учитывать расстояние между рабочими столами с дисплеями (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора), которое должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов – не менее 1,2 м. Рабочие места по отношению к световым проемам должны располагаться так, чтобы естественный свет падал сбоку, преимущественно слева.

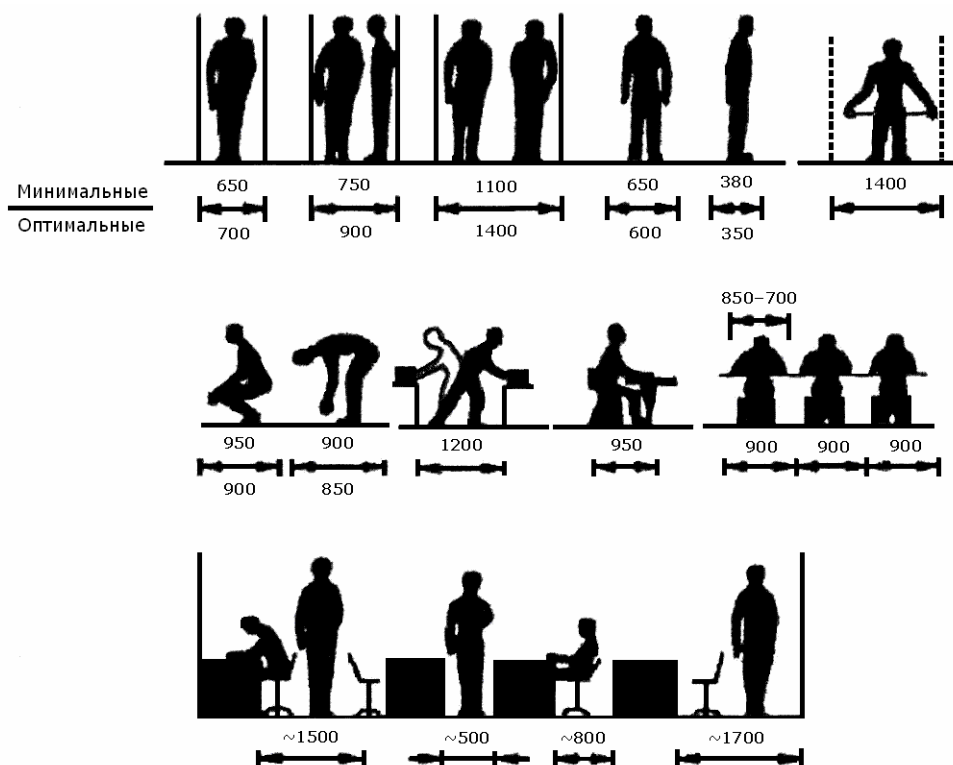


Рис. 4.15. Рекомендуемые размеры рабочих зон

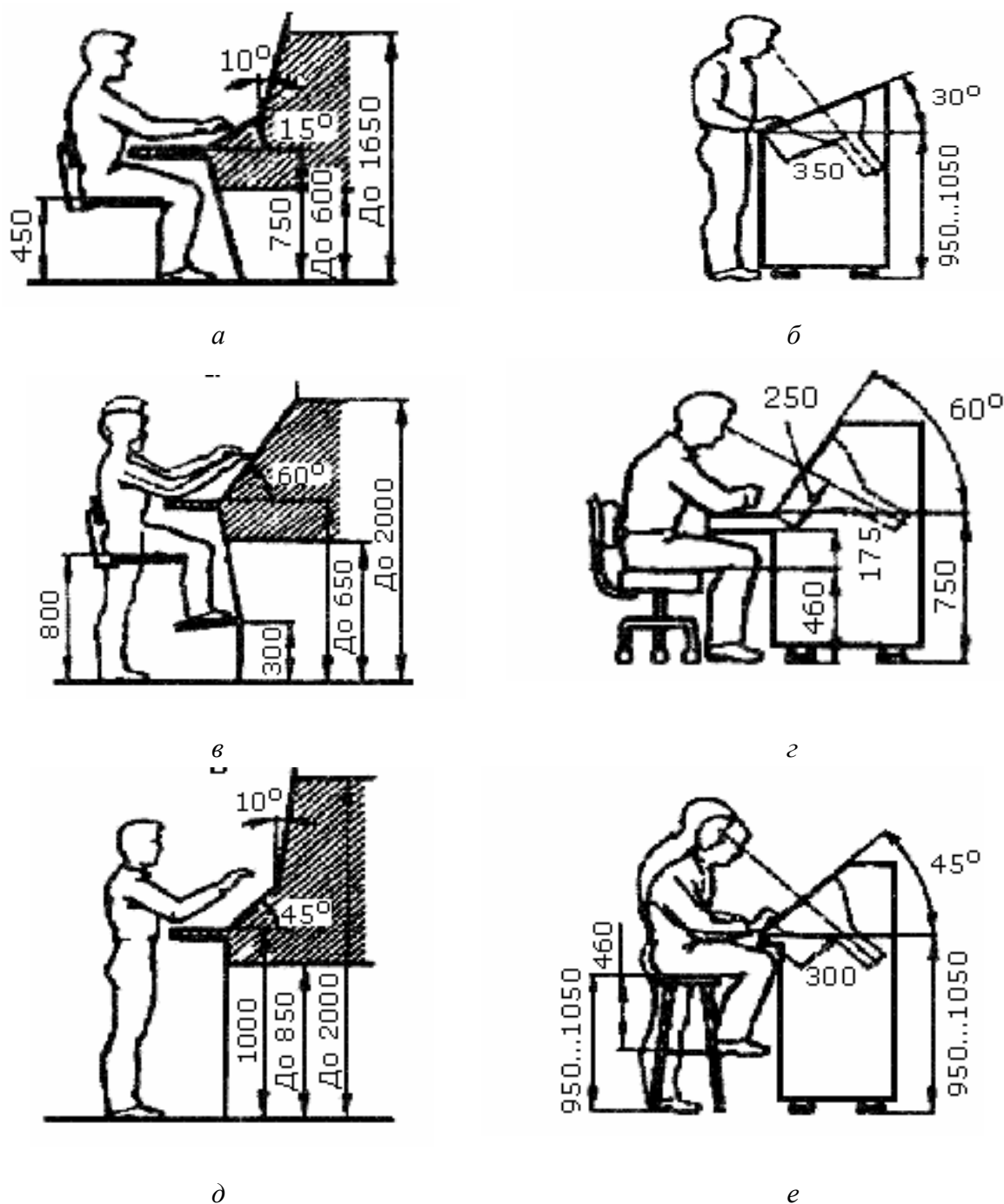


Рис. 4.16. Рабочее место человека-оператора при работе с визуальными средствами отображения информации

При конструировании оборудования и организации рабочего места человека-оператора при работе сидя следует обеспечить соответствие конструкции всех элементов рабочего стола и их взаимного расположения эргономическим требованиям с учетом характера выполняемой пользователем деятельности, комплексности технических средств, форм организации труда и основного рабочего положения оператора.

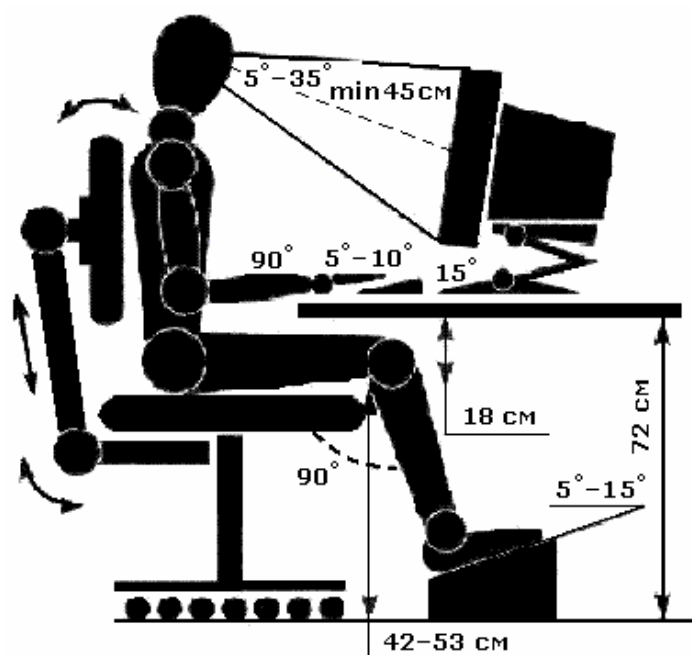


Рис. 4.17. Положение человека-оператора при работе сидя за рабочим столом

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей (размер ПЭВМ, дисплея, клавиатуры и т. д.), характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики ([рис. 4.17](#)). Стол должен быть достаточно большой, чтобы уместить клавиатуру, мышь, дисплей и рабочие документы. Экран монитора следует располагать от глаз человека-оператора на расстоянии 600–700 мм, но не ближе 500 мм с учетом установленной разрешающей способности и размеров символов. Верхняя граница расположения монитора – не ниже 15 см от уровня глаз, монитор и держатель для документов, как правило, размещаются непосредственно перед пользователем, а не сбоку, примерно на расстоянии вытянутой руки от пользователя. Для поддержания запястий в ненапряженном положении можно использовать специальные подставки или держатели для клавиатуры и мыши.

#### 4.15. Техническая эстетика в проектировании ЭС

*Дизайн* (от англ. *design* – проектировать, конструировать) – художественное конструирование предметов, интерьеров; проектирование эстетического облика предметной среды.

Дизайн базируется на достижениях научно-технического прогресса и синтезирует подходы самых разнообразных областей человеческой деятельности – техники, эстетики, эргономики, психологии, социологии, экономики и др.

Теоретическую основу дизайна составляет техническая эстетика, а ее практической реализацией является художественное конструирование изделий, обладающих эстетическими свойствами и предназначенных для непосредственного использования человеком.

*Техническая эстетика* изучает общественную природу и закономерности развития дизайна, основополагающие принципы и методы художественного конструирования, проблемы стиля и мастерства.

В узком смысле дизайн отождествляют с *художественным конструированием*. В отличие от искусства в обычном понимании дизайн обусловлен и ограничен требованиями технической эстетики.

Лицевые панели ЭС являются не только средством технического взаимодействия человека с аппаратурой, но и объектом эстетического восприятия. Очевидно, что на эффективность работы оператора существенно влияет степень его внимания, от которого, в свою очередь, зависят чувствительность анализаторов, величина поля зрения, продуктивность запоминания, скорость двигательных реакций и пр. Внимание человека, как известно, тесно связано с его эмоциональным состоянием, на которое можно воздействовать различными художественными средствами. Усилия дизайнера направлены на создание средствами композиции такой образной выразительности лицевых панелей ЭС, которая способствовала бы психологическому настрою на активную деятельность и обеспечивала бы функциональный комфорт оператора.

Основу любого изделия, в том числе и ЭС, как совокупности форм составляют тектоника и объемно-пространственная структура.

В *тектонике* проявляется взаимообусловленность конструкции и формы, выраженная в конкретном материале, – то наиболее существенное, что определяет *композицию* любого изделия.

*Объемно-пространственная структура* выражается в характере взаимосвязи элементов формы изделия, взаимном расположении его частей, пропорциях, ритмическом расположении элементов формы и т. д.

В целом единство характера композиционного решения определяется гармоничной целостностью, композиционным равновесием, симметрией (асимметрией), статичностью (динамичностью).

*Гармоничной целостности* достигают путем установления взаимосвязи и соподчинения главных и второстепенных элементов формы изделия, которые, усиливая друг друга, образуют в целом композиционное равновесие. Например, в дисплеях экран занимает доминирующее положение, являясь центром композиции, все другие элементы (клавиатура, обрамление) дополняют его, выражая единое композиционное целое. Усилить соподчинение можно выделением главного элемента из соподчиненных размерами, цветом, характером членения и т. д.

Важное значение для достижения гармоничной целостности имеет *симметрия (асимметрия)* – организация элементов конструкции по отношению к ее центру или осям. Симметрия подчеркивает статичность конструкции, асимметрия придает конструкции динамичность.

Статичность выражает состояние покоя, постоянство формы во всем ее строе. Динамичность, наоборот, показывает степень контрастности отношений величин по трем координатам пространства.

Перечисленные свойства определяют образную выразительность композиции и достигаются различными композиционными средствами – *единым приемом, пропорциями, масштабом, метрическим повтором и ритмом, цветом, светотенью, пластикой* и т. д. Однако действенность средств композиции обусловлена особенностями психологии эстетического восприятия. Эти вопросы до конца еще не изучены. Установлено, что восприятие обладает структурностью и проявляется в том, что зрительная система человека группирует элементы композиции по размерам, форме, контрасту, цвету, фактуре, плотности расположения, направлению главных динамических осей (*динамическая ось* – направление деформации фигур, тел, поверхностей), причем движение глаз преимущественно происходит в направлении от больших элементов к меньшим, от более контрастных к менее контрастным

и т. д. Особенности биомеханики глаз таковы, что движение глаз по наклонным направлениям осуществляется медленнее и менее точно, чем по горизонталям и вертикалям. Отсюда требования рядности и упорядоченности расположения элементов на лицевой панели, которые удовлетворяются размещением их на основе модульной координации размеров.

Для достижения гармонической целостности ЭС необходимо соблюдать основные принципы построения композиции: *повторяемость, соподчиненность, соразмерность, равновесие и единство*.

**Принцип повторяемости** реализуется единым композиционным приемом, который присущ всем элементам и конструкции в целом. Единый композиционный прием чаще всего достигается единым подходом к формованию всех элементов. Однако нужно учитывать, что при большой схожести элементов композиция может стать монотонной, невыразительной, что вызовет снижение внимания оператора.



Рис. 4.18. Пример асимметричного расположения элементов на лицевых панелях бытовых ЭС



Рис. 4.19. Организация повторов – вертикального и горизонтального

Для устранения монотонности можно придать динамичность лицевой панели асимметричным расположением элементов, разнообразием их форм и различием размеров. При этом стремятся так организовать композицию, чтобы направление обзора осуществлялось от краев к центру панели соответствующим расположением второстепенных элементов относительно главных элементов ([рис. 4.18, а](#)), если это не противоречит эргономическим требованиям. Чтобы динамическая композиция не выглядела хаотической, непараллельность динамических осей выправляют цветовым зонированием ([рис. 4.18, б](#)).

При размещении на лицевой панели большого количества однотипных элементов для их упорядочения используют метрический повтор (шаг повто-

ра постоянный) и ритм (шаг повтора переменный). На [рис. 4.19](#) показана такая организация лицевой панели блока. Так как при мгновенном наблюдении оператор способен воспринимать ограниченное число характерных различий, требуется тщательная проработка метрических повторов.

**Принцип соподчиненности** осуществляет упорядочение элементов относительно композиционного центра. Если принцип повторяемости основан на сходстве, то принцип соподчиненности – на различии свойств элементов. Использование этого принципа позволяет найти оптимальное соотношение между главными и второстепенными элементами композиции. Выявление центра композиции достигается: членением плоскости лицевой панели таким образом, чтобы центр композиции являлся ее главным элементом; выбором формы, отличной от формы остальных элементов; размещением в центре композиции; выделением цветом, фактурой.

Созданию соподчиненности, иерархии зон внимания способствует применение различных средств композиции: *пропорций, масштаба, ритма, контраста, нюанса, цвета, пластики, светотени* и др.

**Принцип соразмерности** определяет соответствие элементов и частей изделия между собой и целым. Для достижения соразмерности используют пропорции и масштаб, а также другие средства композиции.

Существуют арифметические, геометрические и гармонические пропорциональные системы. В *арифметических (модульных) пропорциях* связь и определение размеров частей между собой и целым выражается через единый заданный размер – модуль. Модульные пропорции широко используются при унификации и стандартизации размеров.

*Геометрические пропорции* проявляются в подобию форм ([рис. 4.20, а](#)).

Интерес представляет геометрическая пропорция, состоящая из трех элементов –  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Общий член  $b$  называется *средней пропорциональной*, или *средней геометрической, величиной*.

С древних времен в комбинаторике формообразования наибольшее распространение получили различные гармонические пропорции. Установлено, что пропорционирование в классической архитектуре основано на иррациональных числах, среди которых выделяют *золотое сечение*: деление целого на две неравные части пропорционально, когда целое так относится к своей большей части, как большая часть относится к меньшей части. Это отношение постоянно и равно  $1 : 0,618 = 0,618 : 0,382$ .



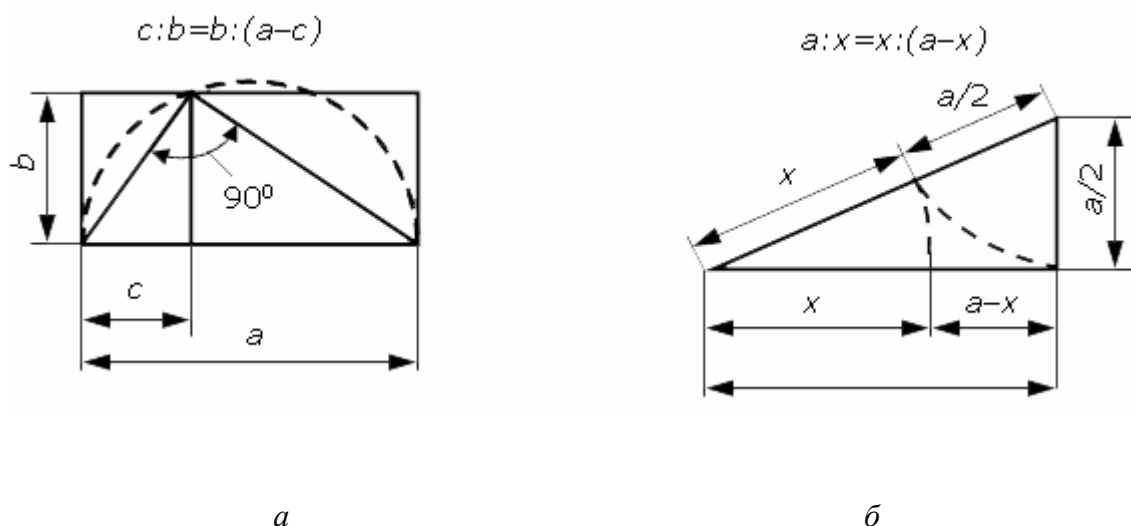


Рис. 4.20. Графическое построение основных видов пропорций:  
 а – геометрической; б – золотого сечения

Деление отрезка в золотом сечении осуществляется графически с помощью прямоугольного треугольника с соотношением катетов 1:2 (рис. 4.20, б). Ряд золотого сечения выражается следующими числами: 0,09; 0,146; 0,236; 0,382; 0,618; 1,000; 1,618 и т. д. Если этот ряд приближенно выразить в целых числах, то получится ряд Фибоначчи: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34 и т. д. Ряд обладает интересным свойством: любой его член равен сумме двух предыдущих, а отношение соседних членов приближается к золотому сечению.

Особую выразительность композиции придают контраст, нюанс и пластика. *Контраст* позволяет активнее выразить функциональные и конструктивные особенности элементов. Элементы, которые нужно выделить, обычно имеют отличную от других элементов форму и окрашены в контрастирующие цвета. *Нюанс*, наоборот, выражается незначительным различием элементов конструкции по форме, размерам и цвету. В отличие от контраста нюанс и пластика являются сферой чисто художественного осмысливания формы и материала изделия.

**Принцип равновесия** требует, чтобы все части композиции и целое были уравновешены относительно пространственных осей и центра композиции. Установлено, что вертикальная и горизонтальная оси неравноценны. Вследствие действия гравитационных сил главную роль играет вертикальная ось. От соотношения центра масс и композиционного центра зависит зрительная уравновешенность лицевой панели. Особенности восприятия таковы, что кажущейся максимальной массой будут обладать те элементы, у которых размеры по трем координатам приближаются к равенству: куб, шар и т. д. Вертикальные формы воспринимаются более тяжелыми, чем горизонтальные и наклонные. Кроме того, кажущаяся масса элемента зависит от его положения: она возрастает пропорционально расстоянию от центра композиции.

Следует учитывать также оптические иллюзии (рис. 4.21, а, рис. 4.21, б, рис. 4.21, в, рис. 4.21, г, рис. 4.21, д, рис. 4.21, е, рис. 4.21, ж). Особенно



важно соблюдение принципа равновесия в асимметричных композициях, где необходимо находить такие пропорции между неравными элементами, чтобы не создавалось впечатление неустойчивости.

**Принцип единства** является как бы суммирующим, итоговым и определяет стиль всего изделия. Он проявляется в определенных тектонических связях формы, конструкции и материала.

Современный стиль в ЭС основывается на использовании всех средств, обеспечивающих функциональный комфорт оператору. Единое стилевое решение лицевой панели ЭС достигается за счет устойчивых признаков формообразования, единого способа декоративного оформления, определенного цветофактурного решения, единой системы графических изображений, однотипности комплектующих элементов и т. д.

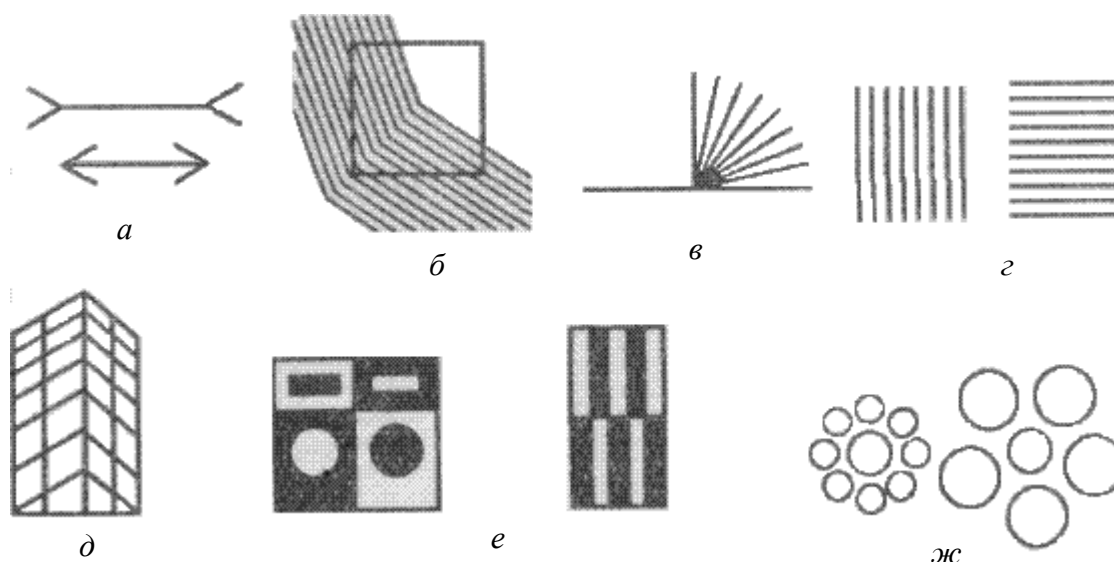


Рис. 4.21. Оптические иллюзии: *а* – иллюзии Мюллера – Лайера; *б* – кажущаяся деформация сторон квадрата; *в* – зрительное неравенство углов; *г* – кажущиеся неравными продольно и поперечно зачерченные пространства; *д* – кажущиеся расхождения кверху вертикальных параллельных линий значительной протяженности; *е* – корректировка зрительного увеличения или уменьшения равновеликих фигур, окрашенных в белый и черный цвета; *ж* – кажущееся изменение площади одинаковых кругов, помещенных среди кругов разного размера



Рис. 4.22. Вид системного блока ПЭВМ с откидными крышками

Для обеспечения функционального комфорта оператора на лицевой панели не должно быть ничего лишнего, не несущего информацию оператору или отвлекающего его внимание. Исходя из этого, используют комплектующие элементы, которые не имеют видимых снаружи крепежных деталей, а также фальшпанели. Элементы индикации, контроля и управления, имеющие второстепенное значение (например, «информация по требованию»), могут быть закрыты специальными откидными или выдвижными панелями ([рис. 4.22](#)).

#### 4.16. Компоновка передних панелей ЭС

Лицевые панели ЭС информационно насыщены и содержат десятки, а пульта управления – сотни различных элементов, структурно объединенных в зоны индикации, управления и коммутации. Несмотря на специфику, эти зоны пространственно почти всегда перекрываются, так как они функционально связаны между собой.

Известно, что психофизиологические возможности человека по восприятию информации и скорость выполнения им команд управления ограничены. Так, число одновременно успешно контролируемых человеком информационных объектов не превышает  $7 \pm 2$ , что объясняется ограниченным объемом оперативной памяти. Учитывая эти особенности, организацию элементов на лицевых панелях осуществляют по принципам группировки, взаимосвязи и приоритета.

**Принцип группировки.** При большом количестве однотипных элементов на лицевой панели их разбивают на несколько визуально отличных групп по логическому или формальному признаку. При логической группировке элементы связаны общностью выполняемых функций. Если такое объединение невозможно, то проводится объединение по формальному признаку, т. е. по внешней однотипности элементов. Очевидно, группировка эле-

ментов по логическому признаку по сравнению с формальным обеспечивает больший функциональный комфорт оператору.

**Принцип взаимосвязи.** Объединение элементов производится в соответствии с функциональными связями между индикаторами и органами управления как внутри каждой функциональной группы, так и с учетом алгоритма их использования в процессе работы. При этом не должен нарушаться *принцип стимула и реакции*: увеличению параметра на индикаторе должно соответствовать движение органа управления вверх, вправо или по ходу часовой стрелки для поворотных органов управления.

**Принцип приоритета.** Группировка элементов по этому принципу осуществляется по оперативной значимости элементов, т. е. по частоте обращения к ним в процессе работы. Элементы и функциональные группы, получившие приоритет, располагаются в оптимальных зонах доступности и видимости. При организации лицевых панелей учитывают функциональную асимметрию зрительной системы человека: произвольная фиксация взгляда в вертикальной плоскости распределяется неравномерно. Если разбить плоскость лицевой панели на четыре квадранта, то в верхней части будет сосредоточено почти 3/4 всего количества фиксаций глаза, причем максимум будет приходиться на левый верхний квадрант, где и рекомендуется размещать наиболее важные элементы.

Существует ощутимая разница во времени считывания информации в левой и правой частях лицевой панели при углах обзора свыше 25° от центральной оси: левая сторона «считывается» медленнее.

Зона управления тесно связана с информационной зоной. Расположение элементов в этой зоне в первую очередь должно подчиняться алгоритму работы оператора с лицевой панелью. Значительно упрощают работу оператора мнемосхемы.

Функционально связанные элементы управления и индикации должны располагаться вблизи друг от друга так, чтобы не мешать обзору индикатора: при работе правой рукой элемент управления должен находиться снизу или справа от соответствующего индикатора, при работе левой рукой – снизу или слева от индикатора. Предпочтительная направленность движений и обзора слева направо и сверху вниз.

Правильное расположение элементов формы должно способствовать быстрому определению, какие органы управления и индикации взаимосвязаны, какое состояние может вызывать каждый орган управления. Оператор должен в любой момент легко узнать, в каком режиме находится работающий прибор, каковы величины параметров. Поэтому ручные органы управления располагаются так, чтобы рука не закрывала рядом расположенного индикатора.

Располагая функциональные группы определенным образом на лицевой панели и выравнивая, соподчиняя расположение элементов этих групп

между собой, конструктор строит композицию наиболее удобными ему методами итерационных стратегий или последовательных приближений.

При любом варианте каждый регулятор располагается непосредственно под связанным с ним индикатором: справа – для правой руки, слева – для левой руки. Если управлять можно любой рукой, то используется симметричное расположение индикатора и регулятора.

При размещении регуляторов и индикаторов на разных панелях необходимо, чтобы:

- органы управления занимали положение, соответствующее положению связанных с ним индикаторов;
- панели с регуляторами и индикаторами не размещались друг против друга;
- все индикаторы располагались сверху, а органы управления – внизу.

Важно отметить, что построение композиции – многоитерационный процесс, основанный не только на использовании закономерностей гармонии, но и на просмотре большого количества вариантов размещения по функциональному признаку.

Следует отметить, что при организации лицевых панелей учет функциональных связей и эргономических требований является первоочередным и необходимым, но недостаточным для достижения высоких эстетических качеств, при стремлении к которым нужно использовать приемы и средства художественного конструирования.

Для разработки композиции исходными данными являются: полный состав элементов (включая маркировку), входящих в нее, и форма изделия. Количественный состав функциональных элементов, располагаемых на панели (индикаторы, регуляторы, коммутационные изделия и т. п.), выявляется после проработки общей компоновки конструкции. Необходимое информационное наполнение (надписи, символы) зависит от типа изделия (например, для бытовой ЭС это торговое наименование, товарный знак, дата выпуска, отметка ОТК и т. д.) и обеспечения удобства работы оператора (оформление шкал, функциональное назначение органов управления и коммутации, обозначение режимов работы и диапазона измерений и пр.).

Первый этап разработки композиции – формирование функциональных групп типа «индикатор – символ – регулятор». Независимо от типов органов управления и индикации и вида надписей они группируются в определенную пространственную структуру.

За основу выбора той или иной пространственной структуры первоначально выбирается *принцип функциональной организации*, упомянутый выше. Это хорошо видно на примерах компоновки передних панелей автомобильных магнитол. На [рис. 4.23](#) показано формирование внешней структуры передней панели автомагнитолы PANASONIC J04P. Назначение органов управления приведено в [табл. 4.8](#).

Как видно из [рис. 4.23](#), органы управления магнитофоном («Извлечение кассеты», «Перемотка влево», «Перемотка вправо») сгруппированы ря-

дом с кассетоприемником (зона I). Общие органы управления – «Громкость» и «Тембр» сгруппированы вместе (зона II). Остальные органы управления относятся к настройке радиоприемника.

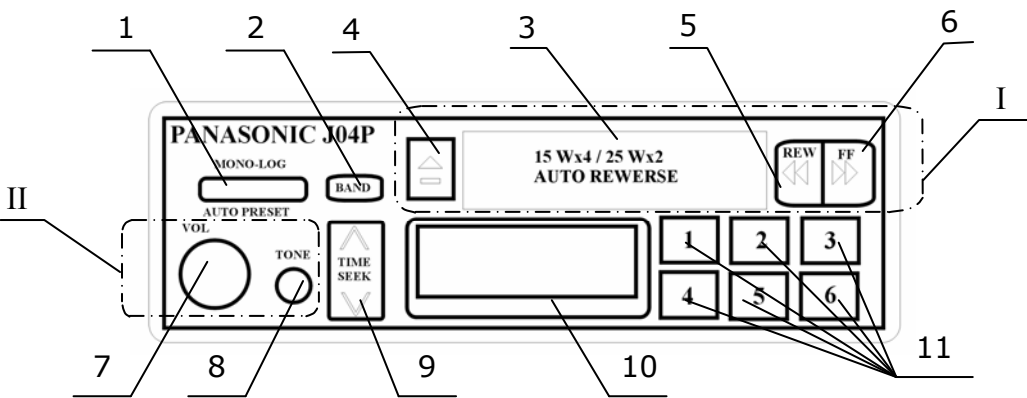


Рис. 4.23. Композиционное решение для передней панели автомагнитолы PANASONIC J04P

Таблица 4.8

Обозначение органов управления автомагнитолы PANASONIC J04P

| №  | Маркировка       | Исполнение | Выполняемые функции     |
|----|------------------|------------|-------------------------|
| 1  | <i>Mono-log</i>  | Кнопка     | Сканирование            |
| 2  | <i>Band</i>      | Кнопка     | Выбор диапазона         |
| 3  | —                | —          | Кассетоприемник         |
| 4  | $\Delta$         | Кнопка     | Извлечение кассеты      |
| 5  | <i>REW</i> <<    | Кнопка     | Перемотка влево         |
| 6  | <i>FF</i> >>     | Кнопка     | Перемотка вправо        |
| 7  | <i>Vol</i>       | Ручка      | Громкость               |
| 8  | <i>Tone</i>      | Ручка      | Тембр ВЧ/НЧ             |
| 9  | <i>Time seek</i> | Кнопка     | Изменение частоты       |
| 10 | —                | —          | Дисплей                 |
| 11 | 1–6              | Кнопка     | Выбор станций из памяти |

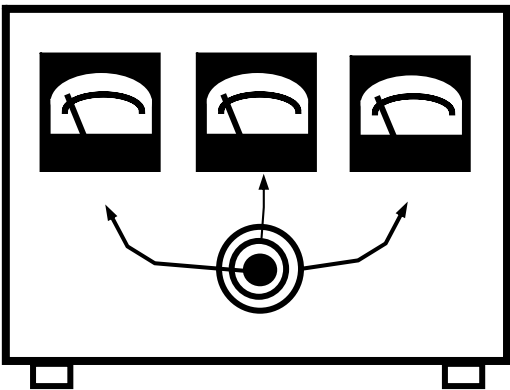


Рис. 4.24. Размещение индикаторов и концентрических органов управления

Если функциональных групп много, то помимо пространственной группировки (компоновки) применяется цветографическая группировка – выделение отдельных зон на панели цветом или контрастными по отношению к фону линиями.

Следует учитывать, что нельзя располагать рядом органы управления для текущей работы и аварийных ситуаций. В случае применения концентрических поворотных ручек, связанных с индикаторами ([рис. 4.24](#)), центральная ручка управляет крайним левым индикатором, средняя – средним, периферическая – крайним правым. Аналогично, от периферии к центру располагают и надписи, относящиеся к соответствующим органам управления.

Эксплуатационные надписи должны помещаться рядом с соответствующим органом управления или контроля. Для удобства чтения предпочтительно горизонтальное расположение символов над элементом или справа от него. Преимущество расположения над элементом в том, что при манипуляции с органами управления надпись не будет закрываться рукой. Маркировка кнопок или ручек управления менее предпочтительна и применяется для малогабаритной аппаратуры, улучшения внешнего вида или повышения технологичности.

В отличие от надписей *линии* применяются:

- для выделения функциональных зон;
- как связующие элементы при неопределенном пространственном расположении органов управления;
- для акцентирования положения органа управления (например, группирование диапазонов измерения с разной размерностью).

На [рис. 4.25](#) приведены примеры указанного использования линий на фрагменте передней панели осциллографа С1-68. Линия 1 объединяет элементы, связанные с каналом  $Y$  (отклонение по вертикали). Объединение в дополнительные функциональные группы – входного разъема и переключателя вида входного напряжения, основного переключателя коэффициента усиления и декадного переключателя (1 или 10) – произведено линиями 2. Линии 3 регламентируют размерность коэффициента усиления –  $V/cm$  (с левой стороны) и  $mV/cm$  (справа).

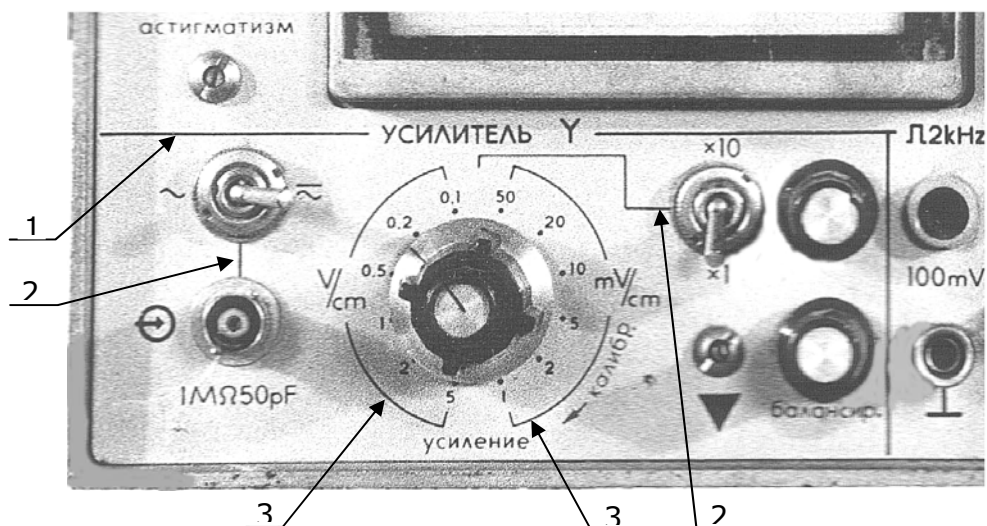


Рис. 4.25. Реализация объединения в функциональную группу и выделения связей элементов с помощью маркируемой линии

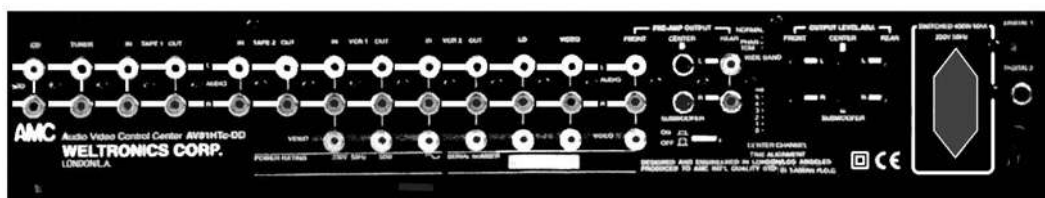


Рис. 4.26. Реализация объединения выходных гнезд в функциональную группу с помощью маркируемой линии

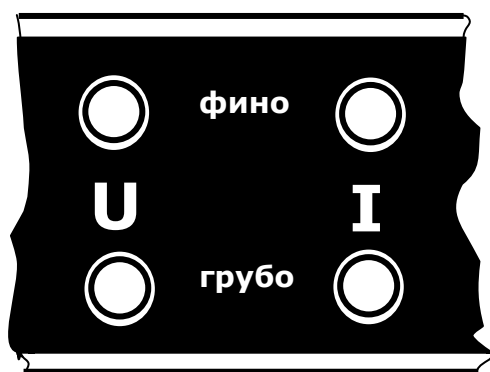


Рис. 4.27. Реализация объединения в функциональную группу с помощью надписей

На [рис. 4.26](#) показано использование линий как группирующих элементов на задней панели многоканального усилителя фирмы TECHNICS.

Объединяющими в функциональную группу отдельных элементов могут служить не только линии, но и надписи. Пример такого решения для венгерского источника питания ТЕС-9 приведен на [рис. 4.27](#).



Основная цель при создании композиции – создание единого (целостного) восприятия изделия. Один из основных способов достижения этой цели – соблюдение визуального равновесия в расположении отдельных элементов и частей лицевой панели. При достижении равновесия формы разрабатываемая конструкция зрительно устойчива.

Создание композиционного равновесия может осуществляться как в симметричных, так и в асимметричных формах. При этом симметрия является одним из наиболее ярких и наглядно проявляющихся свойств композиции. Различают зеркальную, осевую, переносную и орнаментную симметрию. Симметрия при разработке лицевых панелей для радиоэлектронных устройств, как правило, достигается в асимметричных формах, поскольку все размещаемые элементы имеют различные габариты, конструктивное исполнение и цветовое решение.

#### **4.17. Выбор цветофактурных решений**

Большое значение во внешнем оформлении имеет цвет, обладающий свойством изменять восприятие размеров предметов и дающий таким образом возможность модифицировать общую композицию. Так, белый и желтый цвета увеличивают размеры, а синий, коричневый и черный – уменьшают. Кроме того, на зрительное восприятие влияет и яркость: чем ярче цвет, тем меньшую площадь должна занимать окрашенная им поверхность.

Более подробно на выборе цветофактурных решений остановимся при рассмотрении вопросов применения лакокрасочных покрытий.

#### **4.18. Кодирование визуальной информации**

Вся информация, наносимая на изделие и его составные части, электрический монтаж, тару и упаковку, кодируется в том или ином виде. Для маркирования ЭС наиболее часто применяют следующие способы представления данных: *алфавитно-цифровой, условными символами или пиктограммами и цветом*. Штриховыми кодами маркируются обычно тара и упаковка.



На потребительской упаковке общеинформативную и рекламную функцию часто выполняют рисунки.

Способ кодирования определяется самим маркируемым изделием (его назначением, габаритными размерами и др.), особенностями работы оператора, включая его квалификацию, и типом представляемой информации – качественная или количественная. При выборе вида алфавита следует опираться на сложившиеся и проверенные опытом знания человека. Это способствует хорошей ассоциативности (по форме, цвету, содержанию и т. п.) с обозначаемыми предметами и процессами, повышает скорость и точность декодирования. Так, например, *буквы*, используются для передачи качественной информации, *цифры* – для передачи количественных характеристик, *цвет* – для определения значимости, *геометрические фигуры* разнообразной формы и размеров – для наглядности.

#### 4.18.1. Алфавитно-цифровая маркировка

Нанесение информации в виде надписей является наиболее традиционным. Надписи выполняются в трех вариантах: полное наименование, сокращенное и аббревиатурное. При этом одинаковые надписи должны быть однотипными, а сокращенные – понятными, т. е. при сокращении слова, его смысл в оставшейся части должен сохраниться.

Примеры сокращенных надписей:

ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ ПРИЕМНИК – ТЕЛЕВИЗОР;  
ЗВУКОВОЙ ПРОЦЕССОР – ЗВУКОПРОЦЕССОР;  
ВКЛЮЧЕНО – ВКЛ.;  
АВТОМАТ – АТ;  
КАЛИБРОВКА – КАЛИБР.

При формировании сокращенной надписи следует помнить, что она должна заканчиваться согласной буквой, в ней должно быть опущено максимальное количество букв и при этом ее нельзя было бы спутать с общепринятыми или другими сокращенными словами.

Аббревиатуры применяют для замены полного наименования прибора и обычно составляют из начальных букв слов:

ВИДЕОМАГНИТОФОН ЦВЕТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ – ВМЦ;  
ЗВУКОВОЙ ПРОЦЕССОР – ЗВП.

Однако иногда аббревиатуры отражают не наименование изделия, а его состав. Например, обозначение для радиоэлектронного аппарата, состоящего из тюнера и лентопротяжного механизма, – КАССИВЕР – ТМ.

При замене полных надписей следует учитывать, что одинаковые аббревиатуры могут иметь разную расшифровку.

При маркировании наименования ЭС необходимо избегать недопустимых терминов, принятых для некоторых видов аппаратуры (ГОСТ 26794 и ГОСТ 27418).

Обозначения физических величин выполняются только в сокращенном виде. Для изделий, предназначенных для использования в Российской Феде-

рации, обычно применяется кириллица. Однако для электроизмерительных приборов, в соответствии с ГОСТ 23217, обозначения должны быть на латинском языке.

Выбор типа шрифта определяется объектом (изделие, упаковка, тара), назначением (общейинформативная или нет) и способом его нанесения.

На приборах надписи выполняют специально разработанными для этой цели шрифтами (ГОСТ 26.008, ГОСТ 26.020) или некоторыми типографскими шрифтами по ГОСТ 3489.2 – ГОСТ 3489.8.

Шрифты для нанесения надписей на средства измерений и автоматизации, радиоэлектронную аппаратуру и вычислительную технику (кроме изделий авиационного приборостроения) методом плоской печати устанавливает ГОСТ 26.020. Помимо изделий эти шрифты можно использовать и для маркирования упаковок.

Каждый шрифт включает:

- алфавит – русский, латинский, греческий;
- цифры – арабские и римские;
- знаки – препинания и математические;
- показатели степени;
- индексы.

В зависимости от начертания, по ГОСТ 26.020, рекомендованы шрифты, представленные на [рис. 4.28](#). Основным является шрифт Пр3. При ограниченной площади под надпись или из эстетических соображений применяют Пр41. Для маркирования названия, модели, типа изделия и т. д. рекомендуют шрифты Пр5, ПрК5, Пр/5, ПрК/5.

|              |              |                                    |
|--------------|--------------|------------------------------------|
| <b>АБВГД</b> | <b>абвгг</b> | Пр3 – прямое нормальное полужирное |
| АБВГД        | абвгг        | Пр41 – прямое узкое полусветлое    |
| <b>АБВГД</b> | <b>абвгг</b> | Пр5 – прямое нормальное жирное     |
| АБВГД        | абвгг        | ПрК5 – прямое контурное            |
| <b>АБВГД</b> | <b>абвгг</b> | Пр/5 – наклонное нормальное жирное |
| АБВГД        | абвгг        | ПрК/5 – наклонное контурное        |

Рис. 4.28. Начертания шрифтов, наносимых на приборы методом плоской печати

Определяющим для выбора шрифта (кроме начертания) является его размер – высота прописных букв. Он выбирается из ряда: 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 12,0; 16,0; 20,0; 25,0; 30,0; 40,0; 50,0;

60,0; 80,0; 100 мм. При этом шрифты Пр5, ПрК5, Пр/5, ПрК/5 с высотой букв менее 3 мм применять не допускается.

При записи в конструкторской документации обязательно указывается размер шрифта, способ начертания и номер нормативного документа. Например, шрифт высотой 6 мм и начертанием Пр41 условно обозначается следующим образом:

*Шрифт 6–Пр41 ГОСТ 26.020–80.*

Для нанесения надписей на приборы методом гравирования по ГОСТ 26.008 применяются только два, отличных по начертанию шрифта – Пр3 и Пр41. Гравированием по этим шрифтам не выполняются показатели степени и индексы, а для Пр41, кроме того, и знаки – препинания и математические. Примеры записей в конструкторской документации аналогичны рассмотренным выше, но со ссылкой на ГОСТ 26.008.

Для логотипов, названий фирм-производителей, наименования бытовой ЭС часто применяются свободные стилизованные шрифты, поскольку указанная маркировка носит представительский и рекламный характер ([рис. 4.29](#), [рис. 4.30](#)).

Начертание символов может зависеть и от способа нанесения. Например, надписи на таре наносят обычно через трафарет. Этим определяются и начертания рекомендуемых шрифтов, приведенных в ГОСТ 14192.

КГТУ Красноярск *a*

крту к красноярск *б*

КГТУ Красноярск *в*

КГТУ Красноярск *г*

КГТУ Красноярск *д*

КГТУ Красноярск *е*

КГТУ Красноярск *ж*

Рис. 4.29. Примеры стилизованных шрифтов: *a* – AG Galleon Bold; *б* – DS Arabic; *в* – Izhitsa; *г* – Evangelie TT; *д* – Fita Vjaz; *е* – Izhitsa Shadow CTT; *ж* – Slavanskay



Рис. 4.30. Пример свободного стиля шрифта для маркировки наименования устройства кодового доступа в здания и помещения

0123456789

*a*

0123456789

*б*

0123456789

*в*

Рис. 4.31. Способы начертания цифр: *a* – шрифт Бергера;  
*б* – шрифт Макворта; *в* – шрифт Слейта

Цифровые символы, как и буквенные, определяются типом выбранного шрифта, так как стиль оформления надписей на панели прибора должен быть один. Однако при этом более строго подходят к выбору графики цифр, определяющей различимость знаков. Например, при использовании арабского цифрового алфавита возможны ошибки при чтении цифр 7 и 9, 5 и 6, 3 и 5, которые отличаются друг от друга одним или двумя признаками. Так как различимость и опознание цифр зависят от типа и взаимного расположения линий, образующих знак, то хорошо различаются цифры 1, 2, 4, 8, 0. Наибольшей скоростью считывания и точностью опознания обладают цифры, имеющие в своем составе прямые линии.

В зависимости от назначения должны использоваться разные специальные конфигурации цифровых знаков, приведенные на [рис. 4.31](#).

Установлено, что процесс распознавания проходит быстрее при наличии в знаках острых углов и прямых линий. Поэтому применение шрифта Бергера ([рис. 4.31, a](#)) ускоряет идентификацию цифрового знака. Следует добавить, что такой шрифт легче распознается и при автоматизированном считывании. В случае задачи не считывания, а написания знаков более удобно пользоваться волнистыми линиями без резких перегибов линий и острых углов. Приведенный на [рис. 4.31, б](#) шрифт Макворта является примером шрифта удобного для написания. При высокой частоте считывания цифрового кода каждая цифра должна иметь специфическую форму и много признаков отличия. Эти условия соблюдены в шрифте Слейта ([рис. 4.31, в](#)).

#### 4.18.2. Символьная маркировка

Как было сказано, ввиду повышения информативности и уменьшения размеров лицевых панелей изделий ЭС все большую популярность приобретает применение *пиктограмм* – мнемосимволов (специальных графических символов, далее – символов) вместо обычных надписей. Это позволяет получить нужную информацию за более короткое время (более простой процесс

считывания информации за счет привычных ассоциаций). Часто даже словесная информация откладывается в виде образов, а визуальные образы интернациональны: они понятны для людей, говорящих на разных языках. Последнее напрямую влияет на расширение круга пользователей и, соответственно, рынка сбыта.

По сути, пиктограммы являются стилизованными рисунками, обозначающими объект, процесс или действие. Следует отметить, что используемые в настоящее время в качестве пиктограмм изображения не отвечают в полной мере поставленным целям и задачам. Некоторые символы, как, например, обозначение II класса защиты, пользователем могут быть приняты за декоративные элементы общего композиционного решения. Поэтому для бытовой и аналогичной техники, с которой должны работать непрофессионалы, с точки зрения обеспечения электробезопасности, требование к расположению данного символа формулируется следующим образом: условное обозначение прибора класса II должно быть расположено так, чтобы было ясно, что оно является частью технической информации, и чтобы его нельзя было принять за другое обозначение.

Символьную маркировку можно классифицировать по признакам, приведенным на [рис. 4.32](#).

Товарные, сертификационные, эксплуатационные, информационные и предупредительные знаки наносят на изделие. На потребительской упаковке располагаются товарные, сертификационные, экологические, информационные и размерные знаки, а также штрихкодирование. На транспортной упаковке наносят манипуляционные знаки и, в ряде случаев, штриховое кодирование.

К *товарным знакам* относят зарегистрированные в установленном порядке обозначения, служащие для отличия однородных изделий разных предприятий.



Рис. 4.32. Классификация символьной маркировки

*Эксплуатационные знаки* предназначены для правильной эксплуатации и монтажа изделия. Большинство таких знаков утверждены на международном уровне. К ним относятся, например, знаки управления бытовой и электро-

радиоизмерительной техникой, знаки регулирования и настройки аудио-, видео- и телеаппаратуры и т. д.

*Предупредительные знаки* маркировки предназначены для предупреждения пользователя об опасности. Это знаки «Высокое напряжение», «Ионизирующее излучение» и др.

*Сертификационные знаки* информируют потребителя о соответствии товара принятым нормам и правилам. Например, символ го-  ворит о том, что изделие удовлетворяет международным нормам на электромагнитную совместимость.

*Информационные знаки*, в зависимости от места размещения – на изделии или потребительской упаковке, несут, как правило, различную информационную нагрузку. Например, на электроизмерительных приборах обязательна простановка знаков, определяющих принцип действия прибора (электромагнитный, электродинамический и т. д.), рабочее положение (горизонтальное, вертикальное) и т. д.

На упаковке изделий вычислительной техники как информационные присутствуют знаки возможности использования в тех или иных операционных системах или совместимости с вычислительной техникой определенных фирм-изготовителей.

*Экологические маркированные знаки* наносятся, как правило, на упаковку. Они предназначены для информирования потребителей об экологической чистоте изделий или экологически безопасных способах утилизации как товара, так и упаковки.

*Манипуляционные знаки* представляют собой комплекс условных обозначений, наносимых на любую упаковку – потребительскую и транспортную. Они несут информацию о способах обращения (хранения, складирования и др.).

При разработке графической символики обязательно должны учитываться профессиональные знания и навыки людей, использующих данную аппаратуру, для возникновения ассоциаций и повышения точности распознавания. Таким образом формируются предпосылки для создания символов, имеющих одинаковое изображение, но несущих, в зависимости от маркируемого объекта, разную смысловую нагрузку. Например, символ , расположенный на пульте устройства с программным управлением, обозначает «перемещение рабочих органов станка на единицу дискретности отработки перемещений», на радиоэлектронном генераторе сигналов – «прямоугольный импульс».

Следует отметить, что чем большее количество пиктограмм внедряется в производство, тем дольше процесс обучения пользователей.

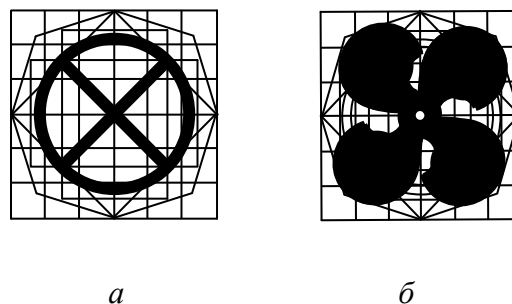


Рис. 4.33. Вид графических символов: *a* – контурный; *б* – силуэтный

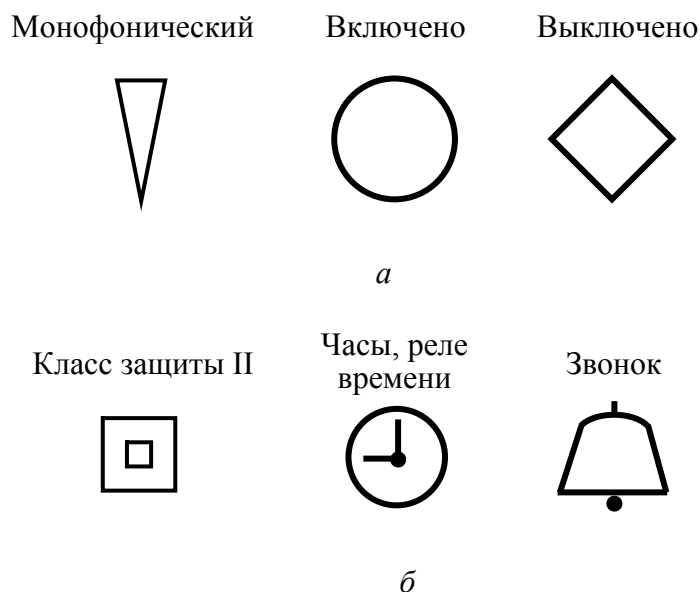


Рис. 4.34. Условные графические символы с различной степенью абстракции: *a* – полной; *б* – частичной

Форма условных знаков может быть контурной, или линейной, ([рис. 4.33, а](#)) и силуэтной, или сплошной ([рис. 4.33, б](#)). Нанесение контурных знаков более технологично, и время их поиска меньше.

Для однозначного восприятия символьных обозначений необходимо правильно выбирать рисунок символа, его размеры, форму, соотношение цветов изображения и фона.

Рисунок символа определяет степень абстрагирования, т. е. в данном случае меру приближения кодового обозначения к кодируемому объекту или действию. При полном абстрагировании форма знака не связана с физической сущностью наносимой информации ([рис. 4.34, а](#)). В случае применения символов, в той или иной степени отражающих суть действия или объекта ([рис. 4.34, б](#)), наблюдается более высокая точность и скорость распознавания.

Если знак не несет смыслового значения, не ассоциируется с объектом или действием, то его форма должна быть легко запоминающейся.

Без знания языка, стандартов и т. п. должны быть понятны обозначения, используемые для маркирования выключателей и других органов управления, функционирование которых может вызвать опасность для человека.



При разработке новых и применении имеющихся условных графических знаков конструктор должен знать, что легче различаются и распознаются геометрические объекты, состоящие из небольшого количества элементов и образованные прямыми линиями. Многоугольники и фигуры, сформированные криволинейными элементами, различаются хуже.

В общем случае время распознавания условного знака зависит от его углового размера, сложности, световых и цветовых характеристик.

По сложности знаки условно можно разделить на три группы: *простые* (рис. 4.35, а), *средней сложности* (рис. 4.35, б) и *сложные* (рис. 4.35, в). Как видно из рис. 4.35, конфигурация простых знаков определяется только внешним контуром. У знаков средней сложности дополнительную деталь располагают внутри или снаружи контура, у сложных знаков несколько дополнительных деталей размещают и внутри и снаружи.

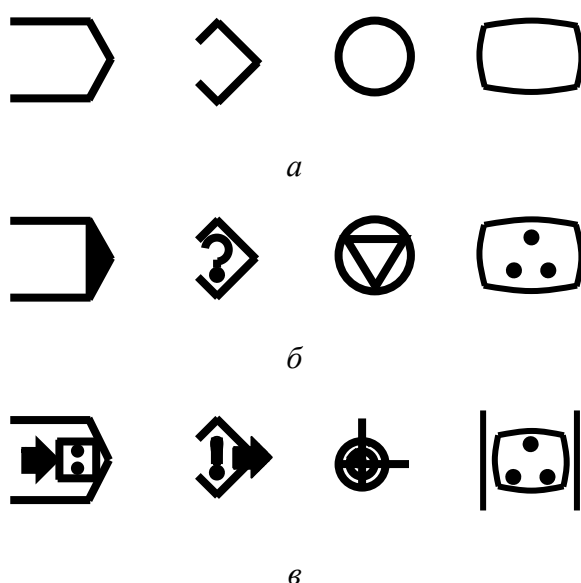


Рис. 4.35. Условные знаки разной сложности

Таблица 4.11

**Угловые и контрастные характеристики знаков разной сложности**

| Параметр                    | Сложность знака |            |            |
|-----------------------------|-----------------|------------|------------|
|                             | Простой         | Средний    | Сложный    |
| Угловой размер контура, мин | $18 \pm 1$      | $21 \pm 1$ | $35 \pm 2$ |
| Угловой размер детали, мин  | —               | $4 \pm 1$  | $6 \pm 1$  |
| Контраст                    | $0,75 \pm 0,05$ | 0,85       | 0,9        |

Понятно, что чем сложнее знак, чем больше входящих в него элементов, тем больше времени требуется на его считывание. Поэтому для знаков различной сложности требуются разные предельные угловые размеры и различная величина контраста.

Рекомендуемые параметры условных графических знаков приведены в табл. 4.11.

Толщина линий контура определяется не только размером знака и типом выбранного шрифта, но и возможностью нести дополнительную информацию.

### 4.18.3. Цветокодировка

*Кодирование цветом* является эффективным способом передачи информации, особенно в случаях, когда надписи слишком длинны и требуют много времени для их чтения или когда их трудно или невозможно прочитать на расстоянии.

В основном кодирование цветом применяется:

- для привлечения внимания;
- предупреждения о возможной опасности;
- предписания и разрешения определенных действий с целью обеспечения безопасности;
- быстрой идентификации рабочего процесса (например, для медицинской аппаратуры);
- кодирования информации для автоматизированного считывания (маркирование ЭРЭ);
- кодирования информации, когда другая маркировка не возможна или громоздка (маркирование ЭРЭ, электрических линий связи и т. д.).

Для достижения первых трех целей окрашивают цветом соответствующие знаки, таблички, планки с надписями. Применяемые для этой цели цвета называют *сигнальными*. Их четыре: *красный, желтый, синий и зеленый*. Такой выбор не случаен. Выяснено, что только четыре цветовых тона не воспринимаются как смеси. Они называются *единичными (унитарными) цветовыми тонами*: единичный красный, единичный желтый, единичный зеленый и единичный синий. Все другие цветовые тона рассматриваются как смеси следующих пар: единичного зеленого и единичного желтого (желтовато-зеленые и зеленовато-желтые), единичного желтого и единичного красного (красновато-желтые и оранжевые), единичного красного и единичного синего (синевато-красные, пурпурные и фиолетовые), единичного синего и единичного зеленого (зеленовато-синие и голубовато-зеленые).

Назначение сигнальных цветов в соответствии с ГОСТ Р12.4.026 приведено в [табл. 4.12](#).

Для усиления контраста сигнальных цветов их применяют на фоне *контрастных цветов*. Последними выполняют символы и поясняющие надписи, если основной фон сигнального цвета.

На [рис. 4.36](#) приведен пример цветокодовой маркировки контрастного типа органов регулировки (подстроечных резисторов), расположенных на плате цветного телевизора. Эти резисторы предназначены для сведения вертикальных и горизонтальных линий различных цветов.

Таблица 4.12

**Виды сигнальных и контрастных цветов**

| Сигнальный цвет | Смысловое значение                                             | Область применения                                                                          | Контрастный цвет |
|-----------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Красный         | Непосредственная опасность                                     | Запрещение опасного поведения или действия                                                  | Белый            |
|                 |                                                                | Обозначение непосредственной опасности                                                      |                  |
|                 | Аварийная или опасная ситуация                                 | Сообщение об аварийном отключении или аварийном состоянии оборудования                      |                  |
|                 | Пожарная техника, средства противопожарной защиты, их элементы | Обозначение мест нахождения пожарной техники, средств противопожарной защиты, их элементов  |                  |
| Желтый          | Возможная опасность                                            | Обозначение возможной опасности, опасной ситуации                                           | Черный           |
|                 |                                                                | Предупреждение, предостережение о возможной опасности                                       |                  |
| Зеленый         | Безопасность, безопасные условия                               | Сообщение о нормальной работе оборудования                                                  | Белый            |
|                 | Помощь, спасение                                               | Обозначение пути эвакуации, аптек, кабинетов, средств по оказанию первой медицинской помощи |                  |
| Синий           | Предписание во избежание опасности                             | Требование обязательных действий в целях обеспечения безопасности                           | Белый            |
|                 | Указание                                                       | Разрешение определенных действий                                                            |                  |

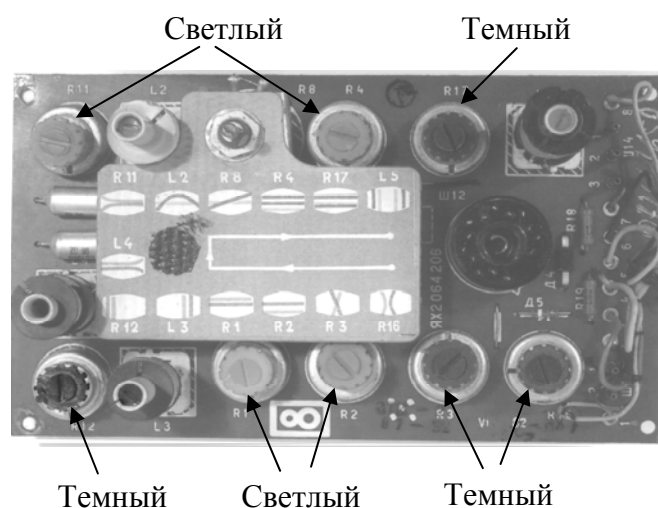


Рис. 4.36. Цветокодовая маркировка органов настройки

Таблица 4.13

### Стандартные буквенные коды цветов

| Цвет                    | Буквенный код     |                 |
|-------------------------|-------------------|-----------------|
|                         | Латинский алфавит | Русский алфавит |
| Черный                  | BK                | Ч               |
| Коричневый              | BN                | КЧ              |
| Красный                 | RD                | К               |
| Оранжевый               | OG                | Ж               |
| Желтый                  | YE                | Ж               |
| Зеленый                 | GN                | З               |
| Синий (включая голубой) | BU                | С               |
| Фиолетовый (пурпурный)  | VT                | Ч               |
| Серый (синеvато-серый)  | GY                | Б               |
| Белый                   | WH                | Б               |
| Розовый                 | PK                | К               |
| Золотой                 | GD                | ЗЛ              |
| Бирюзовый               | TQ                | БЗ              |
| Серебряный              | SR                | СР              |
| Зелено-желтый           | GNYE              | ЗЖ              |

**П р и м е ч а н и е.** Как предпочтительный вариант можно применять строчные буквы с тем же значением.

Как видно из [рис. 4.36](#), цвета ручек резисторов разного назначения различны: для вертикальных – темного цвета, для горизонтальных – светлого. Подобное решение упрощает процесс регулировки изделия.

В соответствии с ГОСТ 28763 при маркировании изделий применяются кодовые обозначения цветов, приведенные в [табл. 4.13](#).

В случае необходимости кодирования других применяемых цветов соответствующий код определяется разработчиком в дополнительной докумен-

тации. Сочетание цветов обозначается непосредственным присоединением кодов для различных цветов в последовательности, приведенной в [табл. 4.13](#).

**П р и м е р.** Двухцветный красно-синий элемент: RDBU (КС – для русского алфавита).

Если различные элементы окрашены по-разному, то коды для различных цветов отделяются знаком «плюс».

**П р и м е р.** Пятижильный кабель с двумя черными жилами, одной коричневой, одной синей и одной зелено-желтой:

$$BK + BK + BN + BU + GNYE,$$

или для русского алфавита:

$$Ч + Ч + КЧ + С + ЗЖ.$$

#### 4.19. Построение систем кодирования зрительной информации

Существует ряд независимых параметров, по которым должны строиться и оцениваться кодовые сигналы: вид алфавита (или категория кода), длина алфавита, мерность кода, компоновка кодовых знаков и групп.

Основой любой системы кодирования является **алфавит кода – знаки, используемые в заданной системе кодирования.**

**Кодирование – процесс присвоения кодового обозначения изделию или замены надписей символами** (например, цветокодовое кодирование ЭС).

Алфавит может быть одномерным или многомерным. В последнем случае в одном знаке объединяются несколько видов алфавита. Под *мерностью кода* понимается количество значимых и меняющихся параметров сигнала. С помощью многомерных сигналов можно передать одновременно значительно больше информации, чем с помощью одномерного.

Если кодовое обозначение состоит из нескольких знаков, то его структура (по ГОСТ 21829) выстраивается таким образом, чтобы крайние знаки несли наиболее важную информацию.

Под *длиной алфавита* понимается количество знаков, которое принадлежит тому или иному способу кодирования. Длина алфавита определяет динамический объем характеристик объекта, который можно описать с помощью данного алфавита.

**Выбор вида алфавита.** Для кодирования количественной и качественной визуальной информации, наносимой на изделия ЭС, применяются основные виды алфавита или кодовые категории, приведенные на [рис. 4.37](#). При этом каждый алфавит имеет свое *основание кода* – минимальное число зна-

КОВ.

Применительно к зрительному поиску преимущество имеют кодовые категории *цвета* и *формы*, обеспечивающие минимальное время поиска объектов. Наименьшую точность имеет идентификация по размеру.

*Форма* используется для кодирования класса и вида объекта (действия). Ее вид должен опираться на профессиональные привычки и знания пользователя аппаратуры. Для данного алфавита основой классификационного признака является *контур*, который по возможности должен быть ориентирован по основным, привычным для человека, пространственным осям: вертикальной и горизонтальной.

Следует отметить, что **форму по признаку «прямое-зеркальное отображение» нельзя использовать для отличия знаков.** Исключение составляют знаки, определяющие пространственную ориентацию или направленность типа вверх-вниз, вправо-влево, вперед-назад ([рис. 4.38](#)).

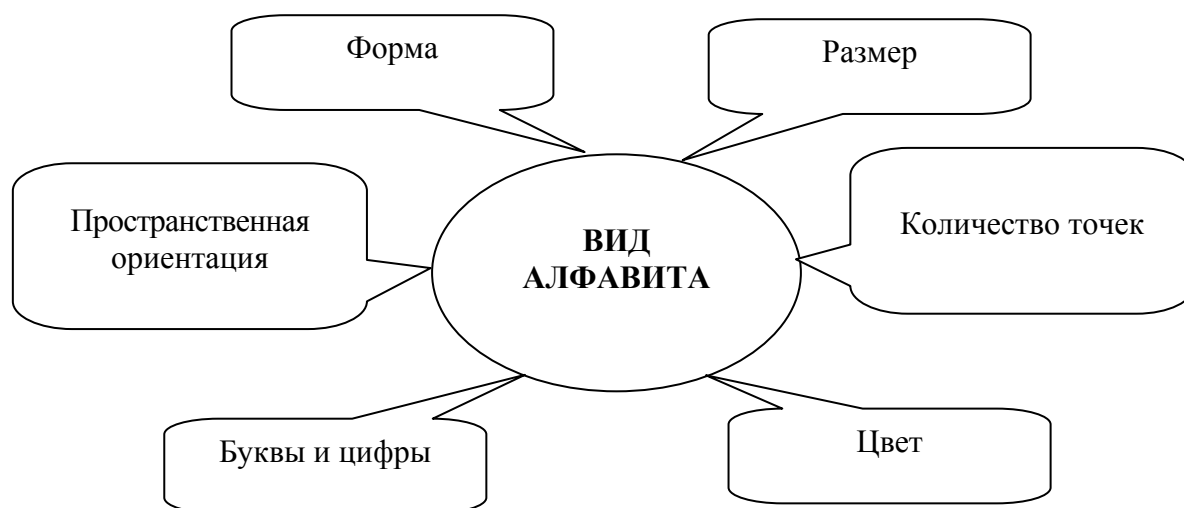


Рис. 4.37. Виды алфавитов кода



Рис. 4.38. Применение зеркального отображения для распознавания знака

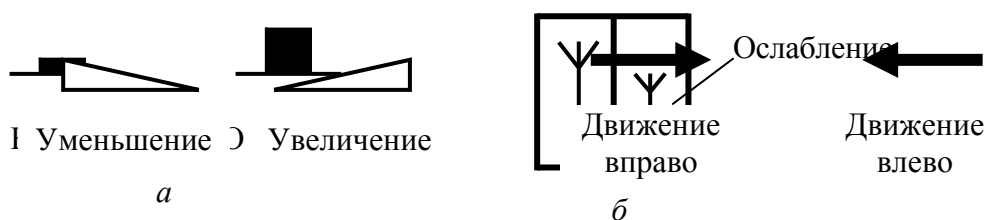


Рис. 4.39. Применение размера в качестве алфавита кода

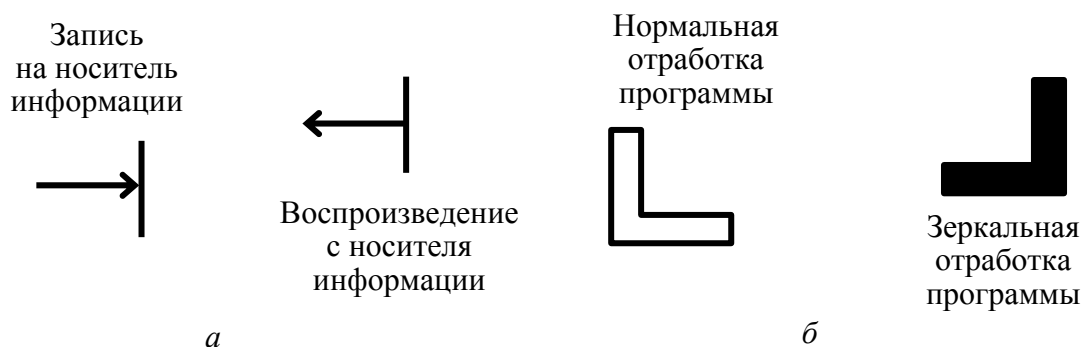


Рис. 4.40. Применение пространственной ориентации для кодирования информации

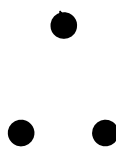


Рис. 4.41. Применение точек для кодирования информации

*Размеры* как код передачи информации используют, устанавливая соответствия между площадью и/или линейными размерами знаков с характеристиками объекта (размером, положением, мощностью сигнала, удаленностью и т. д.).

Пример таких знаков приведен на [рис. 4.39](#): для обозначения положения кнопочного переключателя ([рис. 4.39, а](#)) и ослабления принимаемого сигнала ([рис. 4.39, б](#)).

При выборе соотношений предпочтительно, чтобы шкала размеров менялась в геометрической, а не в арифметической прогрессии. Величина основания кода для данного алфавита – 5.

*Пространственную ориентацию* в основном используют для передачи информации о направлении движения, например вправо-влево. Для асимметричных фигур это достигается полным поворотом изображения или частичным ([рис. 4.40, а](#)) и зеркальным отображением ([рис. 4.40, б](#)).

Для усиления распознаваемости может быть изменен тип знака – с контурного на силуэтный ([рис. 4.40, б](#)). Величина основания кода для пространственной ориентации – 8.

*Количество символов*, например точек, обычно служит для обозначения числа объектов. Приведенный на [рис. 4.41](#) символ маркируется на аппаратуре цветного телевидения для обозначения соединителей, переключателей и регулирующих элементов цвета, не предназначенных для работы в черно-белом режиме. Этот символ указывает на применение трех основных цветов, используемых при формировании цветного изображения: *красного, синего и зеленого*.

Для данного алфавита оптимальная величина основания кода – 5. В этом случае время распознавания символа не превышает 0,1 с.

Если маркировка предназначена для автоматизированного считывания информации, то основание кода не ограничено, например для штрихкодовой маркировки.

*Буквенно-цифровой алфавит* служит для передачи информации о количественных параметрах объекта, классов и типов объектов. Параметры знаков (высота, ширина и толщина линии обводки шрифта) должны быть однотипными в пределах одного изделия (за исключением логотипов фирм-изготовителей) и выбираться из значений, установленных для конкретного шрифта (например, по ГОСТ 26.008, ГОСТ 26.020 и т. д.). Этот алфавит имеет неограниченное количество комбинаций обозначений.

*Цветовым алфавитом* обычно передается информация о состоянии или значимости объекта. Обычно основание кода для данного алфавита принимается равным 11 (количество цветовых тонов и яркостей). Цветовых тонов, как правило, пять: зеленый, красный, голубой, желтый и фиолетовый.

Этот код применяют при ахроматическом освещении (обычно белым цветом), поскольку цветоощущение зависит от параметров общего освещения.

Согласно ГОСТ 21829 используют три основных цветовых тона. Назначение кодовых цветов приведено в [табл. 4.14](#). В общем случае оно соответствует назначению сигнальных цветов ([см. табл. 4.12](#)).

Таблица 4.14

#### Назначение кодовых цветов

| Рекомендуемый цвет кода |                | Категория информации                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| основной                | дополнительный |                                                                                                                                                                                                         |
| Желтый                  | Белый          | Предупреждающая информация осведомительного характера. Содержит сведения об обстановке (исключая аварийную) и рекомендации для принятия мер, оставляя за оператором право выбора окончательного решения |
| Зеленый                 | Синий          | Предупреждающая информация командного характера. Требуется или разрешает выполнение определенных действий                                                                                               |
| Красный                 | Оранжевый      | Запрещающая информация аварийного характера. Накладывает строгие ограничения на выполнение или запрещение тех или иных действий. Указывает на неготовность или неисправность контролируемого объекта    |

В электротехнической аппаратуре в соответствии с ГОСТ 12.2.007.0 может быть применен белый цвет для обозначения включенного состояния выключателя, когда применение красного, зеленого и желтого цветов недопустимо или невозможно. Синий цвет применяется в специальных случаях: когда не могут быть применены красный, зеленый, желтый и белый цвета.

Дополнительный цвет используют для выделения особо важной информации или ее разделения внутри алфавита. Например, для медицинской



стоматологической аппаратуры знаки управления воздухом маркируются зеленым, знаки управления водой – синим.

При маркировании шкал рекомендуется использовать не более четырех цветов в пределах одной шкалы.

Минимальная яркость цветowych знаков должна составлять 10 кд/м<sup>2</sup>, оптимальная – 170 кд/м<sup>2</sup>, а в условиях темновой адаптации минимальная яркость 70 кд/м<sup>2</sup>.

Независимо от выбранного алфавита при конструировании символов необходимо учитывать следующие рекомендации:

- изображение, для быстрого распознавания, по стилю должно быть ассоциативно действию или процессу;
- знак должен быть хорошо различим и представлять собой замкнутую фигуру;
- дополнительные детали должны быть унифицированы;
- дополнительные детали не должны пересекать или искажать основной классифицирующий признак;
- дополнительные детали желательно располагать внутри основного символа;
- в графический символ не должна включаться текстовая часть;
- угловой размер графического символа должен составлять 45–60°;
- угловой размер цветового знака должен составлять 35–45°.

Дополнительно, в зависимости от формы изображения, предъявляются следующие требования:

- *при контурной форме:*
  - каждая линия символа должна быть толщиной от 2 до 4 мм;
  - расстояние между линиями не должно быть меньше, чем полторы толщины основной линии контура;
  - углы между линиями должны быть не менее 30°;
- *при силуэтной форме:*
  - слишком мелкие детали не допускаются;
  - элементы типа «негатив-позитив» желательно не применять в качестве отличительных признаков.

## Контрольные вопросы

1. Что такое компоновка ЭС?
2. Что является основной задачей компоновки?
3. Какие методы компоновочных работ вы знаете?
4. Проведите сравнительный анализ модельных и аналитических методов компоновочных работ, перечислите достоинства и недостатки.
5. По каким принципам осуществляется организация элементов на лицевых панелях? Приведите примеры.
6. Какими основными параметрами характеризуется такой орган чувств, как зрение?
7. Назовите характеристики зрительного анализатора.
8. Каковы общие требования к проектированию отсчетных устройств?

## 5. НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭС

[5.1. Иерархия несущих конструкций.](#)

[5.2. Компоновка блоков.](#)

[5.3. Конструкции блоков.](#)

[5.4. Зарубежные несущие конструкции ЭС.](#)

[5.5. Характеристика защиты от внешних воздействий корпусом.](#)

[5.6. Основные конструкционные материалы.](#)

[Контрольные вопросы.](#)

Л и т е р а т у р а: [[2](#),[13](#), [21](#), [24](#), [29](#), [34](#),[43](#), [44](#),[50](#)].

### 5.1. Иерархия несущих конструкций

Каждому иерархическому уровню соответствует своя несущая конструкция, являющаяся, по сути, скелетом, на котором располагаются ЭРЭ, коммутационные элементы, органы управления, электрический монтаж и т. п. Без них невозможно выполнение основных функций, возложенных на ЭС, по передаче, хранению и преобразованию информации ([рис. 5.1](#)).

**Несущая конструкция – это элемент конструкции или совокупность элементов, предназначенные для размещения в ней составных частей ЭС и обеспечения их устойчивости к различным воздействиям в заданных условиях эксплуатации.**

Несмотря на большое разнообразие несущих конструкций, отличающихся размерами, типом исполнения, применяемыми материалами и т. д., существует некоторое единое организационное построение, обуславливающее конструктивную совместимость при переходе от одного конструктивного уровня к другому. Иначе говоря, должно существовать ограниченное число типоразмеров печатных плат, встраиваемых в ячейки, – конструктивные (КУ) или функциональные узлы (ФУ). Блок (субблок) также предназначен для размещения только определенного числа ячеек. Естественно, что и в шкафу количество встраиваемых несущих конструкций – блоков, ячеек и пр. – бесконечно.

Типовые несущие конструкции, в которых унифицированы элементы конструкции и размеры каждого конструктивного уровня, называются *базовыми*. Существует несколько видов базовых несущих конструкций, отличающихся принципами построения модульного ряда входящих конструктивных элементов.

Например, для построения радиоэлектронной аппаратуры в модульном исполнении существует иерархическая структура следующего вида.

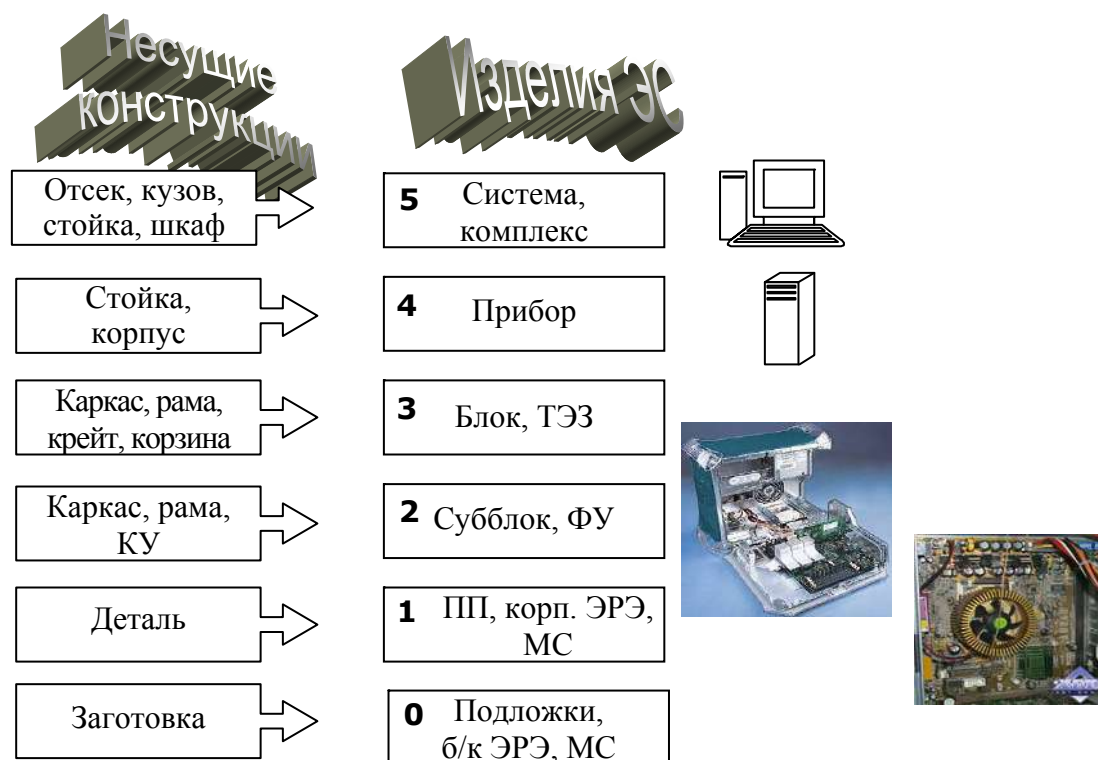


Рис. 5.1. Иерархическое построение несущих конструкций

*Радиоэлектронный модуль:*

- третьего уровня – РЭМ III;
- второго уровня – РЭМ II;
- первого уровня – РЭМ I;
- нулевого уровня – РЭМ 0.

РЭМ III – функционально законченный радиоэлектронный (РЭ) шкаф или пульт (стойка), выполненный на основе базовой несущей конструкции 3-го уровня (БНК III) и обладающий свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости, а также эксплуатационной автономией.

РЭМ II – функционально законченный РЭ-блок (или рама), выполненный на основе БНК II, обладающий свойствами конструкционной и функциональной взаимозаменяемости.

РЭМ I – функционально законченная РЭ-ячейка, выполненная на основе БНК I, обладающая свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости.

РЭМ 0 – элементная база.

Существуют конструкционные системы под условными названиями:

- «Надел» – электроизмерительные приборы;
- «Сервис» – универсальные рабочие места операторов;
- «База-1» – для стационарной аппаратуры связи;
- «База-2» – для морской, возимой ЭС;

- «База-3» – для ЭС различного функционального назначения;
- «База-4» – для магистральных, кабельных, коммутационных ЭС.

## 5.2. Компоновка блоков

Под *компоновкой блоков* подразумевают взаимное расположение и взаимную ориентацию конструктивных элементов блока: ячеек, элементов электромонтажа, механических элементов крепежа, рамок, деталей корпусов и т. д. Блоки, как правило, имеют прямоугольную форму, за исключением блоков бортовой и космической аппаратуры, когда их геометрическая форма определяется формой отводимых под радиотехнические средства отсеков.

*Главными задачами разработки конструкции блока являются:*

- выбор рационального варианта компоновки ячеек в блоке;
- обеспечение минимальных длин, массы и габаритов электрической коммутации;
- обеспечение нормальных тепловых режимов, защиты от воздействий внешней среды;
- снижение материалоемкости, стоимости.

*Необходимым условием выбора компоновочной схемы блока является решение вопросов унификации, упрощения конструктивных решений и технологии формообразования деталей блока.*

Детали несущих конструкций блоков обеспечивают размещение, механическое крепление, защиту от дестабилизирующих воздействий ячеек, установку блоков в шкафах, стойках и стеллажах. В настоящее время с появлением большой номенклатуры недорогих прессованных и прокатных профилей находят широкое применение профильно-сборные конструкции.

На схемах компоновки блоков рис. 5.2 показаны варианты пространственной ориентации ячеек. Варианты 2, 6 не обеспечивают хороший теплоотвод от ячеек как при естественном, так и при принудительном охлаждении. Для разъемных конструкций блоков с большим числом ячеек предпочтительны варианты 1, 3, для книжных конструкций – 4, 5. Число выходных контактов с одной ячейки, как показывает практика проектирования, – от 60 до 80 и имеет тенденцию к увеличению. С этой точки зрения для блоков разъемной конструкции более пригоден вариант 1 компоновки, а для блоков книжной конструкции – вариант 4. В то же время вариант 5 книжной конструкции обеспечивает максимальную плотность компоновки интегральных микросхем (ИМС) в блоке.

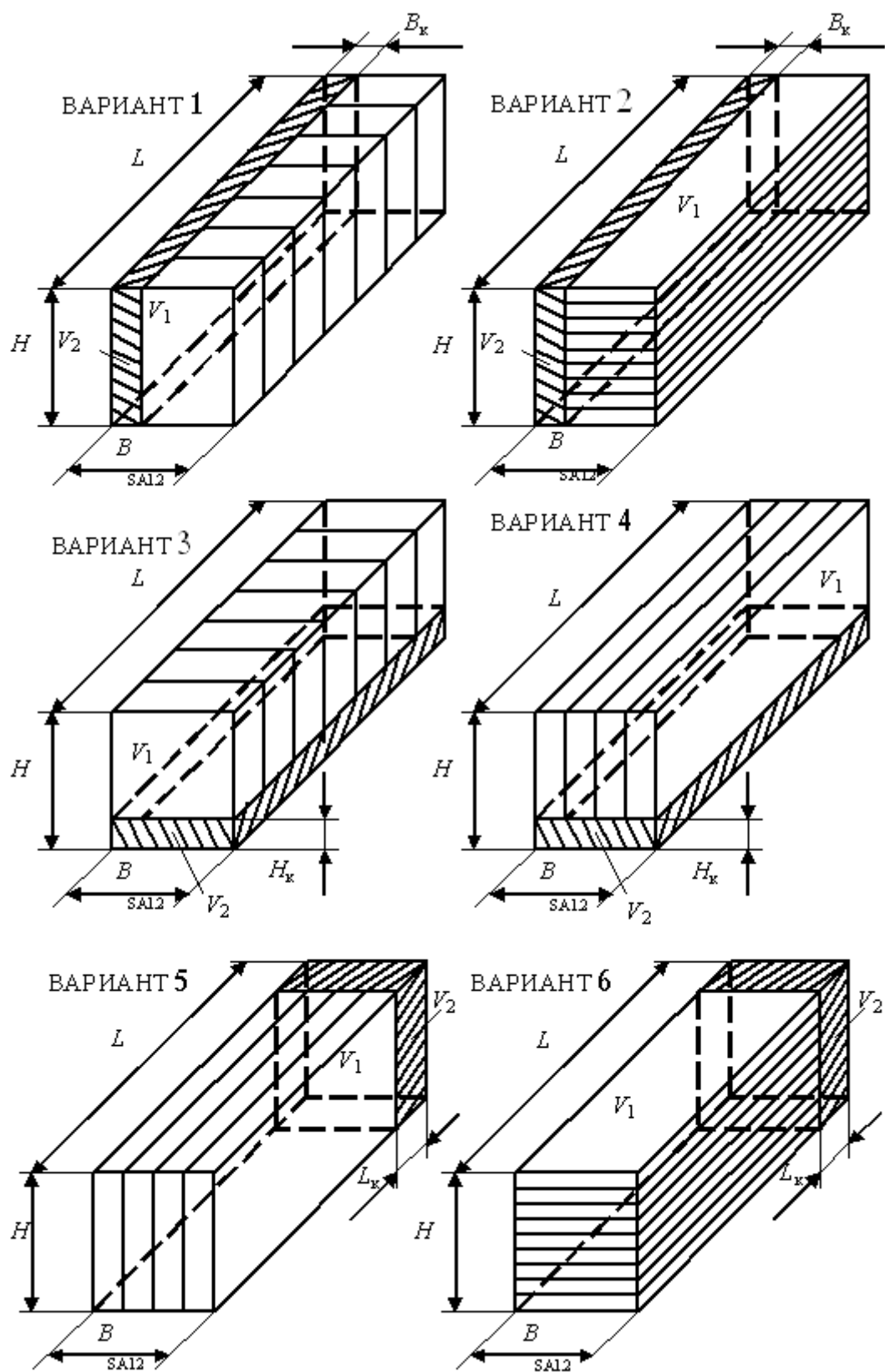


Рис. 5.2. Схемы компоновки блоков:  $L$ ,  $H$ ,  $B$  – длина, высота и ширина блока;  $L_k$ ,  $H_k$ ,  $B_k$  – части блока, занимаемые элементами внутри блочной коммутации

Соотношение геометрических размеров блока – длины, ширины и высоты – для каждого из рассмотренных вариантов компоновки определяет соотношение геометрических размеров ячеек, а последние, в свою очередь, определяют длину электромонтажных связей в ячейке, ее помехоустойчивость, шаг установки ИМС. Практика показывает, что ширина  $B$  блоков книжной конструкции не должна быть меньше 120 мм. Для блоков разъемной конструкции варианта 1 компоновки должно быть  $H \geq 180$  мм,  $B \geq 120$  мм, варианта 3 –  $H \geq 180$  мм,  $B \geq 180$  мм. При этом нужно учитывать, что электрические соединители ячеек занимают в блоках зону, равную 25–35 мм (на [рис. 5.2](#) заштрихована), что увеличивает одну из сторон блока в зависимости от выбранного варианта компоновки; жгутовые соединения, гибкие печатные шлейфы и коммутационные платы увеличивают размеры блока еще на 15–20 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Воздушная система охлаждения при естественной конвекции требует для своей реализации 6–8 мм зазоров между ячейками; воздушная система принудительного охлаждения позволяет сократить зазоры между ячейками до 2 мм, но требует увеличения объема блока на 10–15 % для установки вентилятора или воздуховодов.

Дополнительные конструктивные теплостоки (радиаторы, теплоотводящие шины, ребра корпусов) также увеличивают габариты блоков на 20–25 %. Кроме того, на размеры блоков влияют способ изготовления несущих конструкций и метод герметизации.

### 5.3. Конструкции блоков

Наибольшее распространение получили блоки разъемной ([рис. 5.3](#)) и книжной ([рис. 5.4](#)) конструкций. В обоснованных случаях используют этажерочную ([рис. 5.5](#)), планшетную ([рис. 5.6](#)) или кассетную (веерную) конструкции.

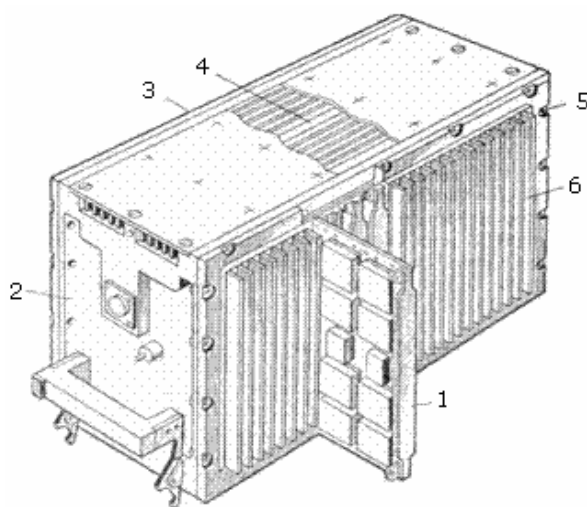


Рис. 5.3. Блок разъемной конструкции: 1 – ячейка; 2 – корпус; 3 – боковая крышка; 4 – средняя стенка; 5 – болт крепления; 6 – ребристый теплоотвод



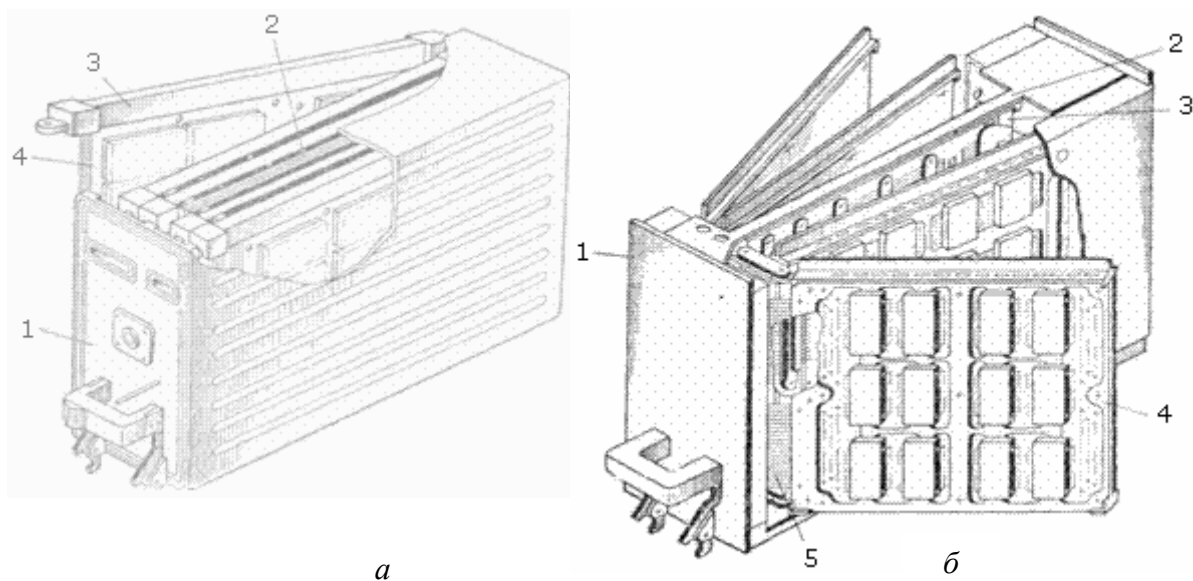


Рис. 5.4. Блоки книжной конструкции с вертикальной осью раскрытия при естественном (а) и принудительном (б) воздушном охлаждении: 1 – передняя панель; 2 – средняя рама; 3 – воздуховод; 4 – ячейка; 5 – коммутационная панель

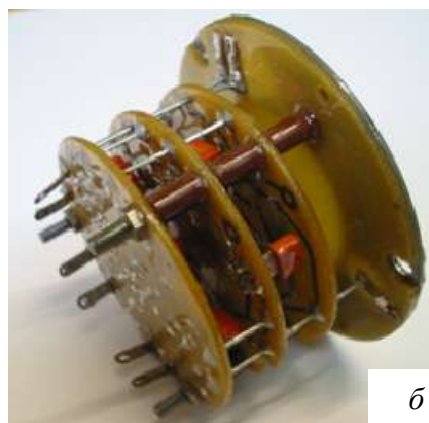


Рис. 5.5. Блоки этажерочной конструкции: а – герметичный; б – специальной формы; в – модуль блока питания



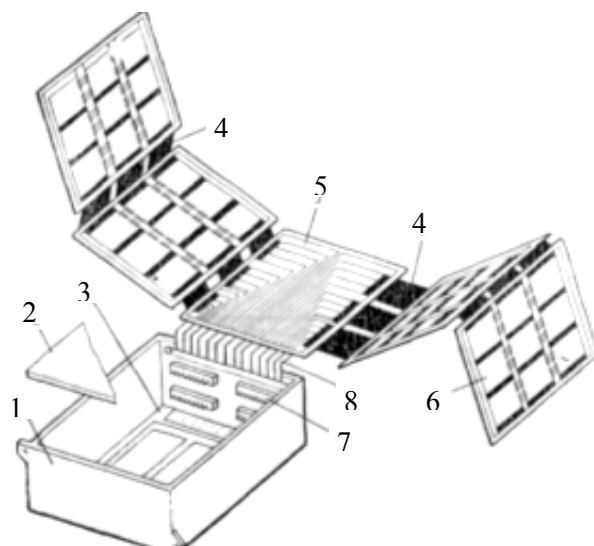
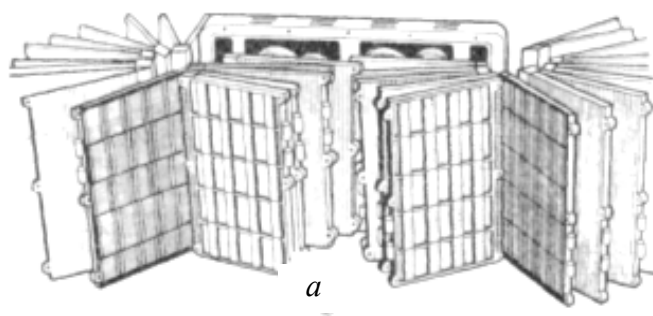
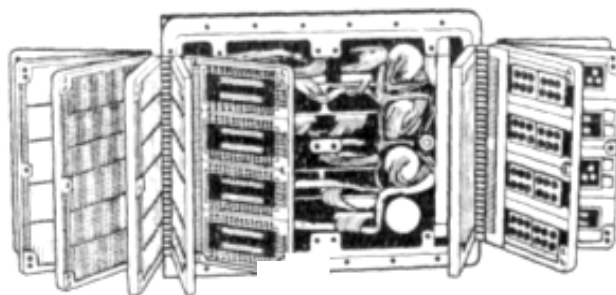


Рис. 5.6. Общий вид развернутого блока бортовой ЭВМ: 1 – гермокорпус; 2 – крышка; 3 – плата вторичного источника питания; 4 – шлейф; 5 – коммутационная плата; 6 – ячейка; 7 – соединитель; 8 – плоский кабель



*а*



*б*

Рис. 5.7. Герметичные блоки книжной конструкции:  
*а* – на ячейках с печатными платами;  
*б* – на ячейках с использованием металлических рамок

Основными достоинствами книжной компоновки блоков являются высокая плотность размещения ИМС и микросборок, легкий доступ к ним при ремонте, возможность контроля и регулировки устройств во включенном состоянии. Этим и объясняется широкое распространение блоков книжной конструкции ([рис. 5.7](#)).

## 5.4. Зарубежные несущие конструкции ЭС

Производство несущих конструкций, особенно из металлических материалов, представляет определенные трудности для изготовителей в связи с большими материалоемкостью и трудозатратами. Для решения этой проблемы изготовление несущих конструкций за рубежом производится в основном специализированными фирмами, такими как Bopla и Roze. Основным путем, по которому идет развитие несущих конструкций, предлагаемых указанными фирмами, – это производство таких конструкций, механическая обработка которых производителями ЭС сводилась бы к минимуму. Кроме того, предлагаемые конструкции унифицированы по модульному принципу в рамках системы ЕВРОМЕХАНИКА.

Основные принципы этой системы рассмотрим на корпусах стандарта 19", наиболее популярного для построения различных ЭС при кассетном исполнении субблоков.

Система ЕВРОМЕХАНИКА представляет собой модульный конструктив, который предназначен для размещения стандартных плат, кассет и конструкций, унифицированных по высоте, ширине и глубине. Для удобства в стандарте ЕВРОМЕХАНИКА приняты несколько опорных и рекомендуемых для повторения величин высоты, ширины и глубины. Так как ЕВРОМЕХАНИКА ведет свое начало от американских стандартов, то размерность всех величин изначально была установлена в дюймах, а далее, с распространением стандарта в Европе, многие величины были округлены для удобства использования метрической системы.

Конструктив ЕВРОМЕХАНИКА является международным стандартом, учитывающим тот факт, что в раму могут встраиваться изделия различных производителей. Для обеспечения совместимости все габариты несущих конструкций имеют необходимые допуски, позволяющие учитывать отклонения размеров при производстве и сборке конструктивов ЕВРОМЕХАНИКА и печатных плат для них.

Стандарт ЕВРОМЕХАНИКА имеет следующую систему отдельных элементов.

*Конструктив (Sistem)* – совокупность отдельных элементов системы ЕВРОМЕХАНИКА, составляющих целостную механическую конструкцию, которая может подвергаться изменениям и дополнениям без механической обработки отдельных конструктивных элементов.

*Рама (Baugruppentraeger)*, также называемая *корзиной* или *крейтом*, предназначена для установки путем выдвижения по направляющим печатных плат или кассет с последующим их закреплением каким-либо способом на раме. Слева и справа на раме закреплены фланцы, имеющие готовые стандартные отверстия для закрепления рамы в стойке.

*Направляющая (Kartenfuehring)* – пластиковый или металлический желобок, закрепляемый на раме и служащий для фиксации печатной платы или кассеты.

*Кассета (Kassete)* –двигаемый по направляющим в раму, конструктивно законченный элемент, состоящий из защитной оболочки, внутри которой размещается одна или несколько печатных плат или иных электромеханических конструкций. Габаритные размеры кассеты соответствуют стандартным системы ЕВРОМЕХАНИКА.

*Плата (Druckplatte)* – печатная плата,двигающаяся по направляющим в раму и имеющая стандартные и произвольные габариты и стандартные или нестандартные разъемы для подключения к кросс-плате или кросс-шине.

*Лицевая панель (Frontpanel)* – прямоугольная панель из металла или пластика, часто являющаяся одновременно держателем печатной платы или заглушкой и имеющая по углам отверстия для крепления на раме.

*Стойка (Gestell)* – изделие, являющееся кожухом для рамы. Габариты стойки могут быть различными, но она может наращиваться только по высоте и никогда по ширине. Стойка в настольном варианте выполняется в виде прибора, а при закреплении на стене превращается в настенный пульт.

Гибкость системы ЕВРОМЕХАНИКА достигается следующими конструктивными изменениями:

- изменение высоты конструктива со стандартным шагом;
- изменение глубины рамы или стойки (выпускаются рамы или стойки нескольких стандартных глубин);
- изменение форматов рам (преобразование рамы высотой 3HE в подсистемы для размещения плат и кассет формата 6HE и наоборот и т. п.);
- заполнение стоек рамами со стороны лицевой и задней панелей одновременно;
- размещение в рамах или кассетах металлических конструкций от систем и конструктивов другого типа;
- частичное заполнение стоек рамами или рам платами или кассетами и размещение в оставшемся объеме узлов и блоков от других систем.

В системе ЕВРОМЕХАНИКА принят интерфейс разъемов стандарта DIN 41612 (в России аналогами этих разъемов являются СНП59). Для плат стандартной высоты 3HE устанавливается один разъем, для плат стандартной высоты 6HE – два. Некоторые стандартные кассеты приспособлены для установки двух и более стандартных плат, и тогда вся кассета может содержать 2–4 и более стандартных разъемов. Минимальное расстояние между направляющими в системе ЕВРОМЕХАНИКА ограничено физическими размерами разъемов (их шириной). Это необходимо учитывать для кассет с одной и более платами.

Для стандарта ЕВРОМЕХАНИКА обычно используются два варианта кросс-системы разъемов: кросс-плата с печатным сочленением разъемов и шинная структура или кросс-система из разъемов, привинчиваемых на специальные посадочные места и соединенных в шинную систему. Например,

пайкой, накруткой или каким-либо иным способом. Конструктивно система ЕВРОМЕХАНИКА допускает применение и других разъемов, но при этом теряется совместимость с изделиями других производителей.

Для удобства конструкторов большая часть размеров в системе ЕВРОМЕХАНИКА выражается в условных единицах, связанных с метрической системой мер, но значительно более удобных.

*Ширина рамы* измеряется в единицах ширины  $TE$  (*Teileinheit*).  $TE = 5,08$  мм (0,2").

*Единицей высоты рам и печатных плат* является условная единица  $HE$  (*Hocheinheit*). В американской литературе принято обозначение для единицы высоты  $U$  (*Unit*):  $U = HE = 44,45$  мм.

Величины  $TE$  и  $HE$  не могут быть уменьшены (неделимы), но допускают производство над собой других целочисленных математических операций.

*Единица измерения глубины* составляет 60 мм.

**Стандартные размеры печатных плат.** Ширина платы  $B$  вычисляется по формуле  $B = N \times HE = 33,35$  мм.

Стандартная плата  $3HE$ : ширина 100 мм, соответственно для платы  $6HE$  ширина 233,35 мм. Реально указывается ширина 233 или 233,5 мм. Эти величины соответствуют допуску при изготовлении плат.

Все остальные ширины печатных плат являются специальными и определяются конкретным разработчиком системы на базе системы ЕВРОМЕХАНИКА.

Величины длин плат определены стандартным рядом ЕВРОМЕХАНИКА: 100, 160, 220, 280 мм.

Плата с габаритами  $100 \times 160$  мм называется *европлатой*, плата с габаритами  $233 \times 160$  мм называется *двойной европлатой*. Платы с габаритами  $100 \times 100$  мм,  $100 \times 220$  мм,  $100 \times 280$  мм хотя и допустимы стандартом, но получили очень малое распространение.

*Максимальная ширина рамы* рассчитывается как  $19 \times 25,4$  мм = 482,6 мм (19"). Это расстояние от края до края, включает в себя полезную ширину рамы.

*Максимально полезная ширина для встраивания плат* рассчитывается как  $84 \times TE$  (5,08 мм) = 426,72 мм. Широко распространены рамы шириной  $42TE$ ,  $63TE$ ,  $84TE$ .

*Высота рамы* рассчитывается как  $N \times HE - 0,8$  мм.

**П р и м е р.** Рама высотой  $3HE$  имеет высоту 132,55 мм, высотой  $6HE$  – 265,9 мм. Разумеется, никто не выпускает рамы с точностью размеров до 0,1 мм. Обычно все величины округляются до значений удобных в производстве, но так, чтобы изделие было совместимо со стандартными узлами других производителей.

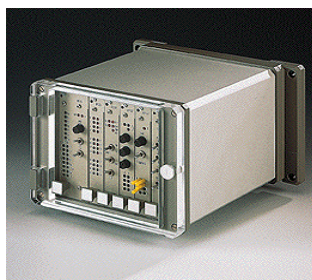


Рис. 5.8. Вид блока ЭС на основе несущей конструкции Profitronic 19

Необходимо учитывать, что при покупке рам, кассет, стоек и принадлежностей у одного производителя все конструктивные разбросы учтены и изделия подходят друг к другу оптимальным образом, т. е. без щелок, пазов и других элементов несоответствия размеров.

*Глубина рамы или стойки* вычисляется по формуле  $N \times 60 + 115,84$  мм.

*Ширина лицевых панелей* рассчитывается как  $N \times TE$  (мм).

На [рис. 5.8](#) приведена конструкция стандарта 19".

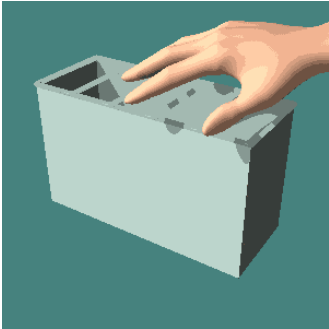
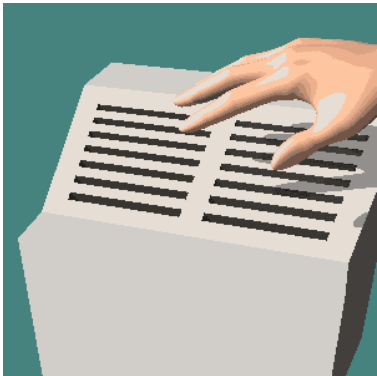
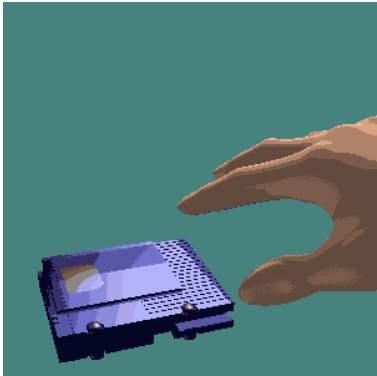
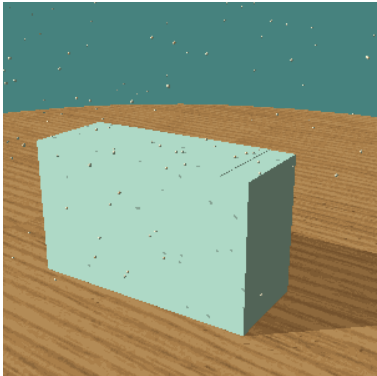
## 5.5. Характеристика защиты от внешних воздействий корпусом

Как было сказано выше, несущая конструкция (корпус) часто выполняет функции защиты от внешних воздействий, которую можно рассматривать с точки зрения защиты от проникновения предметов внутрь оболочки (в том числе от прикосновения к токоведущим частям приборов), а также с точки зрения влагозащиты. Поэтому на международном уровне разработаны критерии оценки степени защиты корпусом с указанных точек зрения.

Таблица 5.1

**Характеристика степеней защиты от воздействия пыли**

| Первая цифра | Краткое наименование и характеристика защиты                                                                                                 | Пример |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 0            | <p><b>Нет защиты</b></p> <p>Открытая конструкция, никакой защиты от пыли, никакой защиты персонала от прикосновения к токоведущим частям</p> |        |

| Первая цифра | Краткое наименование и характеристика защиты                                                                                                                                                                                                                                                                       | Пример                                                                                |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1            | <p><b>Защита от крупных предметов</b></p> <p>Защита от проникновения в конструкцию крупных предметов диаметром более 50 мм. Частичная защита от случайного касания токоведущих частей человеком (защита от касания ладонью)</p>  |    |
| 2            | <p><b>Защита от предметов среднего размера</b></p> <p>Защита от проникновения внутрь предметов диаметром более 12 мм. Защита от прикосновения пальцами к токоведущим частям</p>                                                 |   |
| 3            | <p><b>Защита от мелких предметов</b></p> <p>Конструкция не допускает проникновения внутрь предметов диаметром более 2,5 мм. Защита персонала от случайного касания токоведущих частей инструментами или пальцами</p>           |  |
| 4            | <p><b>Защита от песка</b></p> <p>В конструкцию не могут попасть предметы диаметром более 1 мм. Конструкция защищает от прикосновения к токоведущим частям инструментами или пальцами</p>                                       |  |

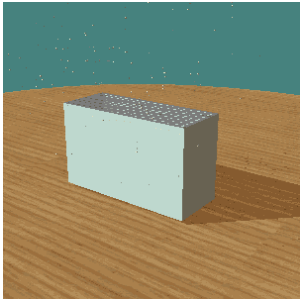
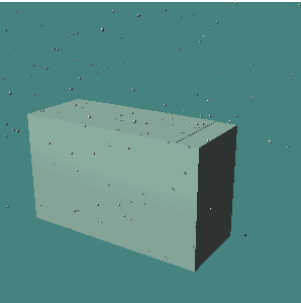
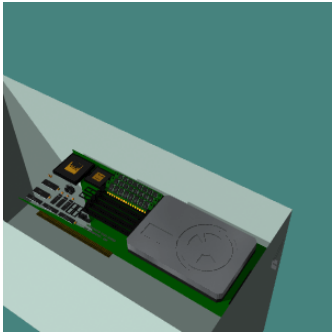
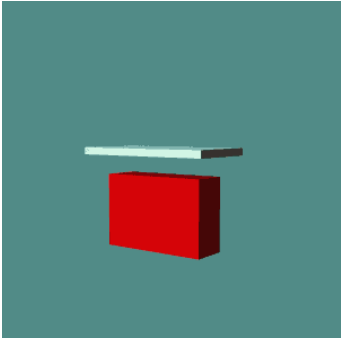
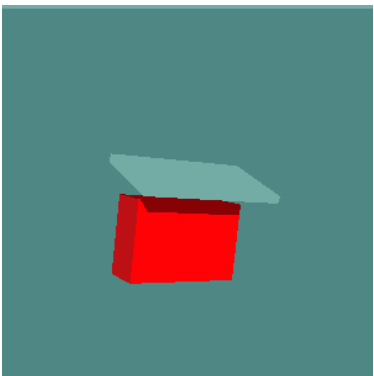
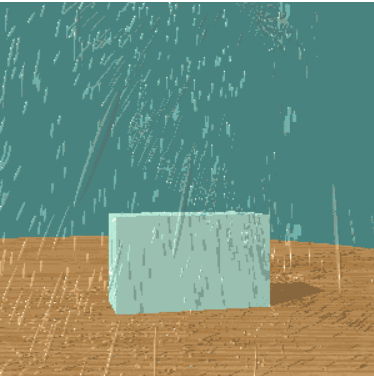
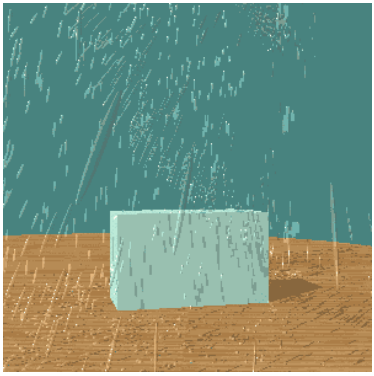
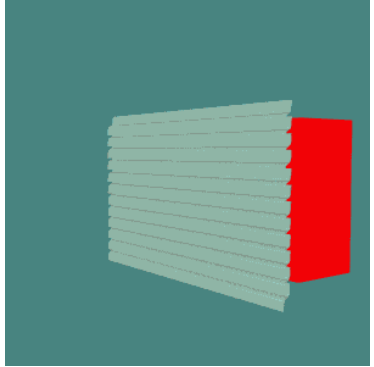
| Первая цифра | Краткое наименование и характеристика защиты                                                                                                                                                                                               | Пример                                                                              |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 5            | <p><b>Защита от накопления пыли</b></p> <p>Пыль может попасть в корпус в незначительном количестве, не препятствующем нормальной работе оборудования</p>  |  |
| 6            | <p><b>Полная защита от пыли</b></p> <p>Никакая пыль не может проникнуть внутрь конструкции</p>                                                            |  |

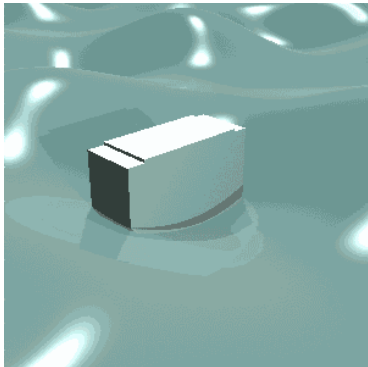
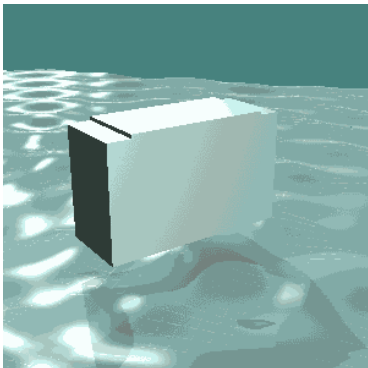
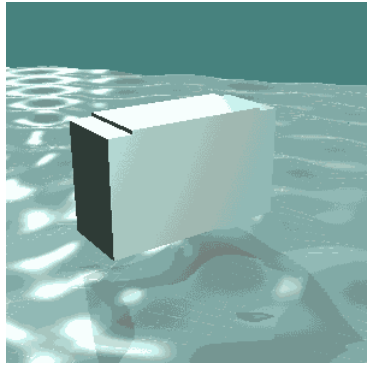
Таблица 5.2

## Характеристика степеней защиты от воздействия влаги

| Вторая цифра | Краткое наименование и характеристика защиты                                                                                                                                                                                            | Пример                                                                                |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 0            | <p><b>Нет защиты</b></p> <p>Нет защиты от брызг воды</p>                                                                                                                                                                                |  |
| 1            | <p><b>Защита от капель, падающих вертикально</b></p> <p>Капли воды, падающие вертикально, не могут вызвать опасных последствий для оборудования</p>  |  |

| Вторая цифра | Краткое наименование и характеристика защиты                                                                                                                                                                                                   | Пример                                                                                |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 2            | <p><b>Защита от капель, падающих под углом</b></p> <p>Капли воды, падающие под углом <math>15^\circ</math>, не могут вызвать опасных последствий</p>          |    |
| 3            | <p><b>Защита от брызг</b></p> <p>Изделие защищено от брызг воды, падающих под углом до <math>60^\circ</math></p>                                            |   |
| 4            | <p><b>Защита от брызг в любом направлении</b></p> <p>Конструкция защищена от брызг воды, которые могут быть направлены на изделие с любого направления</p>  |  |
| 5            | <p><b>Защита от струй воды</b></p> <p>Струи воды, направленные, например, из шланга, не причинят вреда размещенному в корпусе оборудованию</p>              |  |



| Вторая цифра | Краткое наименование и характеристика защиты                                                                                                                                                                                                                                                                         | Пример                                                                                |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 6            | <p><b>Защита от залива водой</b></p> <p>Залив оборудования водой, например на палубе корабля, не приводит к повреждению оборудования</p>                                                                                            |    |
| 7            | <p><b>Защита от погружения</b></p> <p>Корпус может быть полностью погружен в воду, что не приводит к повреждению размещенного в нем оборудования</p>                                                                              |   |
| 8            | <p><b>Защита от погружения в воду под давлением</b></p> <p>Конструкция выдерживает без последствий погружение в воду на определенную глубину (защита от воды под давлением, причем величина давления указывается специально)</p>  |  |

Характеристика степеней защиты International Protect (IP) приведена в [табл. 5.1](#) и [табл. 5.2](#).

Обозначение степени защиты производится в виде *IP XX*, где первая цифра *X* указывает степень защиты от проникновения пыли, а вторая – от влаги.

## 5.6. Основные конструкционные материалы

В конструкциях электронных средств используются разнообразные металлы, сплавы на их основе, пластмассы, резины, керамика и т. д. Выбор того или иного материала определяется в первую очередь их свойствами, назначением и стоимостью.

Во внимание принимаются такие свойства, как:

- плотность;
- обрабатываемость;
- рабочий температурный диапазон;
- коррозионные свойства;
- способность к нанесению покрытий и др.

### 5.6.1. Черные металлы и сплавы

К черным металлам и сплавам относят железо, стали и чугуны.

Чистое железо для конструкций ЭС, как правило, не используется. Основное применение имеют *стали* – сплав железа с углеродом. Стали, в зависимости от методов изготовления деталей, делятся на две группы: *литейные* и *конструкционные*.

Литейные стали применяются для получения литьем механически нагруженных изделий, например несущих конструкций антенн ([рис. 5.9](#)).

Конструкционные стали выпускаются в виде листового или фасонного проката (прутки, трубы, угольники и т. д.).



Рис. 5.9. Пример несущей конструкции антенны

Основные применяемые марки литейных сталей (ГОСТ 4543) – 15Л, ..., 55Л; 20ГЛ, 35ГЛ; 20Х13Л.

#### 5.6.1.1. Характеристика некоторых марок литейных сталей

Сталь 40ХЛ-Ш – сталь с нормируемыми химическим составом, пределом текучести и относительным удлинением.

Сталь 40Л-Ш – пластичная, сваривается, обрабатывается резанием, применяется для деталей сложной конфигурации при повышенных требованиях к механическим свойствам.

Сталь 20Х13Л применяется в легких условиях эксплуатации без покрытия.

#### 5.6.1.2. Конструкционные стали

Имеется несколько типов конструкционных сталей, выпускаемых в виде различного сортамента: листы, плиты, уголки, швеллера и т. д. ([рис. 5.10](#)).



Рис. 5.10. Пример применения конструкционных сталей в несущих конструкциях ПЭВМ (листовой материал для кожуха)

Тип проката – горячекатаный или холоднокатаный – в первую очередь определяет состояние поверхности и внутреннюю структуру.

Холоднокатаный материал отличается шероховатость поверхности порядка 4-го класса (Rz 40) и наиболее выраженная структурированность (в виде волокон), влияющая на механические свойства (например, предел прочности на разрыв разный для направлений вдоль и поперек волокон).

На свойства сталей также влияет технология их получения, особенно степень раскисления:

сп – спокойная;

пс – полуспокойная;

кп – кипящая.

Для деталей «сп» раскислителем является состав *марганец + кремний + алюминий*. В этом случае влияние кислорода мало, сталь получается более качественной.

Для сталей «пс» раскислителем является состав *марганец + алюминий*. Для сталей «кп» раскислитель – *марганец*.

Качество сталей «пс» и «кп» хуже: ниже коррозионная стойкость. Однако их стоимость меньше стоимости спокойной стали.

Полную совокупность свойств сталей определяет прежде всего содержание углерода (от 0,03 до 1 %). Чем больше содержание углерода, тем больше твердость материала, лучше обрабатываемость резанием, хуже пластичность и свариваемость. Для получения особых свойств сталей используют различные легирующие добавки: хром, кремний, молибден, ванадий и др.

Поскольку стали довольно активно корродируют даже в легких условиях эксплуатации (за исключением нержавеющей сталей, стоимость которых в 10–20 раз выше стоимости обычных конструкционных сталей), поверхности стальных изделий обязательно защищают гальваническими и лакокрасочными покрытиями.

### 5.6.1.3. Электротехнические материалы

Особый класс черных металлов составляют электротехническое железо и стали. Эти материалы легированы кремнием (что повышает их удельное сопротивление) и характеризуются малыми потерями вихревых токов и повышенной магнитной проницаемостью в электромагнитных полях.

К низкоуглеродистым материалам относится электротехническое железо марок Э, ЭА, ЭАА (ГОСТ 9925). Они хорошо свариваются, пластичны, обладают большей индукцией насыщения и малой коэрцитивной силой.

Электротехническое железо применяется для изготовления сердечников реле, трансформаторов, магнитных и электромагнитных экранов.

Примеры марок: Э12, Э31, Э41, Э43, Э310, ЭА320.

Первая цифра отражает степень легирования кремнием.

Вторая (1–8) – свойства:

1, 2, 3 – для работы на частоте 50 Гц;

- 4, 5, 6 – для работы на частоте 400 Гц;
- 7, 8 – особые свойства в слабых полях;
- 1, 4 – нормальные потери;
- 2, 5 – пониженные потери;
- 3, 6 – низкие потери.

Третья цифра (0) – сталь холоднокатаная сильнотекстурированная с минимальными потерями. Вдоль направления проката индукция напряжения больше.

Третья и четвертая цифры (00) – сталь холоднокатаная малотекстурированная с минимальными потерями.

А – особо низкие удельные потери.

Для работы на повышенных частотах предназначен пермаллой (сплав железа с никелем).

Марки 50Н и 50НП (прямоугольная петля гистерезиса и высокая магнитная проницаемость) применяются для изготовления сердечников магнитных усилителей.

Марки 79НМ и 80НХС (обладают наивысшей магнитной проницаемостью) используются для изготовления сердечников трансформаторов и дросселей, работающих в слабых полях и на высоких частотах, и характеризуются силой магнитной индукции свыше 15000 Гс.

### 5.6.2. Алюминий и его сплавы

Плотность алюминия и его сплавов лежит в пределах 2,7–2,9 г/см<sup>3</sup>. Он обладает хорошей тепло- и электропроводностью и, в большинстве случаев, высокой пластичностью. Прочность сравнительно невысокая. Коррозионная стойкость сильно зависит от условий эксплуатации:

- влажная среда – хорошая;
- кислая среда – удовлетворительная;
- щелочная среда – низкая.

Жаропрочность и жаростойкость невысокая.

Сварка для всех марок точечная. Дуговая сварка – в среде защитных газов, только для нескольких марок.

Паяемость низкая, только специальными типами припоев.

Применение в конструкциях ЭС алюминиевых сплавов обусловлено в первую очередь их низкой плотностью и хорошей обрабатываемостью. Из этих материалов изготавливают элементы несущих конструкций, органы управления, передние и лицевые панели приборов и устройств ([рис. 5.11, а](#)), радиаторы ([рис. 5.11, б](#)).

 $a$ 

6

Рис. 5.11. Применение алюминиевых сплавов

В зависимости от назначения детали и серийности производства могут применяться алюминиевые деформируемые или литейные сплавы.

#### 5.6.2.1. Алюминиевые деформируемые сплавы (основные марки)

Алюминий марок АД0, АД1 применяют в производстве изделий, изготавливаемых давлением. Сплав АД1 обладает высокой пластичностью, электро- и теплопроводностью. Применяется без термической обработки. Удовлетворительно обрабатывается резанием, сваривается, паяется. Используется для изготовления ненагруженных корпусных деталей, получаемых листовой штамповкой и выдавливанием.

Сплав АМц, легированный марганцем, поставляется в двух состояниях: АМцМ – мягкий – для изделий, изготавливаемых глубокой выдержкой; АМцП – полунатянутый – обладает более высокой прочностью.

Сплав АМц хорошо деформируется в холодном и горячем состояниях, хорошо сваривается, обрабатываемость резанием пониженная. Коррозионная стойкость как у чистого алюминия. Используется для изготовления ненагруженных корпусных деталей, с применением сварки и гибки.

Сплавы АМг1, ..., АМг6 легированы магнием. С увеличением количества магния твердость и прочность повышаются. Свариваются аргонодуговой сваркой. Например, у сплава АМг5 коррозионная стойкость и деформируемость пониженная, хорошо обрабатывается резанием, сваривается.

Сплав АМг1 применяется для изделий, изготавливаемых глубокой вытяжкой.

Дюралюминий (сплав с медью и магнием) марок Д1, ..., Д16 поставляется в двух состояниях:

Д1АМ, ..., Д16АМ – мягкий, для изделий, изготавливаемых давлением и глубокой вытяжкой;

Д1АТ, ...Д16АТ – твердый, обладает повышенной прочностью, хорошо обрабатывается резанием.

Сплав Д16 хорошо сваривается точечной сваркой, паяется. Обрабатываемость резанием удовлетворительная. В морской воде корродирует. Используется для изготовления средненагруженных деталей, обрабатываемых резанием, в том числе с применением точечной сварки.

Материал АПМ – алюминий, плакированный медью. Применяется для изготовления шин заземления, хорошо паяется. Главное требование при изготовлении деталей – не нарушать защитную пленку меди. В противном случае алюминий быстро корродирует.

#### 5.6.2.2. Сплавы алюминиевые литейные

Выпускаются следующие группы сплавов алюминиевых литейных:

группа I – легированные кремнием и магнием;

группа II – легированные кремнием и медью;

группа III – легированные медью;

группа IV – легированные магнием;

группа V – легированные прочими компонентами.

Наиболее часто применяют следующие марки:

АЛ2 – высокие литейные свойства: жидкотекучесть, малая усадка, высокая пластичность. Коррозионная стойкость умеренная. Свариваемость, обрабатываемость резанием хорошие. Применяется для изготовления сложных корпусных деталей, не несущих большие нагрузки;

АЛ8 обладает высокими коррозионными свойствами в обычной и морской воде. Удовлетворительные литейные свойства. Хорошая обрабатываемость резанием;

АЛ5-1 – хорошие литейные свойства, пластичность пониженная. Коррозионная стойкость пониженная. Обрабатываемость резанием удовлетворительная. Прочность повышенная. Рабочие температуры – до 250–270 °С. Применяется для изготовления деталей при повышенных требованиях к прочности при высоких температурах.

#### 5.6.3. Медь и ее сплавы

Плотность меди – 8,9 г/см<sup>3</sup>. Медь выпускается марок М0, М1, М2, М3.

Цифра в обозначении марок указывает на содержание неконтролируемых примесей. Наиболее чистая медь – марка М0 применяется для изготовления токопроводящих деталей, экранов. Пластичность высокая, что позволяет изготавливать изделия гибкой. Марка М3 менее токо- и теплопроводна из-за повышенного содержания примесей. Более химически и механически прочная. Применяется для крепежных изделий.



### 5.6.3.1. Латунь

*Латунь* – сплав меди с цинком.

Латуни, содержащие менее 30 % цинка, высокопластичны и применяются, как правило, для деталей, изготавливаемых давлением. При содержании цинка более 30–50 % они имеют более высокую прочность и лучшую обрабатываемость резанием.

Латуни, содержащие свинец, относятся к сплавам повышенной обрабатываемости резанием.

Наиболее часто применяют следующие марки латуни:

Л90 – для изделий штампуемых и изготавливаемых глубокой вытяжкой;

Л63 – для деталей, изготавливаемых давлением. Обрабатывается резанием удовлетворительно;

свинцовистая латунь ЛС59-1 – для деталей, обрабатываемых резанием, и СВЧ-аппаратуры, для изделий тропического исполнения;

оловянистая латунь ЛО60-1 – для деталей, работающих в морском климате.

Все латуни хорошо свариваются.

### 5.6.3.2. Бронза

*Бронза* – сплав меди с оловом и другими металлами.

Основные марки:

Бр АМц-9-1 – литейный сплав, хорошо обрабатывается давлением в холодном состоянии;

Бр АЖ-9-4 – высокие коррозионные свойства, антифрикционные свойства, повышенная прочность. Свариваемость и деформируемость удовлетворительные. Обрабатываемость резанием хорошая.

Применяется для изготовления нагруженных деталей, в том числе вибрационной и знакопеременной нагрузкой;

Бр КМц 3-1 – для пружинных деталей;

бериллиевая бронза Бр Б2 – для пружинных деталей. Имеет высокие коррозионные свойства, высокие прочность и пружинность. Применяется для изготовления пружин, работающих при повышенных температурах (до 350 °С);

Бр ОФ 4-0,25 – для пружинных деталей.

### 5.6.4. Пластмассы

При выборе пластмассы в качестве материала детали необходимо помнить, что пластмассовые изделия имеют свои особенности, связанные с физико-механическими свойствами и технологией их изготовления. Переход к



пластмассам обусловлен требованиями обеспечения высокой технологичности.

*Пластическими массами* называют материалы, обладающие в определенных условиях (повышенные температура и давление) пластичностью и перерабатываемые в изделия при помощи деформации. Из пластмасс изготавливаются и полуфабрикаты – листы, прутки и другие фасонные изделия. Последние называются *конструкционными пластмассами*.

Технология производства деталей из пластмасс имеет следующие преимущества:

- возможность получения деталей сложной формы при малых затратах времени;
- отсутствие необходимости отделочных операций после изготовления деталей.

По сравнению с металлическими материалами пластмассы имеют следующие *преимущества*:

- высокие диэлектрические параметры, что особенно важно для ЭС (проще обеспечить электробезопасность конструкции);
- меньший удельный вес;
- лучшая химическая и водостойкость;
- прозрачность или полупрозрачность;
- лучшая стойкость к вибрациям;
- способность поглощать удары и звук;
- большое сопротивление к истиранию и износу, возможность применения без смазки трущихся поверхностей;
- более легкая обрабатываемость;
- возможность сплошной окраски;
- меньшая стоимость;
- стабильность геометрических размеров при изменении температуры.

*Недостатки* пластмасс:

- меньшая прочность;
- большое тепловое сопротивление;
- повышенная хрупкость при пониженных температурах;
- повышенная мягкость и пластичность;
- изменение размеров в результате влагопоглощения;
- способность к воспламенению;
- изменение свойств под воздействием ультрафиолетового излучения.



*а*



*б*



*в*

Рис. 5.12. Изделия из пластмасс: *а* – шкала; *б* – печатная плата корпуса разъемов; *в* – корпус монитора

Из пластмасс изготавливают обширную номенклатуру деталей: от корпусов приборов и других несущих деталей конструкции до художественных шильдиков ([рис. 5.12](#)).

По составу пластмассы делятся на две основные группы:

- состоящие из смол;
- состоящие из смол с включением различных добавок.

Основными компонентами второй группы являются:

- связующие вещества;
- наполнители;
- красители;
- пластификаторы;
- ускорители.

*Связующее вещество* является важнейшей составной частью. Оно придает пластмассе свойство формироваться в монолитную деталь после отверждения. В качестве связующего вещества в пластмассах применяют искусственные смолы: фенолформальдегидную, полиамидную и др.

Количество связующего материала в пластмассе – 30–60 %.

*Наполнитель* (40–65 %) оказывает влияние на механические и температурные свойства, например на нагревостойкость. Наполнители делятся на органические и неорганические.

Виды наполнителя:

- *листовой* обеспечивает максимальную механическую прочность. Изготовление деталей механическими способами;

- *волоконный* – прочность ниже, чем у листового, и уменьшенное влагопоглощение. Методы изготовления деталей – механическая обработка, прессование, пресс-литье;

- *порошковый* – прочность ниже, чем у волокнистого, и уменьшенное влагопоглощение. Методы изготовления деталей – механическая обработка, прессование, пресс-литье;

- *газовоздушный* – уменьшение массы, прочности, уменьшение теплопроводности. Методы изготовления деталей – механическая обработка, прессование, пресс-литье.

Для окрашивания пластмасс в них добавляют *красители* (до 5 %).

*Пластификаторы* (до 5 %) применяют для изменения физико-механических свойств: хрупкости, морозостойкости и т. д.

*Ускорители* (до 7 %) добавляют для ускорения процесса полимеризации.

Применяемые в производстве ЭС основные виды пластмасс можно классифицировать по способу изготовления:

- конструкционные;
- термореактивные (*реактопласты*): горячего и холодного прессования;
- термопластичные.

Реактопласты горячего прессования твердеют и превращаются в деталь при нагревании в пресс-форме под давлением.

Реактопласты холодного прессования подвергаются формовке в холодной пресс-форме под давлением, после чего деталь извлекается из пресс-формы и проходит термообработку в печи до полной полимеризации материала.

Преимущества холодного прессования – высокая производительность, однако, вследствие высокой текучести материала, детали могут быть только толстостенные и нельзя получить зеркальную поверхность.

Термопласты после горячего прессования не теряют способности плавиться под воздействием температуры и (для ряда материалов) растворяться в органических растворителях.

Применяемые в производстве ЭС пластмассы можно классифицировать по целевому назначению:

- конструкционные (обладают, как правило, повышенными механическими свойствами);
- электроизоляционные;
- теплостойкие;
- фрикционные (с увеличенным коэффициентом трения и уменьшенным износом);
- антифрикционные (с уменьшенным коэффициентом трения);
- тепло- и звукоизоляторы;
- тропически стойкие.

## Контрольные вопросы

1. Что понимают под термином «несущая конструкция»? Какие виды несущих конструкций вы знаете?
2. Перечислите главные задачи разработки конструкции блока.
3. Назовите необходимые условия выбора компоновочной схемы блока.
4. Какие конструкции блоков вы знаете?
5. Назовите основные достоинства книжной компоновки блоков.
6. Благодаря каким конструктивным изменениям достигается гибкость системы ЕВРОМЕХАНИКА?
7. Какие вам известны зарубежные несущие конструкции?
8. Какими степенями характеризуется защита ЭС от внешних воздействий?
9. Какие черные металлы и сплавы вы знаете? Назовите их основные марки.
10. Назовите основные характеристики алюминия.
11. Проведите сравнительный анализ материалов, используемых в конструкциях электронных средств, перечислите достоинства и недостатки этих материалов.

## 6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО МОНТАЖА

[6.1. Виды электрического монтажа.](#)

[6.2. Объемный электрический монтаж.](#)

[6.3. Основные требования, предъявляемые к электрическому монтажу.](#)

[6.4. Классификация электрических линий связи.](#)

[6.5. Правила проектирования объемного монтажа.](#)

[6.6. Материалы для объемного монтажа.](#)

[6.7. Электромонтажные соединения.](#)

[Контрольные вопросы.](#)

Л и т е р а т у р а: [4, 15, 16, 22].

### 6.1. Виды электрического монтажа

Современные электронные устройства выполняют сложные функции по приему, обработке и передаче информации. Это обуславливает наличие в составе даже одного устройства, не говоря уже о радиотехническом комплексе, большого числа различных функциональных элементов. Достигнутый в настоящее время уровень интеграции ФУ не позволяет выполнить достаточно сложную ЭС в одном корпусе ИС (в ряде случаев это не выгодно с экономической точки зрения). Даже если обработка информации реализована в пределах одного кристалла, то необходим интерфейс по приему и передаче информации, включая взаимодействие с оператором или пользователем ЭС.

Кроме того, наличие определенной дискретизации как на уровне отдельных компонентов, так и на уровне ФУ позволяет быстро производить обслуживание, гибко осуществлять модернизацию и создавать новые изделия на существующей элементной базе.

Ввиду указанных причин, конструкции современных ЭС строятся по принципу последовательного усложнения путем конструктивного объединения более простых узлов. Это ведет к образованию конструктивной иерархии ([рис. 6.1](#)). Конструктивно законченное изделие превращается в *единое функциональное устройство* с помощью объединения линиями передачи информации различных иерархических единиц, расположенных на различных *несущих конструкциях* ([рис. 6.1](#)).

Как видно из [рис. 6.1](#), существуют различные виды линий связи (ЛС), предназначенных для передачи различных по физической природе сигналов и различных по конструктивному исполнению ([рис. 6.2](#)).

Поскольку ЭС отличается функциональным назначением и видом передаваемого сигнала, а также разнообразием способов контактирования даже на одном иерархическом уровне, то использовать какой-либо один тип ЛС не представляется возможным. Поэтому в реальных конструкциях применяют разнообразные типы ЛС.

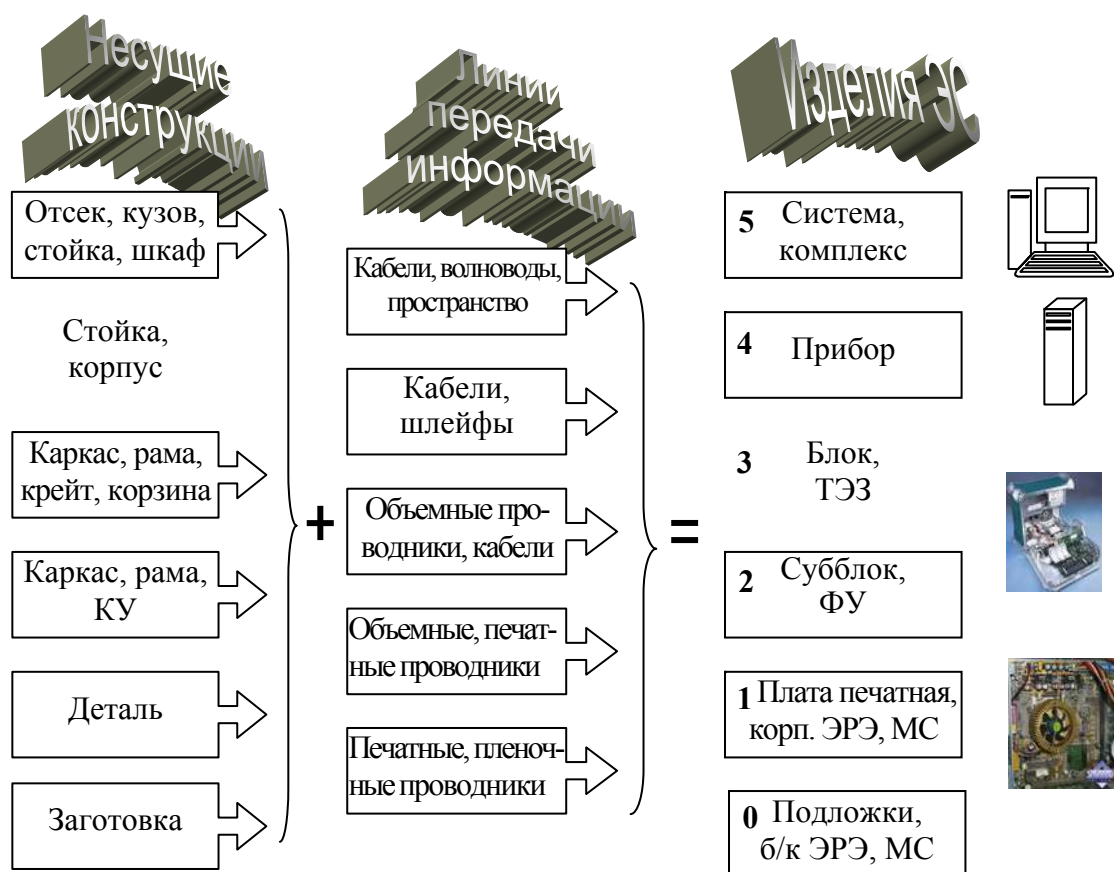


Рис. 6.1. Основные составляющие изделий ЭС



Рис. 6.2. Виды линий связи

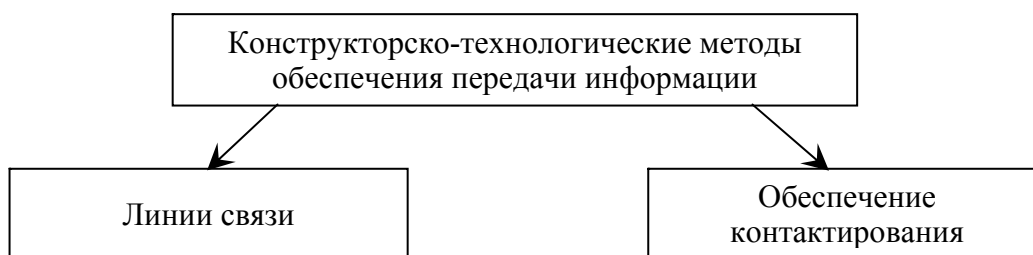


Рис. 6.3. Обеспечение передачи информации

При этом на *каждом иерархическом уровне* для передачи информационных сигналов обычно *используют ограниченное число конструктивных исполнений линий связи* – отдельные проводники, сборки проводов и пр.

Так, на первом конструктивном уровне обычно используется *пленочная межконтактная коммутация и неразъемное контактирование*.

На втором и третьем уровнях преимущественно используется *печатный и пленочный монтаж, пайка и разъемные соединения*.

На третьем частично и в основном на более высоких уровнях применяют соединения с помощью гибких печатных кабелей (*ГПК*), *плоских кабелей, объемных проводников*.

На пятом уровне – *кабели* (электрические и оптические) и *разъемное контактирование*.

Вопросы проектирования линий передачи СВЧ-сигналов – *волноводов, микрополосковых линий* и т. д. – здесь не рассматриваются. Основное внимание при изучении данной темы будет уделено проектированию и применению электрического и объемного монтажа в радиотехнических устройствах и приборах.

Вопросы проектирования линий связи тесно связаны еще с одним аспектом – *обеспечением контактирования*, т. е. обеспечением надежной передачи информации в месте соединения различных проводящих элементов ([рис. 6.3](#)). В данном контексте не важно, что проводится – электромагнитная волна, световой поток или электрический ток.

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

## 6.2. Объемный электрический монтаж

**Электромонтаж – часть конструкции, предназначенная для обеспечения электрически неразрывных связей при объединении нескольких элементов нижестоящего иерархического уровня в элементы вышестоящего конструктивного уровня.** Например, монтаж ЭРЭ на печатную плату приводит к образованию сборочной единицы – печатного узла ([рис. 6.4](#)).



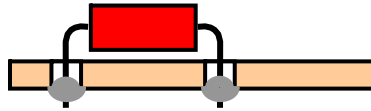


Рис. 6.4. Монтаж ЭРЭ на печатную плату

Можно без преувеличения сказать, что электрический монтаж встречается во всех радиоэлектронных аппаратах, или изделиях с применением электроники. Поскольку даже при передаче информации неэлектрическими сигналами (другими способами) всегда при ее переработке (изменении, усилении и т. д.) требуются затраты электрической энергии, следовательно, подключение источников первичного или вторичного электропитания обуславливает наличие электромонтажа.

Если оценивать трудоемкость электромонтажных работ, то она составляет 40–60 % от трудоемкости всего изделия. При использовании объемного провода на его долю приходится 20–35 % всего объема ЭС, на печатный монтаж – 10–15 %. Общее число контактных соединений в ЭС 3–4-го поколений соизмеримо с общим числом функциональных элементов, что обуславливает сильную зависимость надежности ЭС от надежности электромонтажа.

Электронные средства содержат разнообразные функциональные элементы и модули, отличающиеся видом обрабатываемых сигналов (мощностью, частотой, формой и пр.). При передаче по линиям связи (ЛС) электрических сигналов происходит их затухание, искажение формы и изменение спектра. Искажение сигнала определяется степенью рассогласования параметров электронных схем (например, входного и выходного сопротивлений) с характеристиками ЛС, взаимным влиянием ЛС друг на друга, задержкой сигналов из-за конечного времени прохождения сигналов по ЛС. Параметры линий связи регламентируют максимальную мощность, передаваемую по ним, а также рассеивают в окружающее пространство электромагнитную энергию.

### **6.3. Основные требования, предъявляемые к электрическому монтажу**

Электрический монтаж должен:

1. Обладать способностью передавать электрические сигналы в широком диапазоне частот, токов и напряжений.
2. Обеспечивать минимальные искажения и задержку сигналов (иметь минимальные активное и индуктивное сопротивления и однородное по длине линии волновое сопротивление).
3. Обеспечивать минимальный уровень помех (иметь минимальное поле вокруг линии при протекании по ней тока).
4. Обеспечивать нормальную работу в заданных условиях механических и климатических воздействий.



5. Соответствовать ТУ, ЭЗ, МЭ и другим документам.
6. Обеспечивать высокую надежность соединений.
7. Допускать удобную и быструю замену вышедших из строя ЭРЭ.
8. Допускать возможность подключения контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) к любой точке схемы.
9. Быть технологичным (обеспечивать способность к автоматизации при проведении монтажных работ).
10. Иметь низкие массу и стоимость.

## 6.4. Классификация электрических линий связи

Классифицировать электрические линии связи (ЭЛС) можно по функциональному назначению, конструктивному исполнению, по связи между конструктивными характеристиками и параметрами передаваемого электрического сигнала или по организации передачи сигнала.

По выполняемым функциям различают:

- *сигнальные цепи*, предназначенные для передачи сигналов. Они объединяют входы и выходы элементов, модулей и блоков;
- *цепи управления и синхронизации*, обеспечивающие заданное функционирование функциональных узлов;
- *линии электропитания*, служащие для подвода электрической энергии к активным элементам.

Сигнальные линии и линии электропитания обязательно имеют обратный провод, называемый *землей* (общий провод, линия нулевого потенциала). По нему протекают возвратные токи сигнальных линий и линий электропитания.

В зависимости от конструктивных особенностей обратного провода электрические линии подразделяют:

- на *симметричные*, состоящие из двух одинаковых проводников (один провод служит для передачи прямого тока, другой – обратного);
- *несимметричные*, с одним общим проводом для многих цепей;
- *коаксиальные*, представляющие собой два цилиндрических проводника с совмещенными осями (обратный ток протекает по оплетке коаксиального кабеля).

*Основой электрической линии связи является проводник тока* – металлическая проволока (провод), пленочные и печатные проводники ([рис. 6.5](#)). Провода защищают изолирующими диэлектрическими оболочками либо оболочками и экранами. По форме провода бывают круглыми или прямоугольными, пленочные и печатные проводники – только прямоугольными.

*Экраны* (металлическая оплетка) в линиях связи обеспечивают защиту линий от воздействия электрических, магнитных и электромагнитных полей.

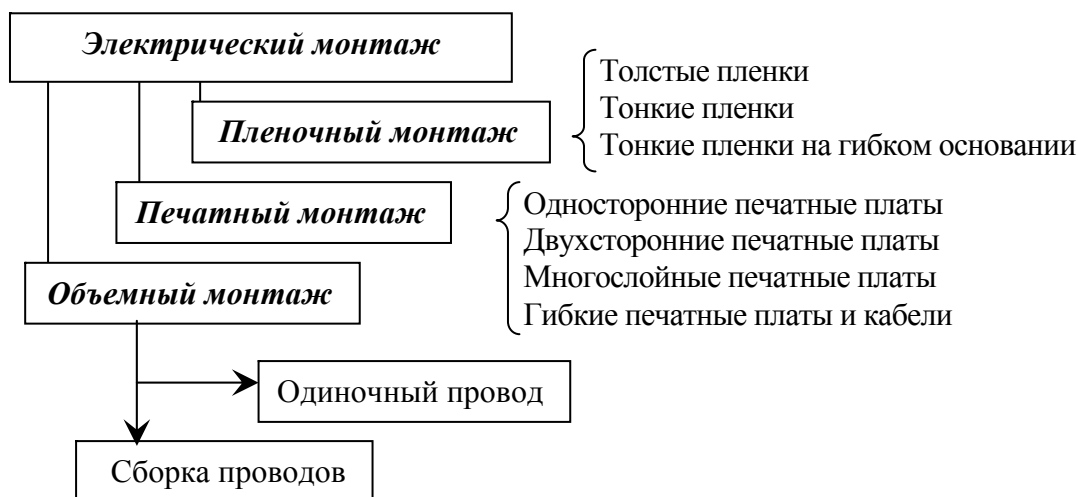


Рис. 6.5. Виды электрического монтажа

Обычно цепи электропитания выполняют объемными проводами, пленочными и печатными проводниками, иногда проводящими пластинами. Конструктивное исполнение сигнальных ЛС более разнообразно и во многом определяется видом и частотным диапазоном передаваемых сигналов. Правильно применить ту или иную ЛС можно, лишь оценив характер искажения и затухания сигналов.

В зависимости от спектра передаваемого сигнала сигнальные линии связи делят: на *электрически длинные* и *электрически короткие*. Характер искажения сигналов в них различен.

При моделировании электрических процессов в короткой ЛС сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$  и емкость  $C$  рассматривают как сосредоточенные элементы. В общем случае при передаче сигнала по линии связи происходит уменьшение амплитуды на выходе ЛС, а наличие частотно-зависимых элементов ( $L$  и  $C$ ) приводит к фазовому сдвигу синусоидального сигнала и искажению формы и временной задержке импульсного сигнала.

Понятно, что  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , а также взаимная индуктивность  $M$  являются паразитными параметрами, и их значения необходимо сводить к минимуму. Уменьшения сопротивления добиваются выбором материалов с низким удельным сопротивлением. Значения  $R$  и  $L$  снижают уменьшением длины и увеличением сечения проводников, однако последнее увеличивает массу и в конечном итоге стоимость изделия.

Величину паразитной емкости снижают следующими действиями: уменьшением длины параллельно идущих проводников; увеличением расстояния между ними; раскладкой проводов, передающих различные по уровням и частоте сигналы, в отдельные жгуты; использованием экранированных проводов, свитых пар и коаксиальных кабелей. Эти же меры снижают и взаимную индуктивность.

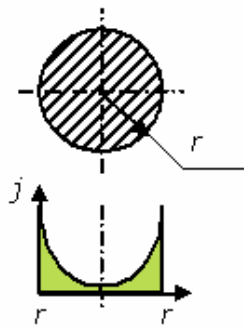


Рис. 6.6. Распределение ВЧ-тока по сечению

К длинным линиям при передаче гармонического сигнала относят линии, длина которых много больше длины волны. В электрически длинной линии связи параметры  $R$ ,  $L$ ,  $C$  фактически являются распределенными вдоль ее длины.

Сопротивление, индуктивность, емкость в длинных ЛС называют *погонными* (для единицы длины линии) и обозначают соответственно как  $R_{\text{п}}$ ,  $L_{\text{п}}$  и  $C_{\text{п}}$ .

Основной характеристикой электрически длинной линии является *волновое сопротивление*  $Z_{\text{д}}$  – отношение электрической к магнитной составляющей (напряжение/ток) для электромагнитной волны, распространяющейся по линии.

При использовании длинных линий одним из важных моментов является согласование ее волнового сопротивления с сопротивлениями нагрузки. Следствием рассогласования волновых сопротивлений является эффект отражения электромагнитной волны от места рассогласования как от препятствия. Прямую волну называют *падающей* (ПВ), обратную – *отраженной* (ОВ).

Особенностью длинных линий является и то, что искажение формы импульсных сигналов может происходить и при полном согласовании. Искажения уменьшают применением коаксиальных линий высокого качества.

Рассмотрим еще один фактор, влияющий на качество передачи сигнала по ЛС. Это частотный диапазон. Высокочастотный (ВЧ) ток (переменный или импульсный) распределяется по сечению проводника неравномерно: его наибольшая плотность – у поверхности ([рис. 6.6](#)). Это связано с тем, что глубина проникновения поля в проводник зависит от частоты сигнала и свойств материала проводника. Такое явление называется *поверхностным* или *скин-эффектом*.

Негативное влияние скин-эффекта проявляется не только в увеличении сопротивления проводника переменному току, но и в искажении формы импульса, так как с увеличением частоты затухание в материале проводника увеличивается. Ослабление влияния поверхностного эффекта добиваются применением провода, свитого из большого числа изолированных друг от друга жил.

## 6.5. Правила проектирования объемного монтажа

Как было сказано, объемный монтаж наиболее широко применяется на высоких структурных уровнях, обычно начиная с четвертого, т. е. в конструкциях ЭС со сравнительно крупными узлами.

Объемный монтаж, как правило, используется в следующих случаях:

- для обеспечения нужной длины связи, передачи заданной мощности;
- для передачи сигнала со спектром до СВЧ;
- при надежном экранировании;
- при соединениях с плавающими контактами;
- при соединении накруткой;
- при соединении бескорпусных элементов с пленочными основаниями в ГИС;
- при макетировании.

При проектировании объемного монтажа необходимо придерживаться следующих правил.

Параллельно идущие в одной трассе, изолированные друг от друга провода должны быть связанными в жгут, если это не вызывает недопустимого увеличения взаимных наводок. Обычно цепи питания переменного тока прокладываются в отдельном жгуте. В жгутах, где затрудняется замена вышедших из строя проводов, должны привязываться запасные проводники (не менее 10 % от общего количества).

Экранированные провода, провода малых сечений и цепей первичного электропитания должны свиваться для локализации магнитного поля. Рекомендуемый шаг свивки приведен в [табл. 6.1](#).

Жгуты и кабели должны крепиться скобами или мастикой ([рис. 6.7](#)). Это в первую очередь относится к изделиям специального назначения и круглым жгутам. Расстояние между скобами выбирается в зависимости от диаметра жгута ([табл. 6.2](#)).

Для защиты жгутов и кабелей от механических повреждений в местах их прохода сквозь стенки и шасси должны устанавливаться изоляционные втулки из пластмассы или резины ([рис. 6.8](#)).

Кроме этого, если к выходящему наружу кабелю может прилагаться вырывающее усилие, необходимо предусматривать дополнительное механическое крепление ([рис. 6.9](#)).

Таблица 6.1

Рекомендуемый шаг свивки

|             |       |       |     |              |
|-------------|-------|-------|-----|--------------|
| Сечение, мм | 0,2   | 0,35  | 0,5 | 0,75 и более |
| Шаг, мм     | 15–20 | 20–25 | 30  | 40           |

Таблица 6.2

**Расстояния между точками крепления в зависимости от диаметра жгута**

| Способ крепления | Шаг крепления $L$ , мм |     |     |     |
|------------------|------------------------|-----|-----|-----|
|                  | Диаметр жгута, мм      |     |     |     |
|                  | 10                     | 20  | 30  | 40  |
| Скобы            | 150                    | 200 | 250 | 300 |
| Компаунд         | 80                     | 150 | 200 | 200 |

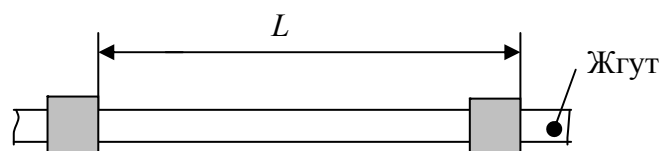


Рис. 6.7. Крепление жгута

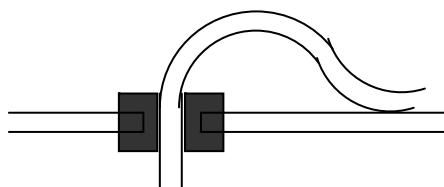


Рис. 6.8. Применение изоляционных втулок



Рис. 6.9. Применение механического крепления

При переходе жгутов с неподвижной части на подвижную следует располагать их таким образом, чтобы они работали не на изгиб, а на кручение. При этом уменьшается вероятность обрыва.

Провода и детали, соединяемые с входом и выходом усилительных приборов, должны располагаться на максимальном расстоянии от шасси, стенок и кожухов.

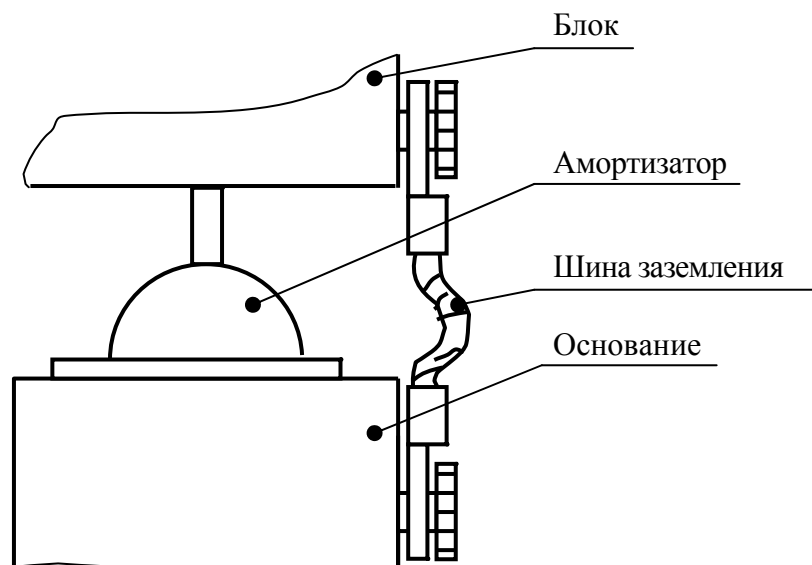


Рис. 6.10. Заземление блоков

Провода, входящие в цепи входа и выхода усилительных приборов, должны иметь минимальный диаметр, допустимый по соображениям механической прочности. В этих цепях лучше использовать голые жесткие провода, не позволяющие применить произвольную раскладку монтажа. Лучше всего в таких цепях обходиться совсем без проводов, присоединяя детали непосредственно друг к другу.

Для подключения контурных катушек и других деталей к входу и выходу усилительных приборов не рекомендуется применять дополнительных подпорок, проходных и опорных изоляторов и других подобных конструкций.

Присоединение деталей к корпусу должно производиться проводами минимальной длины в точках, ближайших к присоединяемой детали.

Элементы заземления должны быть расположены в легкодоступных местах. Использование для заземления крепежных деталей, не предназначенных для этой цели, не допускается.

Заземление корпусов приборов, расположенных на амортизаторах, должно производиться гибким многожильным проводом, длина которого должна быть не менее амплитуды вибрации блока ([рис. 6.10](#)).

Конструкция монтажа должна обеспечивать доступ к отдельным элементам с целью их осмотра, проверки и замены. Маркировочные знаки, нанесенные на шасси и деталях, не должны быть закрыты проводами и жгутами. Это допускается лишь в особомалогобаритной аппаратуре и аппаратуре разового действия.

Монтаж рекомендуется проводить проводами с различной окраской изоляционной оплетки: это позволяет уменьшить количество ошибок и упростить ремонт.

## 6.6. Материалы для объемного монтажа

Рассмотрим более подробно конструктивные особенности проводников, применяемых для объемного монтажа. Их классификация приведена на [рис. 6.11](#).

Основным проводящим материалом, применяемым для объемных проводников, является чистая медь, обладающая высокой электро- и теплопроводностью. Широкое применение меди обусловлено ее хорошей паяемостью низкотемпературными припоями и возможностью нанесения на нее защитных токопроводящих покрытий.

К недостаткам чистой меди можно отнести низкую механическую прочность. Поэтому для изготовления проводов применяют также медные сплавы – латунь и бронзу, имеющие более высокие прочность и гибкость при некотором ухудшении проводимости.

Алюминиевые проводники в ЭС применяются достаточно редко, из-за плохой способности к контактированию пайкой.

Электрофизические характеристики основных материалов проводов приведены в [табл. 6.3](#).

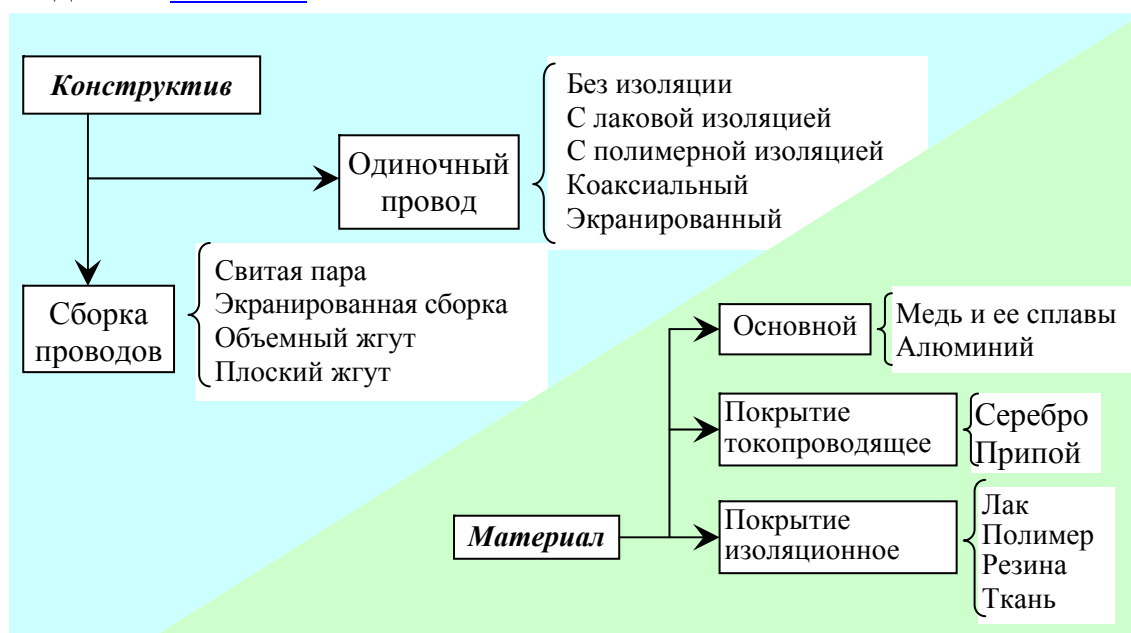


Рис. 6.11. Классификация проводников для объемного монтажа

Таблица 6.3

**Электрофизические характеристики основных материалов проводов**

| Материал | Удельное сопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м | Температурный коэффициент сопротивления, Ом <sup>-1</sup> |
|----------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Медь     | 0,0175                                        | 0,004                                                     |
| Латунь   | 0,03–0,06                                     | 0,002–0,007                                               |
| Бронза   | 0,08                                          | 0,004                                                     |
| Алюминий | 0,028                                         | 0,004                                                     |

Сечение или диаметр провода выбирают исходя из величины протекающего тока, максимального падения напряжения и допустимого перегрева. Последние зависят от сопротивления проводника.

Расчет указанных параметров можно проводить по следующим формулам:  
допустимый ток

$$I = 0,765jd^2;$$

сопротивление

$$R = 1,27\rho l/d^2;$$

падение напряжения

$$U = I\rho \frac{l}{S}(1 + \alpha\Delta t),$$

где  $j$  – плотность тока, А/мм<sup>2</sup>;  $d$  – диаметр провода, мм;  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $l$  – длина провода, м;  $S$  – сечение провода, мм<sup>2</sup>;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала провода Ом<sup>-1</sup>;  $\Delta t$  – перегрев провода, °С.

Провод выбирают исходя из:

- условий эксплуатации;
- нагрузки по току;
- допустимого падения напряжения;
- утечки тока;
- электрической прочности.

Одножильные провода рекомендуется использовать в стационарной аппаратуре, которая не подвержена воздействиям ударов и вибраций.

Многожильные провода применяют в носимой, возимой и бортовой аппаратуре. Увеличение числа жил провода повышает его стойкость к многократным перегибам.

Проводники без изоляции используются, как правило, для выполнения земляных цепей и экранов.

Нанесение изоляционного покрытия на токопроводящую жилу обеспечивает защиту от электрического замыкания проводов. Материал и конструкция изоляции при минимальной толщине должны обеспечивать необходимые электрические параметры:

- высокую электрическую прочность;



- большое сопротивление изоляции;
- стабильность и малый разброс диэлектрической постоянной.

Существует большое разнообразие различных типов изоляционных покрытий – лак, полимер, шелк, стекло и др. Наибольший объем электромонтажных работ выполняется проводниками с полимерной изоляцией ([рис. 6.12](#)).

Для уменьшения электромагнитной связи между цепями и повышения их защиты от взаимных и внешних помех применяется *свитая пара*. Ее получают переплетением между собой двух изолированных проводов ([рис. 6.12](#)). Повышение помехоустойчивости достигается тем, что наводимые внешним магнитным полем токи помех имеют в разных проводниках свитой пары противоположное направление и взаимно компенсируются. Шаг свивки зависит от диаметра проводов: при диаметре жил 0,3–0,8 мм шаг свивки – 40–90 мм, для диаметров жил 0,9–1,2 мм – 100–300 мм.

Чем меньше шаг свивки, тем больше коэффициент ослабления помех ([табл. 6.4](#)).

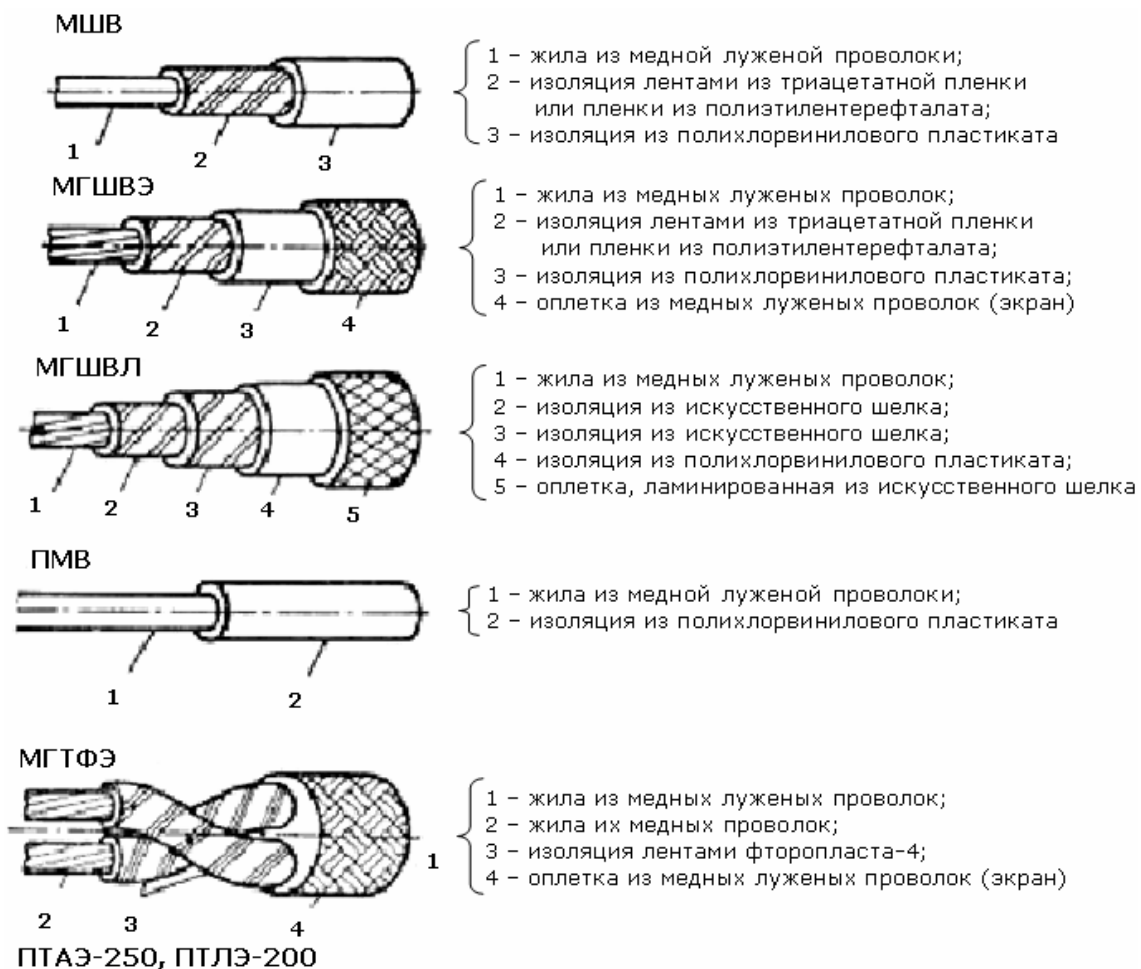


Рис. 6.12. Примеры проводов различного конструктивного исполнения

**Зависимость коэффициента ослабления помех от шага свивки**

|                            |     |    |    |    |
|----------------------------|-----|----|----|----|
| Шаг свивки, мм             | 100 | 75 | 50 | 25 |
| Коэффициент ослабления, дБ | 23  | 37 | 41 | 43 |

Хорошая защита от влияния электромагнитных помех свитой парой обеспечивается до частоты 100 кГц и удовлетворительная – до 10 МГц, при высоком постоянстве волнового сопротивления, вычисляемого по формуле

$$Z = \frac{276}{\sqrt{(\epsilon_{\text{в}} + \epsilon_{\text{и}})/2}} \lg(2d_{\text{и}}/d),$$

где  $\epsilon_{\text{в}}$ ,  $\epsilon_{\text{и}}$  – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха и изоляции проводов соответственно;  $d_{\text{и}}$ ,  $d$  – диаметр провода с изоляцией и без изоляции.

Обычно волновое сопротивление свитой пары составляет около 110–130 Ом и зависит от типа провода и шага свивания.

При электрическом монтаже свитой парой увеличивается масса, суммарная длина проводов и, соответственно, их стоимость.

Для передачи гармонических и импульсных сигналов в широком частотном диапазоне и в высокочастотной аппаратуре применяют специальные кабели. По конструктивному исполнению различают кабели:

- коаксиальные – РК;
- симметричные – РИ;
- спиральные – РС.

Наиболее широко используют коаксиальный кабель, который конструктивно является двухпроводной ЛС, состоящей из внешнего трубчатого проводника (оплетки) и внутреннего, размещенного соосно и разделенного диэлектрической средой от внешнего проводника. Прямой ток протекает по внутреннему проводнику.

Коаксиальные кабели выпускаются с волновым сопротивлением от 50 до 3200 Ом и номинальным диаметром от 0,6 до 120 мм. Марка кабеля указывает на его тип, волновое сопротивление, диаметр, материал изоляции и порядковый номер разработки.

Кабели с сопротивлением 50 Ом применяются в измерительной технике, 75 Ом – в телевидении, более высокоомные – в технике связи.

Близость прямого проводника к оплетке коаксиального кабеля, являющегося экраном, приводит к резкому возрастанию емкости на экран, что обязательно должно учитываться на этапе проектирования схем. Кроме того, коаксиальные кабели имеют значительные габариты и более сложны в монтаже. При их применении обязательно необходимо учитывать минимальный радиус сгиба.

## 6.7. Электромонтажные соединения

Электромонтажные соединения (элементы контактирования) должны:

- иметь механическую прочность не ниже ЭРЭ;
- иметь минимальное и стабильное электрическое сопротивление;
- не изменяться со временем;
- контролироваться простыми и надежными средствами.

Классификация электромонтажных соединений приведена на [рис. 6.13](#).

**Сварка** как метод контактирования в настоящее время применяется ограниченно, хотя и обеспечивает высокую надежность соединений: наибольшее применение находит при сращивании оптических волокон; широко применяется при изготовлении термопар; рекомендуется применять при изготовлении малогабаритной аппаратуры.

Метод приварки проводников к запрессованным в плату штырям представлен на [рис. 6.14](#). Штырь стальной покрыт медью и индием. При запрессовке индий диффундирует в металлическое покрытие отверстия, обеспечивая надежное электрическое и механическое соединение. Монтаж выполняется двухсторонней контактной точечной сваркой. Максимальный шаг размещения штырей – 1,5 мм.

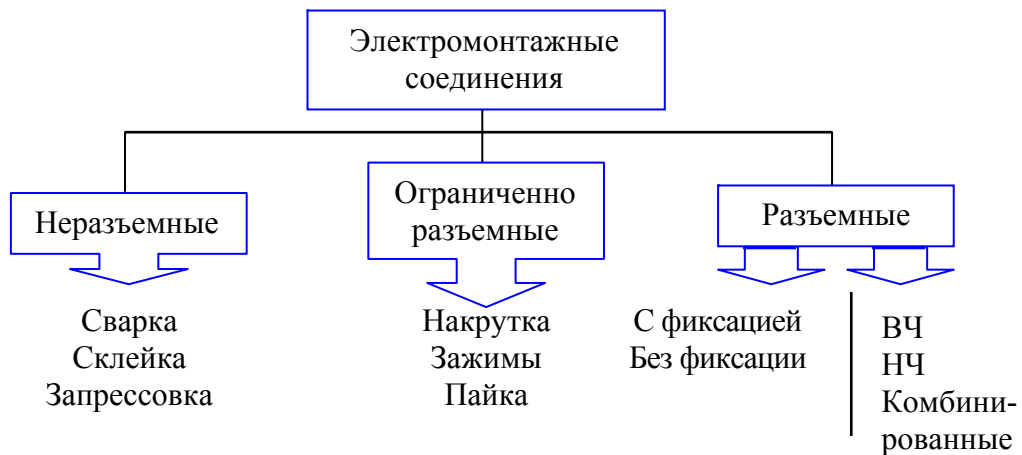


Рис. 6.13. Классификация способов контактирования

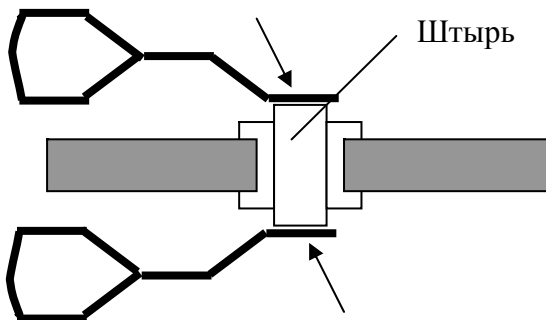


Рис. 6.14. Конструкции соединений приваркой

**Клеевые соединения.** Токопроводящие клеи используются редко: в технике СВЧ, а также для обеспечения электрического контакта при монтаже транзисторов и других ЭРЭ на устройства охлаждения. Оптически прозрачные клеи находят применение в оптических линиях передачи.

**Запрессовка проводников** выполняется изолированным проводом на поверхности платы, покрытой незатвердевшей клеей термореактивной пластмассой. Станок с ЧПУ производит раскладку и фиксацию проводников, затем плата подвергается воздействию тепла и давления.

Соединения между проводниками выполняется сверлением отверстий с последующей металлизацией.

**Пайка.** При пайке электромонтажных соединений важен выбор материала припоя. Основными критериями выбора припоя являются его механические характеристики и температура плавления. Температура припоя в момент пайки должна быть примерно на 40 °С выше температуры его перехода в жидкое состояние. Поэтому температура пайки зависит от того, применяется автоматизированная пайка или нет. В случае ручной пайки с использованием паяльника температура жала должна быть еще на 20–30 °С выше ввиду охлаждения жала в момент пайки.

**Монтаж накруткой** – механическое постоянное соединение металлического штыревого вывода с острыми гранями с накрученными оголенными проводниками ([рис. 6.15](#)).

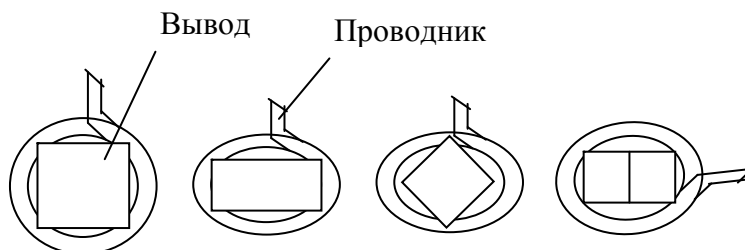


Рис. 6.15. Конструкции соединений накруткой

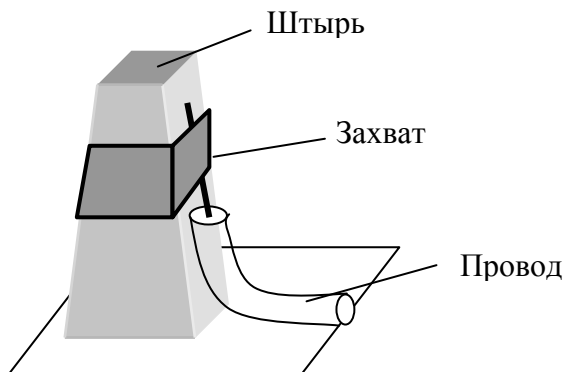


Рис. 6.16. Конструкции соединений пружинными контактами

Соединение двух металлов с большим постоянным натягом обеспечивает хороший электрический контакт и его стабильность во времени. Реко-

мендуемое количество витков – 6. Применяется в бортовой аппаратуре, вычислительной технике (большие ЭВМ), технике связи.

Материал вывода должен быть достаточно прочным и иметь низкое омическое сопротивление. Этими свойствами обладают фосфористая и бериллиевая бронзы. Проводник выполняется из одножильного мягкого и пластичного провода, хорошо сохраняющего форму накрутки.

*Достоинства монтажа накруткой:*

- более высокая (на 1–2 порядка) надежность по сравнению с паяными соединениями;
- стабильность при жестких механических и климатических воздействиях;
- отсутствие локальных перегревов;
- простота механизации технологического процесса.

К недостаткам этого вида монтажа относят большие габариты соединения.

*Основные причины отказа* – ухудшение переходного сопротивления из-за коррозии и усталостные явления в накрученном проводнике.

**Монтаж пружинными захватами** – один из методов механического контактирования (рис. 6.16). Монтаж выполняется станками с ЧПУ, возможно осуществление монтажа с шагом 1,9–2,5 мм.

Таблица 6.5

**Сравнительная характеристика основных способов контактирования**

| Свойство               | Способ соединения |       |          |
|------------------------|-------------------|-------|----------|
|                        | Сварка            | Пайка | Накрутка |
| Механическая прочность | 1                 | 4     | 2        |
| Размеры                | 1                 | 2     | 3        |
| Масса                  | 1                 | 2     | 3        |
| Ремонтопригодность     | 4                 | 1     | 2        |
| Стойкость к вибрациям  | 1                 | 2     | 2        |

Выбрать способ контактирования можно, относительно оценив основные свойства других способов, приведенные в табл. 6.5: наилучшему соединению присвоена единица, наихудшему – четыре.

### Контрольные вопросы

1. Какие соединения применяют на конструктивных уровнях?
2. Какие конструктивные требования предъявляются к объемному монтажу?
3. В каких случаях используется объемный монтаж?
4. Классификация проводников для объемного монтажа.
5. Критерии выбора провода.
6. Классификация электромонтажных соединений.

## 7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

[7.1. Основные принципы проектирования печатного монтажа.](#)

[7.2. Классификация печатных плат.](#)

[7.3. Факторы, влияющие на качество проектирования печатных плат.](#)

[7.4. Порядок проектирования печатных плат.](#)

[7.5. Анализ технического задания на плату.](#)

[7.6. Выбор класса точности и шага координатной сетки.](#)

[7.7. Выбор типа, габаритов и материала основания ПП.](#)

[7.8. Расчет элементов печатного рисунка.](#)

[7.9. Расчет диаметров отверстий.](#)

[7.10. Выбор формы и размеров контактных площадок.](#)

[7.11. Расчет параметров проводников.](#)

[7.12. Расчет расстояния между элементами печатного рисунка.](#)

[7.13. Размещение электрорадиоэлементов.](#)

[7.14. Трассировка печатных элементов.](#)

Контрольные вопросы.

Л и т е р а т у р а: [12, 16, 17, 30, 32, 33].

### 7.1. Основные принципы проектирования печатного монтажа

*Основной конструктивной базой современных электронных средств является печатная плата (ПП) с установленными на ней электронными компонентами. Это обусловлено тем, что ПП, являясь несущей конструкцией, позволяет объединить при помощи электрического печатного монтажа электрорадиоэлементы (ЭРЭ) в функциональные узлы различного назначения и сложности ( типовые элементы замены, функциональные ячейки, объемные модули и т. д.).*

Применение печатного монтажа создает предпосылки для механизации и автоматизации процессов изготовления и сборки ЭС, повышает их надежность и обеспечивает повторяемость параметров монтажа от образца к образцу.

*Преимущества печатного монтажа:*

- объединение ЭРЭ и электрического монтажа в единую конструкцию;
- организация и возможность управления размещением элементов;
- повышение плоскостности компоновки изделия;
- уменьшение габаритов и массы;
- снижение стоимости готового изделия (за счет автоматизации при проектировании и изготовлении печатных плат и печатных узлов, применения групповых методов пайки и использования более дешевых материалов);
- повышение надежности ЭС (за счет сокращения количества соединений и ошибок при монтаже, повышения механической прочности узлов);
- близкое совпадение расчетов и реально полученных характеристик;
- возможность уменьшения паразитных связей (за счет экранирования и применения низкоомных проводников);
- возможность применения элементов с планарными, штыревыми выводами и безвыводных ЭРЭ;
- возможность простого обеспечения каналов при воздушном охлаждении;



- простота проверки;
- простота анализа при выявлении причин отказа.

*К недостаткам печатного монтажа следует отнести:*

- уменьшенную объемную эффективность;
- повышенную чувствительность к ударам и вибрациям;
- ограниченную ремонтпригодность;
- ухудшенный теплоотвод (за счет естественной конвекции при горизонтальном расположении плат);
- увеличение вероятности пробоя при наличии неизолированных проводников;
- увеличение нежелательных емкостных и индуктивных связей;
- наличие определенных ограничений на конструкцию плат;
- трудность внесения изменений в готовое изделие.

Печатная плата является конструктивным элементом первого структурного уровня, на котором располагаются проводники.

Элемент второго уровня – печатный узел (ПУ) представляет собой ПП с подсоединенными к ней электрическими, механическими элементами и другими печатными платами и со всеми выполненными технологическими процессами (пайка, покрытие и т. д.) ([рис. 7.1](#), [рис. 7.2](#)).

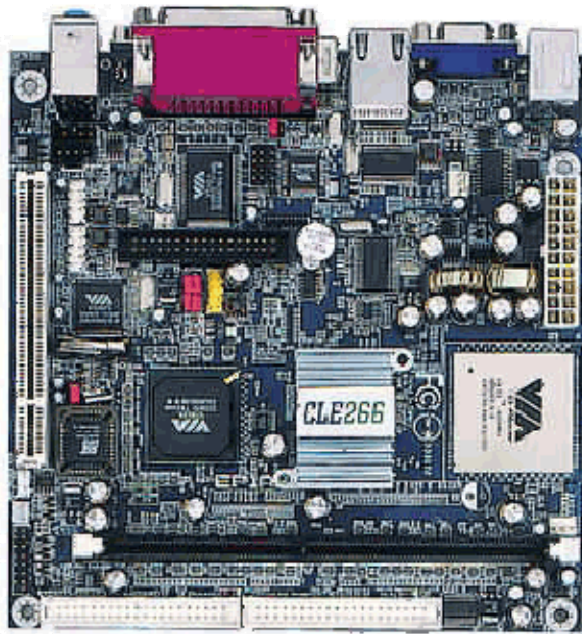


Рис. 7.1. Печатный узел.  
Материнская плата

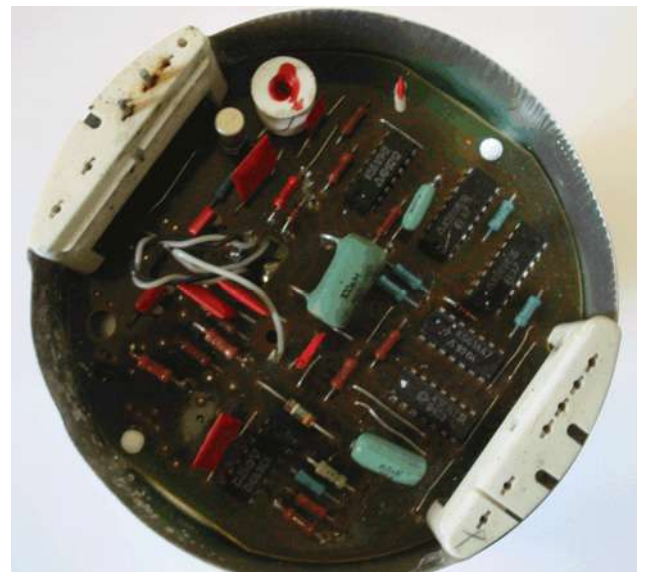


Рис. 7.2. Печатный узел  
для атмосферных зондов

Таким образом, если печатная плата есть деталь, независимо от способа ее изготовления, то печатный узел – сборочная единица, обязательно включающая в себя:

- печатную плату;

- электрорадиоэлементы;
- элементы дополнительного механического крепления ЭРЭ;
- элементы контроля и коммутации;
- элементы несущей конструкции.

Конфигурации ПП и состав ПУ определяется назначением изделия и его сложностью.

## 7.2. Классификация печатных плат

Классификацию печатных плат проводят по нескольким признакам. Прежде всего по частотному диапазону: *низкочастотные*, *высокочастотные* и *СВЧ-диапазона*. Последние обычно называются *полосковыми*, или *микрополосковыми*, платами и характеризуются повышенными требованиями к проводящему рисунку, обеспечивающими создание микрополосковых линий (МПЛ) передач высокочастотного сигнала (частота – от 0,5 ГГц), и специальными требованиями к материалу основания.

Печатные платы классифицируют также по жесткости применяемого основания. На полимерных основаниях толщиной до 0,4 мм выполняют *гибкие печатные платы* (ГПП) (рис. 7.3) и *гибкие печатные кабели*.

Развитие и сближение технологий печатного и пленочного монтажа позволили выделить в отдельный класс платы с монтажом на поверхность, установка ЭРЭ на которые производится только по планарной технологии. Применение этой разновидности печатных плат позволяет максимально использовать механизацию и автоматизацию сборочно-монтажных работ. Тем не менее широкое внедрение плат с монтажом на поверхность сдерживается более высокими требованиями к качеству проводящего рисунка, неэкономичностью при ручном монтаже элементов и ограниченной элементной базой. Этот тип плат применяется, как правило, для изделий с низким энергопотреблением, для портативной и малогабаритной аппаратуры.

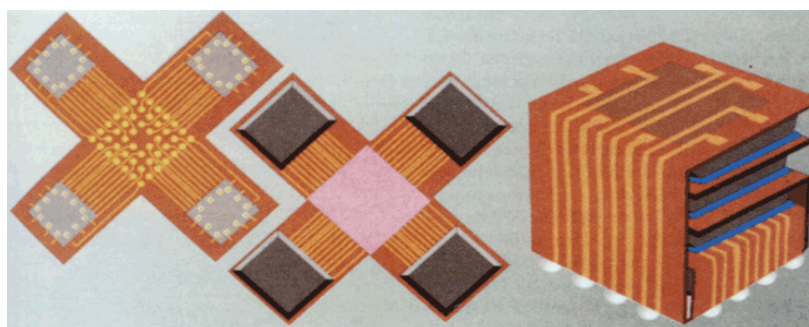


Рис. 7.3. Печатные платы на полимерном основании

*Технология поверхностного монтажа компонентов* (ТПМК) широко применяется как перспективное средство повышения производительности труда. Доля компонентов для ТПМК к общему числу компонентов: 1983 г. – 1 %; 1986 г. – 12 %; 1990 г. – 60–70 %.

*Достоинства ТПМК:*



- миниатюризация;
- возможность высокой автоматизации проектирования и изготовления ПП и ПУ;
- возрастание функциональных возможностей ЭС;
- повышение быстродействия ЭС;
- уменьшение габаритов коммутационных плат;
- снижение стоимости компонентов;
- прецизионность сборочно-монтажных операций;
- относительная простота технологического оборудования;
- возможность монтажа на платы, изготовленные по печатной или пленочной технологиям;
- широкий спектр материалов оснований плат: керамика, стеклотекстолит, гетинакс, лавсановые пленки;
- большая устойчивость к внешним климатическим воздействиям.

*Недостатки ТПМК:*

- низкая ремонтпригодность вследствие высокой плотности монтажа;
- прецизионность сборочно-монтажных операций;
- повышенные требования к топологии проводящего рисунка;
- плохая контролепригодность;
- затрудненность настройки и регулировки;
- применение специальных компонентов.

Наиболее часто печатные платы классифицируются по количеству диэлектрических и проводящих слоев, а также способов коммутации последних. Эти конструктивные разновидности ПП представлены на [рис. 7.4](#).

В зависимости от числа диэлектрических слоев различают *однослойные печатные платы* – (односторонние – ОПП), *двусторонние* (ДПП) и *многослойные* (МПП). Однослойные ПП всегда имеют один изоляционный слой, на котором находятся проводники. Применение МПП, состоящих из нескольких изоляционных слоев, позволяет увеличить плотность монтажа, сократить длину проводников и уменьшить паразитные связи и наводки.

Наиболее широко используются в ЭС односторонние печатные платы ([рис. 7.5](#)), двухсторонние с химико-гальванической металлизацией отверстий по комбинированной позитивной или полуаддитивной технологиям ([рис. 7.6](#)), многослойные печатные платы, выполненные попарным прессованием ([рис. 7.7](#)) и металлизацией сквозных отверстий ([рис. 7.8](#)).

Односторонние печатные платы ([рис. 7.5](#)) характеризуются:

- возможностью обеспечения повышенных требований к точности воспроизведения проводящего рисунка;
- установкой корпусных ЭРЭ с радиальными выводами на поверхность платы с противоположной рисунку стороны (для некоторых ЭРЭ предусматривается возможность установки со стороны печатного рисунка, например варикапы типа KB122A-9, микросхемы в корпусах типа 4114.24-1,

4151.12-1, 4153.12-1 по ГОСТ 17467 и т. п.) без дополнительного изоляционного покрытия;

- простотой технологического процесса изготовления ПП;
- низкой стоимостью конструкции.

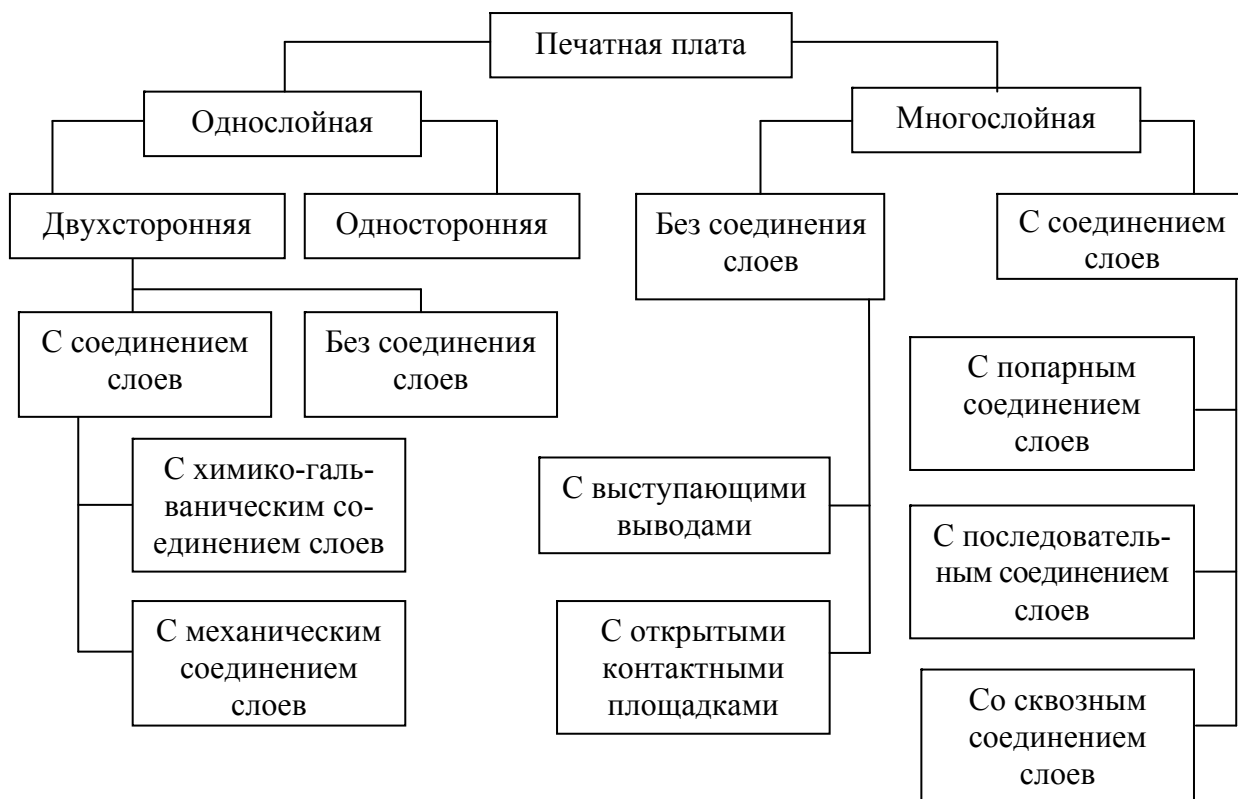


Рис. 7.4. Классификация печатных плат

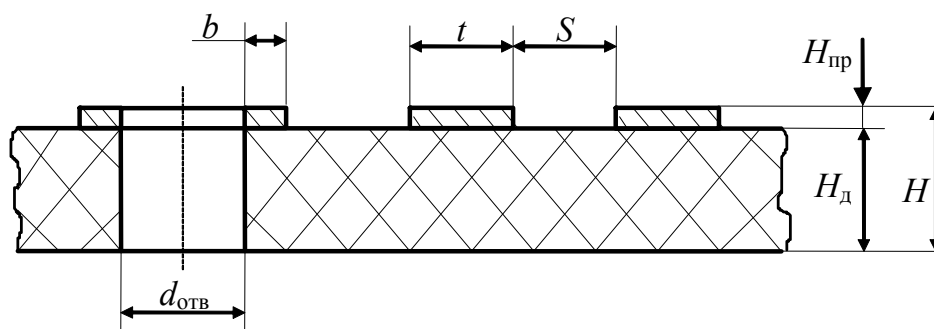


Рис. 7.5. Конструкция односторонней печатной платы

Двухсторонние печатные платы (ДПП) с химико-гальваническим соединением слоев (рис. 7.6) характеризуются:

- высокими коммутационными свойствами в связи с возможностью использования переходных металлизированных отверстий;
- повышенной прочностью сцепления выводов корпусных ЭРЭ с проводящим рисунком платы;
- более высокой плотностью.

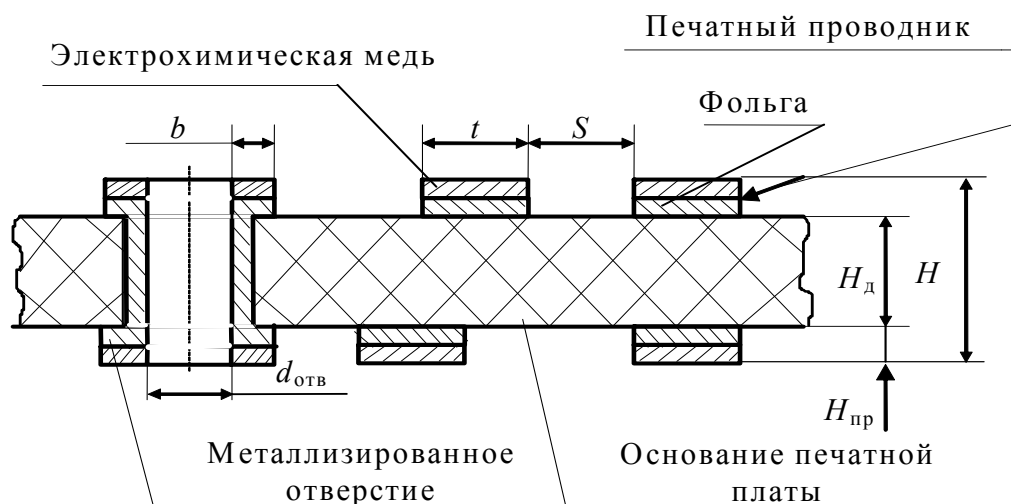


Рис. 7.6. Конструкция двухсторонней печатной платы с химико-гальваническим соединением слоев

Кроме того, двухсторонние печатные платы значительно меньше коробятся, так как проводящие металлические слои, расположенные с противоположных сторон основания, компенсируют деформацию диэлектрика. Наиболее сильно подвержен короблению гетинакс.

Многослойные печатные платы (МПП) обладают самыми высокими коммутационными свойствами, возможностью обеспечения высокой помехозащищенности цепей, однако стоимость конструкции более высокая.

Многослойные печатные платы, изготовленные методом попарного прессования (рис. 7.7), характеризуются:

- наличием межслойных соединений;
- быстрым освоением в производстве;
- возможностью монтажа элементов как с планарными, так и со штыревыми выводами ЭРЭ (применение планарных выводов предпочтительнее), при этом компоненты с планарными выводами устанавливаются с двух сторон, со штыревыми – с одной;
- малым количеством слоев (до 8). Оптимальны четырехслойные конструкции;
- возможностью осуществления промежуточного контроля качества проводящих слоев и межслойных соединений в процессе производства.

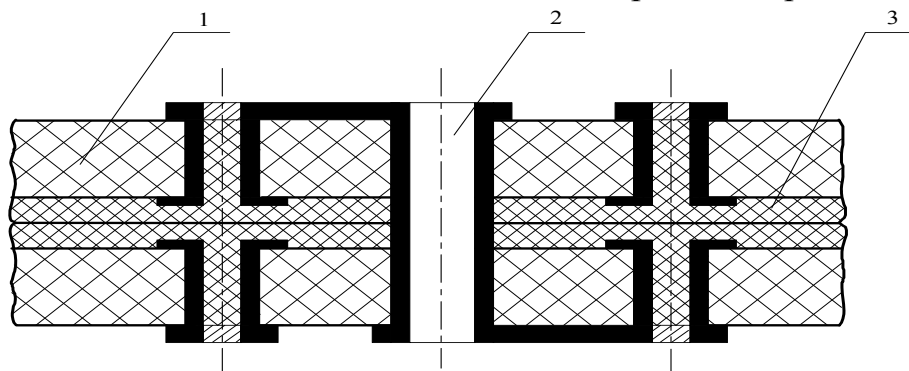


Рис. 7.7. Конструкция МПП, изготовленная попарным прессованием:  
1 – фольгированный диэлектрик; 2 – сквозное отверстие; 3 – прокладочная стеклоткань

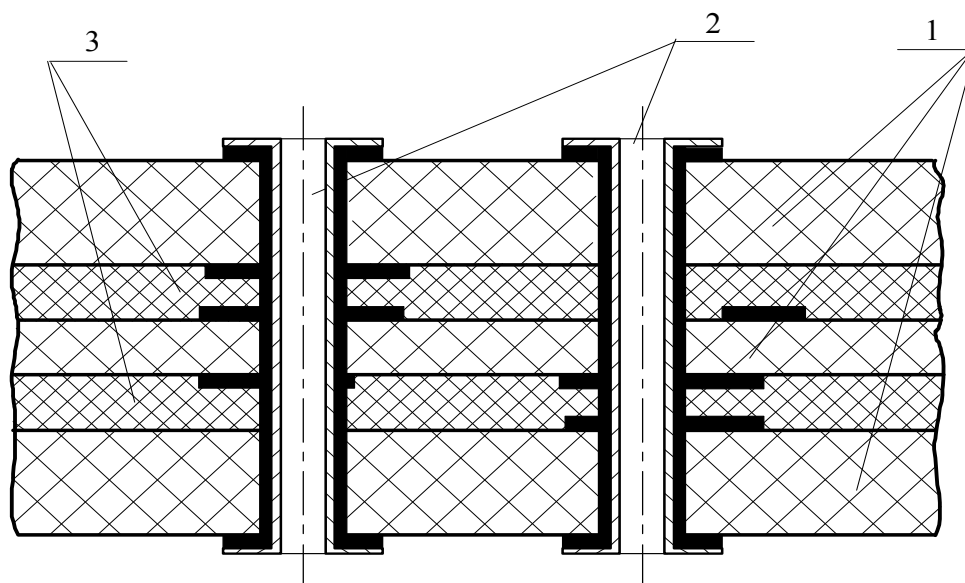


Рис. 7.8. Конструкция МПП, изготовленная металлизацией сквозных отверстий:  
1 – фольгированный диэлектрик; 2 – сквозное отверстие; 3 – прокладочная стеклоткань

Многослойные печатные платы, изготовленные методом металлизации сквозных отверстий ([рис. 7.8](#)), характеризуются:

- наличием межслойных соединений;
- практически неограниченным числом слоев (больше 50, по типовому технологическому процессу – 20);
- возможностью монтажа элементов как с планарными, так и со штыревыми выводами ЭРЭ;
- достаточно низкой трудоемкостью и длительностью процесса изготовления;
- возможностью осуществления промежуточного контроля качества проводящих слоев;
- высоким выходом годных плат и высокой надежностью;
- высокими коммутационными свойствами и помехозащищенностью;
- обязательным наличием контактных площадок в каждом проводящем слое, имеющем электрическое соединение с монтажным или переходным отверстием;
- низким классом точности на наружных слоях (1-й и 2-й классы точности);
- высокой стоимостью.

Сравнительная характеристика различных конструкций ПП представлена в [табл. 7.1](#), где использованы следующие сокращения для многослойных печатных плат: ППр – с попарным соединением слоев; ОКП – с открытыми контактными площадками; ВВ – с выступающими выводами; МСО – со сквозной металлизацией слоев (металлизация сквозных отверстий); ПН – с последовательной металлизацией слоев (последовательное наращивание). Характеристика в столбцах 3–7 указана в относительных единицах.

Классифицировать ПП можно также по методам изготовления, которые определяют ряд характеристик готового изделия: надежность, устойчивость к внешним воздействиям, точность, стоимость и др. Выбор метода является прерогативой проектировщика, который указывает его в конструкторской документации (КД) на печатную плату.

Методы изготовления плат в соответствии с ГОСТ 20406 делятся на *субтрактивные (химические), аддитивные (электрохимические) и механические*.

Таблица 7.1

### Характеристика различных конструкций ПП

| Тип платы | Плотность монтажа | Количество слоев | Цена | Надежность | Время изготовления | Стойкость к внешним воздействиям | Тип выводов        | Автоматизируемая сборка |
|-----------|-------------------|------------------|------|------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------------|
| ОПП       | Низкая            | 1                | 1    | 1          | 1                  | 3                                | Планарный Штыревой | +                       |
| ДПП       | Выше ОПП          | 2                | 2    | 4          | 2                  | 3                                | Планарный Штыревой | +                       |
| ППр       | Выше ДПП          | 4                | 3    | 2          | 4                  | 3                                | Планарный Штыревой | +                       |
| ОКП       | Выше ППр          | 8                | 3    | 5          | 3                  | 3                                | Планарный Штыревой | –                       |
| ВВ        | Выше ОКП          | 15               | 5    | 5          | 4                  | 4                                | Планарный Штыревой | –                       |
| МСО       | Выше ВВ           | 20               | 4    | 4          | 4                  | 4                                | Планарный Штыревой | +                       |
| ПН        | Выше МСО          | 5 (20)           | 5    | 5          | 5                  | 4                                | Планарный          | +                       |

Для субтрактивных методов характерно использование фольгированных материалов с химическим удалением проводящего слоя. Эти методы отличает простота технологических процессов, однако при их использовании получить соединение слоев можно только с помощью металлической арматуры по ГОСТ 22318 (заклепки, штыри) или с помощью выводов ЭРЭ.

В зависимости от способа формирования защитного рисунка на проводящем слое заготовки существует три разновидности субтрактивной технологии – фотохимический, офсетохимический и сеточно-химический способы.

*Фотохимический способ* предусматривает нанесение на фольгированный материал фоторезиста и засветку его через фотошаблон с травлением фольги после формирования рисунка. Этот метод обладает наивысшей точностью, не требует сложного оборудования и позволяет легко перестраивать производство на новые виды печатных плат. Используется в серийном и опытном производстве при большой номенклатуре сложных плат.

*Офсетохимический способ* предусматривает печатание позитивного изображения офсетным способом кислотоустойчивой краской, обладает

большой производительностью и используется в крупносерийном производстве при малой номенклатуре печатных плат.

*Сеточно-химический способ* предусматривает печатание позитивного изображения кислотоустойчивой краской через сеточный трафарет (трафаретная печать). Обладает максимальной производительностью. Применяется в крупносерийном и массовом производстве при малой номенклатуре печатных плат.

Из полуаддитивных технологий наиболее широко применяется комбинированный позитивный метод, позволяющий производить металлизацию отверстий. В данном случае на поверхности просверленных или пробитых отверстий химически осаждается медь, а затем производится ее гальваническое наращивание до необходимой толщины. В качестве материала основания применяются фольгированный гетинакс или текстолит с толщиной фольги 35 или 50 мкм. Поскольку электрохимическое осаждение меди происходит не только в отверстиях, но и на проводящих участках, толщина проводников получается очень большой. Этот недостаток устраняется при использовании полуаддитивного метода, при котором в качестве материала основания применяется слофадит с толщиной фольги 5 мкм.

К механическим методам изготовления ПП относят *фрезерование*, при котором удаление фольги проводится на специальных координатно-фрезерных станках.

### **7.3. Факторы, влияющие на качество проектирования печатных плат**

Габариты, конструкция и качество печатного узла и аппаратуры во многом зависят от выбранного принципа конструирования. Таких принципов четыре: моносхемный, функционально-блочный, функционально-модульный и функционально-узловой.

*Моносхемный (моноконструкций) принцип*: вся электрическая схема изделия располагается на одной печатной плате. Метод отличается повышенной плоскостностью компоновки, малое количество крепежных деталей, отсутствие межплатных соединений. Ввиду ограниченной ремонтпригодности применяется для бытовой, дешевой и невосстанавливаемой аппаратуры.

*Функционально-блочный (схемно-узловой) принцип*: вся электрическая схема разбивается на отдельные части (с четко выраженными входными и выходными характеристиками – УВЧ, УПЧ и т. д.), которые выполняются на отдельных печатных платах. Для метода характерны улучшенная компоновка и ремонтпригодность. Предполагает наличие коммутационной платы или жгута.

*Функционально-модульный (каскадно-узловой) принцип*: на отдельной печатной плате выполняется каждый каскад. При большой объемной плотности компоновки, простоте обслуживания и повышенной стойкости к механическим воздействиям наблюдается увеличение габаритов и массы за счет большого числа армирующих и крепежных деталей. Большое число межплатных соединений увеличивает наводки и снижает надежность изделия.

Этот метод применяется редко в связи с ростом применения микросхем (МС) высокой степени интеграции.

*Функционально-узловой принцип:* электрическая схема разбивается на узлы, каждый из которых выполняет ограниченное число функций. Отличается простотой, высокой надежностью, большой объемной плотностью и стойкостью к внешним воздействиям. Однако несколько увеличены вес и число межплатных соединений по сравнению с реализацией моносхемного или схемно-узлового принципов. Рекомендуется для изготовления аппаратуры с малым временем восстановления, часто модернизируемой аппаратуры, а также аппаратуры, назначение которой зависит от набора функциональных частей.

В чистом виде рассмотренные принципы конструирования аппаратуры на печатных платах применяются редко, однако при выборе любого принципа (за исключением моносхемного) необходимо стремиться к унификации по типоразмерам проектируемых ПП.

На качество проектирования печатных плат влияют также следующие факторы:

- степень сложности ПУ;
- способ изготовления ПП;
- назначение изделия;
- условия эксплуатации;
- диапазон частот и рабочих напряжений.

По степени сложности аппаратура делится на пять групп:

1. *Простая* содержит до 10 активных ЭРЭ (2–3 МС).
2. *Нормальной сложности* – 10–20 активных ЭРЭ (до 5 МС).
3. *Повышенной сложности* – до 50 активных элементов (до 20 МС), возможно использование больших интегральных схем (БИС).
4. *Высокой сложности* – до 100 активных ЭРЭ (до 50 МС), применение (БИС).
5. *Весьма высокой сложности* – свыше 100 активных ЭРЭ (свыше 50 МС), применение БИС и сверхбольших интегральных схем (СБИС).

Характер производства (серийность выпуска), с учетом степени сложности, влияет на выбор способа получения печатного рисунка (фотоспособ, сеточный или офсетный способы). Выбор способа пайки ЭРЭ формирует требования к элементам печатного рисунка и взаимной ориентации этих элементов.

Для крупносерийного и массового производства рекомендуются офсетный и сеточный методы формирования рисунка, маркирование трафаретное и травлением.

Для серийного производства рекомендуются фотоспособ и сеточный способ, маркирование трафаретное и травлением.

Для единичного и опытного производства – фотоспособ и фрезерование, маркирование травлением и ручная маркировка. Применение фрезеро-

вания для других типов производств сдерживается высокой стоимостью изготовления, однако технологической подготовки производства при механическом способе формирования печатного рисунка не требуется. В [табл. 7.2](#) приведены сравнительные данные для ПП, изготовленных по различным технологиям.

Для изделий 1–2-й групп сложности применим любой способ формирования рисунка.

Для изделий 3-й группы сложности – любой способ формирования рисунка, кроме сеточного.

Для изделий 4–5-й групп сложности – формирование рисунка фотоспособом.

Таблица 7.2

**Сравнительная характеристика стоимости и сроков изготовления ПП, выполненных по субтрактивной и механической технологиям**

| Характеристика               | Цена изготовления (срок изготовления) ПП, отн. ед. |                     |
|------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------|
|                              | Технология изготовления                            |                     |
|                              | Метод фрезерования                                 | Субтрактивный метод |
| Подготовка производства      | –                                                  | 10 за один слой     |
| Односторонняя печатная плата | 2,0 (0,3–0,45)                                     | 1,0 (1,0)           |
| Двухсторонняя печатная плата | 4,0 (0,45–0,7)                                     | 1,3 (1,0)           |

Применяемые в крупносерийном производстве групповые способы пайки (пайка волной припоя, окунанием, для монтажа на поверхность – в термопечах) накладывают дополнительные ограничения на способы установки ЭРЭ и конфигурацию печатного рисунка. Например, элементы должны быть зафиксированы дополнительно на месте установки, токопроводящие дорожки должны располагаться параллельно сторонам платы, контактные площадки не должны иметь избыточной площади и т. д.

На качество проектирования ПП влияют также назначение изделия и объект установки ЭС. Для бытовой ЭС рекомендуется формирование рисунка сеточным и офсетным способами, а для аппаратуры специального назначения – офсетным и фотоспособом. Для аппаратуры автоматики, телемеханики и вычислительной техники предпочтительны фотоспособы, отличающиеся наибольшей разрешающей способностью.

Для стационарной аппаратуры применимы все принципы конструирования. Для носимой (кроме бытовой) – все принципы, кроме моносхемного, если при его применении плата по механическим характеристикам не удовлетворяет предъявляемым требованиям. Для подвижной ЭС применяются каскадно-узловой и функционально-узловой принципы. Для высокоподвижной основным является функционально-узловой принцип.



Если рассматривать ЭС с точки зрения обслуживаемости во время эксплуатации, то для аппаратуры разового действия применим любой принцип конструирования, для ремонтпригодной и с подстройкой в процессе эксплуатации – все принципы, кроме моносхемного. Для изделий с выборочным контролем во время эксплуатации рекомендуются функционально-узловой и каскадно-узловой принципы.

Условия эксплуатации ЭС определяют выбор группы жесткости, которая нормирует условия и параметры испытаний, проводимых с целью проверки работоспособности ПП. В соответствии с ГОСТ 23752 выделены четыре группы жесткости ПП ([табл. 7.3](#)).

Таблица 7.3

**Группы жесткости ПП**

| Воздействующие факторы                 |            | Группа жесткости              |                               |                               |          |
|----------------------------------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|
|                                        |            | 1                             | 2                             | 3                             | 4        |
| Температура окружающей среды, °С       | повышенная | + 55                          | + 85                          | + 85                          | + 100    |
|                                        | пониженная | – 25                          | – 40                          | – 60                          | – 60     |
| Относительная влажность, %             |            | 75 (при температуре до 35 °С) | 98 (при температуре до 35 °С) | 98 (при температуре до 40 °С) |          |
| Смена температур, °С                   |            | От – 40 до + 55               |                               |                               |          |
| Атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.) |            | Нормальное                    | 53,6 (400)                    |                               | 0,67 (5) |

Поскольку каждое изделие ЭС проходит разные виды контроля и приемочных испытаний, то обязательное задание в КД группы жесткости однозначно определяет процедуры испытаний для конкретных ПП.

Частотный диапазон и рабочее напряжение кроме требований к конфигурации рисунка влияют и на выбор способа изготовления. При частотах до 6 МГц и напряжениях до 50 В приемлемы все способы изготовления, до 30 МГц и до 300 В не применяется сеточный способ формирования рисунка, свыше 30 МГц и свыше 300 В печатные платы изготавливаются только фотоспособом.

## 7.4. Порядок проектирования печатных плат

Топологическое проектирование включает следующие этапы:

1. *Компоновка* (упаковка частей схемы в типовые конструктивные единицы).
2. *Размещение* (размещение конструктивных узлов или ЭРЭ на монтажном пространстве несущей конструкции (блока, печатной платы, подложки, кристалла) по определенным критериям).

3. *Трассировка* (определение конкретных геометрических параметров печатного, пленочного или проводного монтажа, реализующего соединения между элементами схемы).

В общем случае можно выделить такую последовательность процедур проектирования, применяемых при разработке печатных плат:

1. Анализ частного технического задания на разработку платы.
2. Выбор класса точности и шага координатной сетки.
3. Выбор типа ПП, ее габаритов и материала основания.
4. Выбор и расчет элементов печатного рисунка.
5. Размещение электрорадиоэлементов.
6. Исследование путем математического моделирования различных физических процессов (тепловых, механических, электромагнитных).
7. Трассировка печатных элементов, уточнение типа ПП, класса точности и габаритов.
8. Выбор конструкционных покрытий.
9. Разработка маркировки.
10. Выпуск конструкторской документации.

Процедуры 5, 7 проводят после настройки программ-трассировщиков, входящих в САПР ПП (P-CAD, Pspase, ACCEL и т. п.), по результатам процедур 2–4.

## **7.5. Анализ технического задания на плату**

Частное техническое задание на плату формируется на основе технического задания (ТЗ) изделия. В нем определяются: условия эксплуатации, серийность выпуска, условия размещения печатной платы в изделии и способ ее крепления, габаритно-установочные размеры, вид электрической коммутации платы с выносными ЭРЭ и другими узлами и т. п. *Комплект КД, включающий ЧТЗ, схему электрическую принципиальную, перечень элементов и карту электрических режимов, является основным документом для разработки печатного узла.*

Условия эксплуатации должны включать как климатические, так и механические факторы, а также вид защиты, обеспечиваемый несущей конструкцией, корпусом, кожухом и т. п. Учет климатических воздействий необходим для выбора группы жесткости ПП и дополнительной защиты ПУ лакокрасочными покрытиями.

Механические дестабилизирующие факторы (удары, вибрации, линейные ускорения) задаются с указанием направления их воздействия, что необходимо для выбора правильной ориентации элементов на плате (с учетом ориентации платы в блоке), способов дополнительного крепления ЭРЭ, материала основания и габаритов ПП.

С точки зрения уменьшения количества межплатных соединений, массы и количества крепежных элементов выгоднее применять одноплатные конструкции или снижать в изделии количество печатных плат соответственно с увеличением их габаритов. Однако чем больше размеры и масса печатного узла, тем ниже его резонансная частота и выше вероятность ее попадания в диапазон возбуждающих частот. Поэтому для подвижной ЭС даже на этапе анализа ЧТЗ необходимо оценивать устойчивость проектируемой ПП при заданных механических воздействиях.

Конструкторский анализ схем электрических и карты электрических режимов работы ЭРЭ позволяют выявить:

- тепловыделяющие и теплочувствительные ЭРЭ, электрорадиоэлементы, сопрягаемые с несущей конструкцией (индикаторы, переключатели и т. п.) для последующей компоновки ПУ;
- подборные ЭРЭ и ЭРЭ с малой надежностью для принятия необходимых мер по многократной перепайке в процессе настройки, регулировки или эксплуатации ПУ или прибора в целом;
- точки, необходимые для проведения внутрисхемного контроля с целью введения в топологию проводящего рисунка контрольных контактных площадок;
- электрические цепи различного функционального назначения.

Обычно выделяют потенциальные (питания и земли), сигнальные (маломощные и большой величиной сигнала), управляющие цепи и цепи, которые необходимо экранировать. Это особенно важно при проектировании МПП и устройств с малым уровнем входных токов.

Конструкторский анализ элементной базы состоит в определении массы, габаритных размеров, установочной площади, диаметра выводов электрорадиоэлементов. Масса и габаритные размеры применяемых компонентов влияют на выбор варианта и места установки ЭРЭ и способа его дополнительного крепления.

Диаметры выводов ЭРЭ необходимы для расчета диаметров монтажных отверстий.

Габаритные размеры, а точнее, установочные площади, позволяют предварительно оценить площадь печатной платы.

Установочная площадь электрорадиоэлемента ([рис. 7.9](#)) определяется по справочникам или вычисляется по формуле

$$S_i = 1,3LB, \quad (7.1)$$

где  $L$  и  $B$  – длина и ширина ЭРЭ по установочным размерам, в соответствии с вариантом установки по ОСТ 4.010.030 – «Установка навесных элементов на печатные платы».

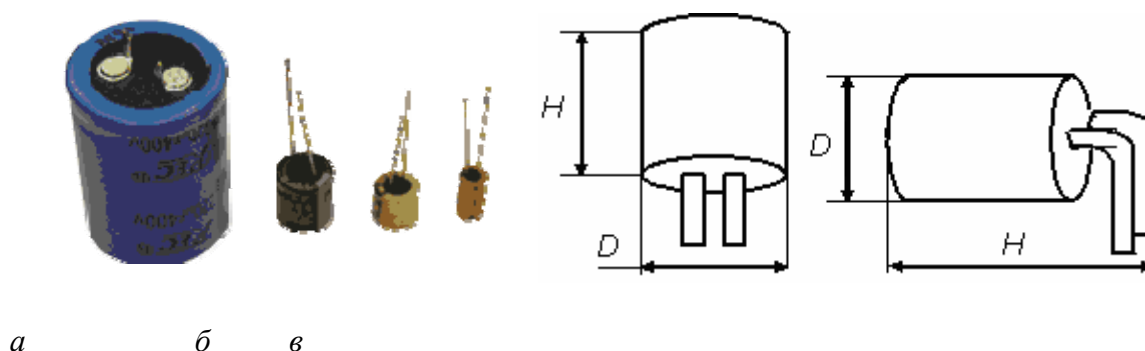


Рис. 7.9. Внешний вид конденсатора (а) и влияние варианта его установки на установочную площадь: б –  $S_i = 1,3\pi D^2/4$ ; в –  $S_i = 1,3DH$

Поскольку в общем случае установочная площадь ЭРЭ может определяться длиной и высотой, шириной и высотой ЭРЭ или вариантом его расположения на плате и иметь при этом разные значения, то желательно определять минимальную и максимальную установочные площади.

При вычислении установочной площади ЭРЭ следует помнить, что установочные размеры, особенно для компонентов с разнонаправленными выводами, могут зависеть от шага координатной сетки при одном и том же варианте установки.

## 7.6. Выбор класса точности и шага координатной сетки

На основании имеющихся в ЧТЗ данных по типу производства, группе сложности и составу элементной базы конструктор может ориентировочно определить класс точности печатной платы и затем выбрать шаг координатной сетки, который является одним из параметров, необходимых для настройки редакторов печатных плат и программ-трассировщиков, и поэтому должен быть установлен до процедур компоновки ПП и трассировки проводников.

**Выбор класса точности.** Будучи одной из характеристик печатной платы, класс точности определяет номинальные, минимальные, максимальные и точностные значения элементов печатного рисунка и параметров печатных плат (диаметры отверстий, габаритные размеры и т. д.).

Таблица 7.4

**Характеристика классов точности**

| Класс точности | Область применения                                                                                   | Основной материал                                          | Тип производства          |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1              | Печатные платы с дискретными элементами и низкой плотностью монтажа (1-я и 2-я группы сложности)     | Фольгированный гетинакс                                    | Любой                     |
| 2              | Печатные платы с дискретными элементами и ИМС со средней плотностью монтажа (2–4-я группы сложности) | Фольгированный гетинакс                                    | Все, кроме массового      |
| 3              | Печатные платы с ИМС и с высокой плотностью монтажа (3-я и 4-я группы сложности)                     | Фольгированный стеклотекстолит                             | Единичное и мелкосерийное |
| 4, 5           | Печатные платы с БИС, СБИС, ИМС и высокой плотностью монтажа                                         | Термостойкие травящиеся диэлектрики со сверхтонкой фольгой | Единичное и мелкосерийное |

В соответствии с ГОСТ 23751 – «Платы печатные. Основные параметры конструкции» выделены пять классов точности, краткая характеристика которых приведена в [табл. 7.4](#).

Классы точности 1 и 2 характеризуются простотой, надежностью, низкой стоимостью, 4-й и 5-й классы – использованием высококачественных материалов, спецоснастки и дорогого оборудования.

Класс точности определяет в первую очередь минимально допустимые геометрические размеры элементов ПП ([табл. 7.5](#)).

Таблица 7.5

**Влияние класса точности на параметры ПП**

| Минимально допустимые геометрические параметры печатных плат, мм | Класс точности |      |      |      |       |
|------------------------------------------------------------------|----------------|------|------|------|-------|
|                                                                  | 1              | 2    | 3    | 4    | 5     |
| Ширина проводника $t$                                            | 0,75           | 0,45 | 0,25 | 0,15 | 0,10  |
| Расстояние между проводниками $S$                                | 0,75           | 0,45 | 0,25 | 0,15 | 0,10  |
| Ширина гарантийного пояса $b$                                    | 0,30           | 0,20 | 0,10 | 0,05 | 0,025 |
| Относительная толщина ПП $J$                                     | 0,40           | 0,40 | 0,33 | 0,25 | 0,20  |

*Ширина печатного проводника* – поперечный размер проводника на любом участке в плоскости основания.

*Расстояние между проводниками* – расстояние между краями соседних проводников на одном слое ПП.

*Ширина гарантийного пояса* – расстояние между краем монтажного отверстия и краем контактной площадки ([рис. 7.10](#)).

*Относительная толщина ПП* – отношение минимального диаметра металлизированного отверстия к толщине платы. Толщина платы определяется толщиной материала основания с учетом толщины фольги.

Первоначально выбранный класс точности при дальнейшей разработке может быть изменен, поскольку конструирование есть итерационный процесс синтеза через анализ.

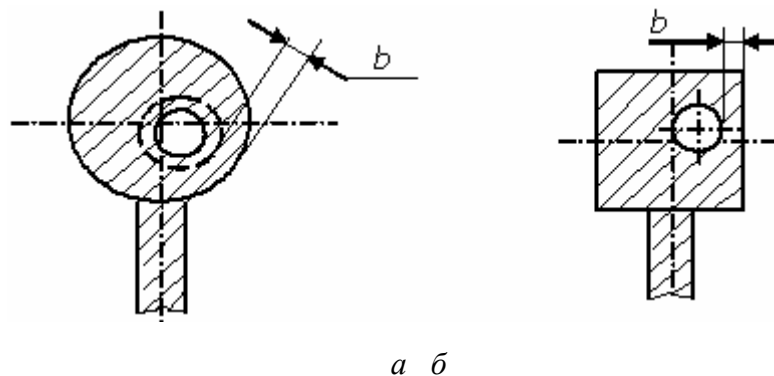


Рис. 7.10. Гарантийный пояс: *a* – металлизированное отверстие;  
*б* – неметаллизированное отверстие

Кроме параметров печатных плат, указанных в [табл. 7.5](#), класс точности влияет на позиционные допуски расположения осей монтажных и переходных отверстий, позиционные допуски расположения контактных площадок и проводников. Таким образом, он определяет ограничения на элементы печатных плат, накладываемые существующими технологическими процессами.

**Выбор шага координатной сетки.** Координатная сетка вводится для задания координат центров монтажных и переходных отверстий, контактных площадок и других элементов печатного рисунка на поверхности ПП и является самым удобным способом для указанных целей. Альтернативные способы задания координат приведены в ГОСТ 2.417.

*Шаг координатной сетки* – это расстояние между линиями координатной сетки. Его значения (для прямоугольных координат) установлены ГОСТ 10317: 2,5; 1,25; 0,625 и 0,5 мм. Шаг 2,5 мм является основным, шаг 0,5 мм применять не рекомендуется.

При выборе шага сетки руководствуются следующими соображениями: для классов точности 1 и 2, при низкой плотности монтажа, выбирают шаг 2,5 мм;

шаг 1,25 мм применяют в том случае, если на плату устанавливают многовыводные элементы с шагом расположения выводов 1,25 мм, так как все монтажные отверстия должны попадать в узлы координатной сетки.

При использовании многовыводных элементов (количество выводов по одной стороне – более 24) зарубежного производства необходимо применять не метрическую, а дюймовую систему задания шага в САПРах ПП для обеспечения условий сборки ПУ.

Применяемое технологическое оборудование для автоматизированного производства ПП тоже накладывает свои ограничения, так как большинство из них имеет дискретность установки шага 0,25 мм.

## 7.7. Выбор типа, габаритов и материала основания ПП

**Выбор типа ПП.** При проектировании печатного монтажа разработчик должен стремиться к минимизации стоимости ПП и, соответственно, числа проводящих слоев. При этом ряд топологических задач решается введением навесных перемычек (объемных проводников). Например, 80–90 % бытовой аудио- и видеотехники ведущих зарубежных производителей (SONI, PANASONIC, LG и т. д.) выполняется на односторонних печатных платах. Для повышения надежности в критичных местах (места частых перепаек, подключения внешних проводников) устанавливаются металлические заклепки.

Количество перемычек обычно не превышает 5 % от числа печатных проводников. При автоматизированной сборке ПУ количество перемычек не должно быть более четырех на 100 см<sup>2</sup> площади ПП.

Таким образом, при отсутствии специальных требований, например по увеличению надежности, первоначально желательно выбирать одностороннюю плату.

**Выбор материала основания ПП.** Материал основания выбирается исходя из:

- электрических характеристик (частотный диапазон, пробивное напряжение и т. д.);
- климатических воздействий (температура и влажность);
- стойкости к механическим воздействиям (прочность, жесткость, ударная вязкость и т. д.);
- типа печатной платы (количество слоев) и способа ее изготовления.

Материалы печатных плат выбирают по ГОСТ 10316 и ОСТ 4.010.022.

Для оснований обычно используют изоляционные материалы типа фольгированных пластмасс. Наибольшее распространение в производстве ПП получили фольгированный гетинакс марок ГФ-1 (фольгированный с одной стороны), ГФ-2 (фольгированный с двух сторон) и фольгированный стеклотекстолит марок СФ-1 (фольгированный с одной стороны), СФ-2 (фольгированный с двух сторон).

Выбор металлического основания оправдан при необходимости уменьшения (в 3–4 раза) теплового сопротивления платы. Металлическое основание представляет собой лист металла толщиной 0,5 мм с полимерной пленкой толщиной 0,15 мм, накатанной с двух сторон листа.

Улучшенными тепловыми характеристиками обладает и конструкция печатного узла, представленного на [рис. 7.11](#). Такие конструкции целесообразно применять при кондуктивных способах отвода тепла и больших механических нагрузках (например, в бортовых и космических ЭС).



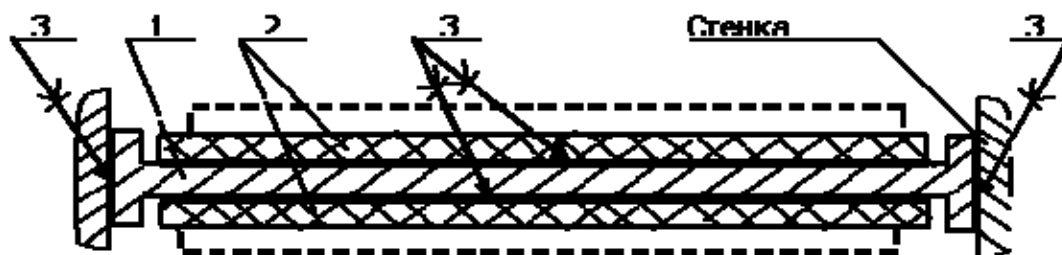


Рис. 7.11. Конструкция печатной платы с кондуктивным отводом тепла:  
1 – металлическое основание (алюминиевый сплав); 2 – печатные платы с элементами, установленными по планарной технологии; 3 – клеевые соединения

0,1 0,2 0,4  
Гибкие

0,8 1,0 1,5 2,0 3,0  
Жесткие

Рис. 7.12. Значения толщины гибких и жестких оснований ПП

Кроме материала основания на такие свойства ПП, как жесткость и теплопроводность, оказывает влияние и ее толщина. На [рис. 7.12](#) приведен размерный ряд значений толщины гибких и жестких оснований ПП (в миллиметрах).

Наибольшее распространение в применении получили толщины 1,0 и 1,5 мм. Толщина 1,0 мм обычно используется для плат с габаритами сторон не более 100 мм.

**Выбор габаритов ПП.** Габариты и конфигурация печатной платы задаются в ЧТЗ одним из следующих способов:

*жестко* – указанием всех необходимых размеров, определяемых конфигурацией платы;

*ориентировочно* – указанием:

- а) размеров других плат изделия с целью их унификации;
- б) площади платы;
- в) площади платы и соотношения сторон.

По конфигурации наиболее предпочтительна прямоугольная форма ПП, круглая и другие формы должны применяться только в технически обоснованных случаях.

Независимо от способа задания габаритов предварительно определяется необходимая площадь печатной платы. Однако если для первого способа этим должна быть подтверждена возможность реализации печатного монтажа на заданной площади ПП, то для остальных нахождение площади, занимаемой ЭРЭ, – основание для выбора численных значений габаритных размеров.

Площадь, занимаемая ЭРЭ ( $S_{\text{ЭРЭ}}$ ), вычисляется как сумма установочных площадей ЭРЭ  $S_i$ , определенных при анализе ЧТЗ. Расчетная площадь печатной платы  $S_p$ , необходимая для расположения  $n$ -го количества ЭРЭ (рабочая или монтажная зона), определяется как



$$S_p = \frac{S_i}{k_3}, \quad (7.2)$$

где  $k_3 \approx 0,6-0,7$  – коэффициент заполнения по площади.

Установочной площадью называют контур площадки, занимаемой на ПП  $i$ -м навесным элементом. На [рис. 7.13](#) условно представлены возможные зоны, влияющие на величину установочной площади. В зону коммутации помимо выводов электрорадиоэлемента входят и контактные площадки, необходимые для обеспечения электрического контактирования.

Зона для возможности применения автоматизированной сборки определяется применяемым инструментом. Границы тепловой зоны и зоны электромагнитного влияния вычисляются при анализе теплового режима и электромагнитной совместимости и учитываются, как правило, при окончательном размещении ЭРЭ.

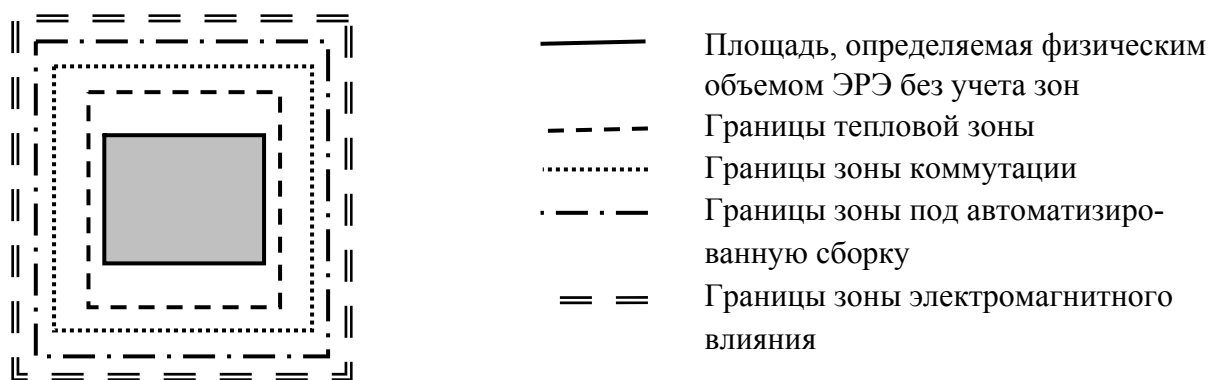


Рис. 7.13. Возможные зоны, учитываемые в процессе определения установочных площадей (границы зон показаны условно)

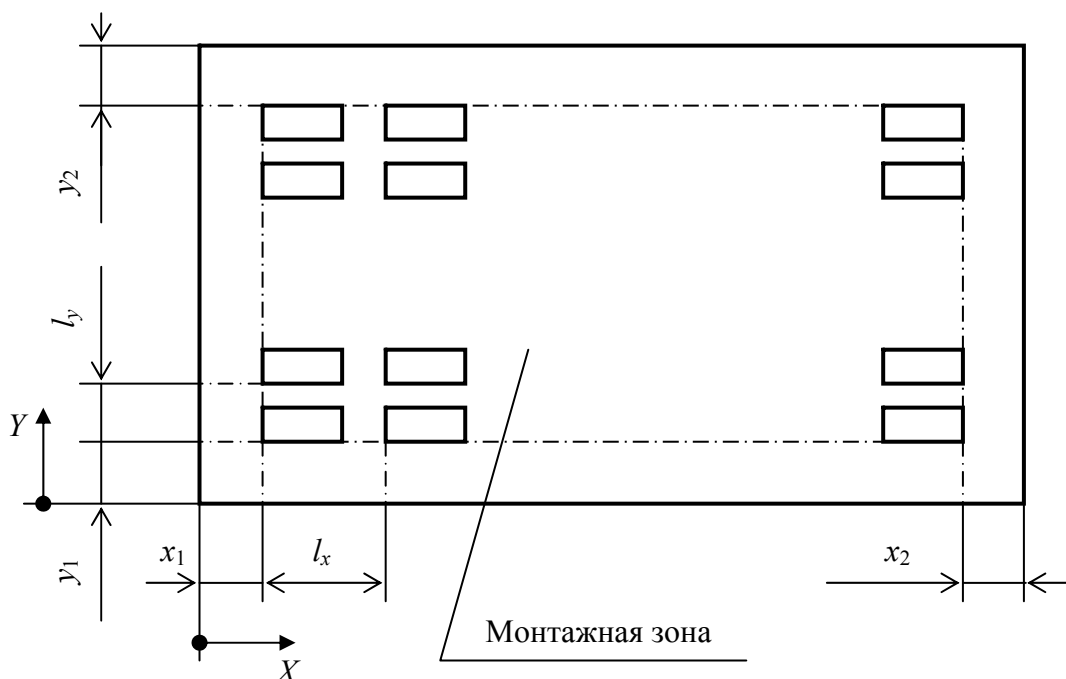


Рис. 7.14. Расположение компоновочных зон на ПП

Площадь ПП ([рис. 7.14](#)) состоит из рабочей (монтажной) зоны и зоны краевого поля, предусматриваемого для вспомогательных целей (размещения разъемов, крепежных отверстий, зон для направляющих элементов и т. п.).

Ширина краевого поля есть расстояние от края ПП до первого ряда посадочных мест ([рис. 7.14](#)). Она состоит из четырех зон:

$x_1, x_2$  – ширина краевого поля по оси  $X$  (как правило, одинакова слева и справа), которая определяется направляющими элементами конструкции, конструкцией выводов устанавливаемых на ПП ЭРЭ, крепежными изделиями и т. д.;

$y_1$  – ширина краевого поля нижней кромки ПП, предназначенного для установки соединителя. Размер краевого поля  $y_1$  зависит от типа выбранного соединителя ([табл. 7.6](#));

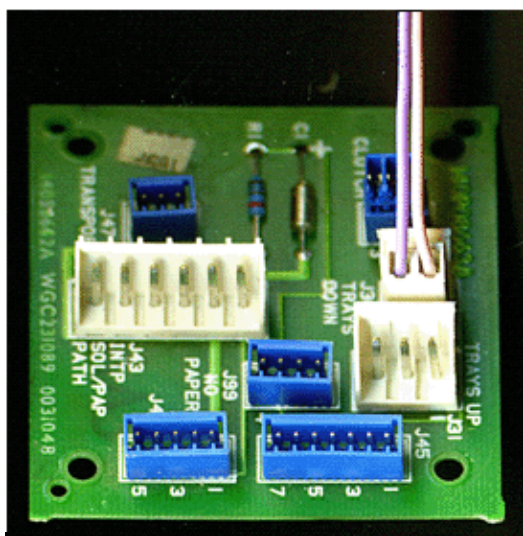
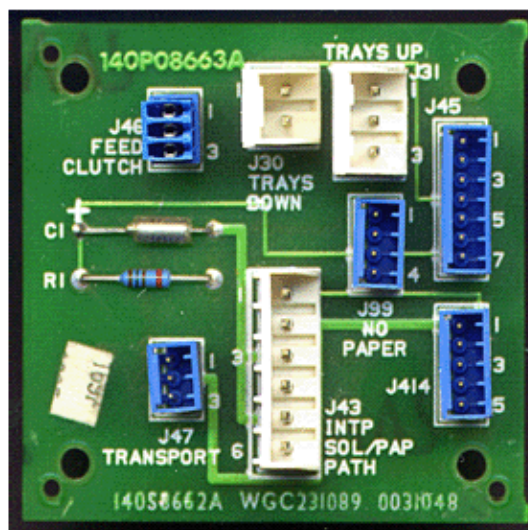
$y_2$  – ширина краевого поля на верхней кромке ПП, где размещаются: лицевая панель для модулей кассетной конструкции ([рис. 7.14](#)) и контрольные гнезда.

Для штыревых выводов величину  $x$  принимают равной 5 мм, для планарных – 2,5 мм. Величина  $y_2$  при отсутствии контрольных гнезд равна 2,5 мм, а при их наличии – 12,5 мм. При установке лицевых панелей  $y_2$  увеличивается примерно на 5–10 мм и зависит от конкретного конструктивного исполнения.

В последнее время с применением малогабаритных соединителей типа СНП 10 и плоских кабелей для ряда радиотехнических изделий (бытовая радиоаппаратура, персональные ЭВМ, электронные телефонные аппараты и т. п.) внешнее соединение может производиться через разъемы, установленные в монтажной зоне ([рис. 7.15](#)). Однако распайка одиночных проводников и жгутов на ПП должна производиться только в зонах краевого поля.

Монтажная зона, предназначенная для размещения ЭРЭ, определяется при установке однотипных микросхем не только их установочными площадями, но и шагом установки ([табл. 7.7](#)).

При вычислении габаритов ПП необходимо учитывать и то, что от края платы до центра крепежного отверстия должно быть не менее 5 мм. Кроме того, крепежные изделия (шайбы, гайки и т. п.) или их элементы (головки винтов, болтов и т. д.) не должны выступать за габариты печатной платы.

 $a$ 

6

Рис. 7.15. Расположение разъемов по всей площади ПП

Таблица 7.6

### Зависимость размера краевого поля $y_1$ от типа соединителя

| Тип соединителя        | Число контактов    | Ответная часть    | Паяльный шов             | y <sub>1</sub> |
|------------------------|--------------------|-------------------|--------------------------|----------------|
| ГРППЗ                  | 14; 36; 46; 58     | Вилка             | В отверстии              | 17,5           |
| ГРППЗ                  | 14                 | Вилка             | Внахлест                 | 15,0           |
| ГРПМ1-ШУ               | 31; 45; 51; 90     | Вилка или розетка | В отверстии              | 22,5           |
| ГРПМ1-ШУ               | 122                | Вилка или розетка | В отверстии              | 25,0           |
| ГРПМ1-ГУ               | 25                 | Вилка или розетка | В отверстии              | 25,0           |
| ГРПМ9-Н                | 25                 | Вилка             | Внахлест                 | 17,5           |
| РППМ-2                 | 142                | Вилка             | Внахлест                 | 22,5           |
| РППМ-26                | 17; 72             | Вилка             | Внахлест                 | 17,5           |
| СНПЗ4                  | 135                | Розетка           | В отверстии              | 15,0           |
| СНП58                  | 16; 32; 48; 64; 96 | Вилка             | В отверстии              | 17,0           |
| СНП59                  | 16; 32; 48; 64     | Вилка             | В отверстии              | 18,5           |
| Кабель гибкий печатный | —                  | —                 | В отверстии или внахлест | 25,0           |
| Жгут объемный          | —                  | —                 | В отверстии              | 35,0           |

Таблица 7.7

**Шаги установки микросхем в зависимости от среднего числа  
задействованных выводов**

| Корпус по<br>ГОСТ 17467 | Среднее число<br>задействованных выводов<br>в одной МС, не более | Шаг установки по осям, мм |       |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------|
|                         |                                                                  | $l_x$                     | $l_y$ |
| 1203.14-5               | 8                                                                | 22,5                      | 15,0  |
|                         | 9                                                                | 22,5                      | 17,5  |
|                         | 11                                                               | 25,0                      | 17,5  |
|                         | 12                                                               | 25,0                      | 20,0  |
|                         | 14                                                               | 27,5                      | 22,5  |
| 1206.14-5               | 8                                                                | 22,5                      | 25,0  |
|                         | 10                                                               | 25,0                      | 25,0  |
|                         | 12                                                               | 27,5                      | 25,0  |
|                         | 14                                                               | 29,0                      | 25,0  |
| 1207.14-5               | 8                                                                | 22,5                      | 32,5  |
|                         | 10                                                               | 25,0                      | 35,0  |
|                         | 12                                                               | 27,5                      | 37,5  |
|                         | 14                                                               | 29,0                      | 39,0  |
| 51211.28-5              | 13                                                               | 42,5                      | 32,5  |
|                         | 20                                                               | 47,5                      | 32,5  |
|                         | 22                                                               | 50,0                      | 32,5  |
|                         | 24                                                               | 52,5                      | 32,5  |
|                         | 26                                                               | 55,0                      | 32,5  |
|                         | 28                                                               | 57,5                      | 32,5  |

Если конфигурация и габариты платы не определены жестко базовой несущей конструкцией (например, «База-1», «База-2», «База-3», «База-4», ЕВРОМЕХАНИКА и т. д.), то полученные численные значения размеров длины и ширины ПП следует выбирать в соответствии с ОСТ 4.010.020 ([табл. 7.8](#)).

Максимальный размер любой из сторон должен быть не более 470 мм. Соотношение линейных размеров сторон ПП должно быть не более 3:1, предпочтительное – 2:1.

Размеры каждой стороны печатной платы должны быть кратными, например: 2,5 – при длине до 100 мм; 5 – при длине до 350 мм; 10 – при длине более 350 мм.

Допуски на линейные размеры сторон печатной платы должны соответствовать ГОСТ 25346 и ГОСТ 25347. Для сопрягаемых размеров ПП (например, при установке по направляющим) устанавливается допуск по 12-му качеству, для несопрягаемых – по 14-му. Отклонение от перпендикулярности печатных плат не должно быть более 0,2 на 100 мм длины.

Рекомендуемое количество типоразмеров ПП в изделии – не более трех.

Таблица 7.8

**Линейные размеры ОПП, ДПП, МПП на жестком основании**

| Размер сторон печатных плат, мм |                                 |            |                                                                |            |                                                       |
|---------------------------------|---------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------|
| Ширина                          | Длина                           | Ширина     | Длина                                                          | Ширина     | Длина                                                 |
| 22,5                            | 60                              | 70         | (70); (90); 110; 120;<br>(140); 150                            | 120        | 140; (160); 180;<br>200; 220; 240; 280                |
| 30                              | 40; 55; 60; (90)                | 75         | 170                                                            | 130        | 150; 170; 200; 300                                    |
| 35                              | 100                             | 80         | 80; 90; 100; (110);<br>140; 160; 200; 240                      | 140        | (140); 150; 220;<br>240; 280                          |
| 40                              | (40); 50; 60;<br>(80); 100; 120 | 85         | 150                                                            | 150        | 170; (180); 200;<br>240; 280                          |
| 50                              | (50); 60; (70);<br>75; 80; 100  | 90         | (90); 100; 110; 120;<br>130; 150; 160; 170;<br>(180); 200; 260 | 160        | 200; 210; 240; 320                                    |
| 60<br>62,5                      | 60; (75); 80; 90;<br>(100); 125 | 100<br>105 | 100; 110; 120; 150;<br>160; (170) 125; 130                     | 170<br>185 | 170; 200; 240; 250;<br>270; 280; 300; 340<br>205; 270 |
| 65                              | 90; 100                         | 110        | 150; (160); 170;<br>(200); 260                                 | 200        | 220; 240; 3200                                        |
|                                 |                                 |            |                                                                | 240        | 300; 320                                              |

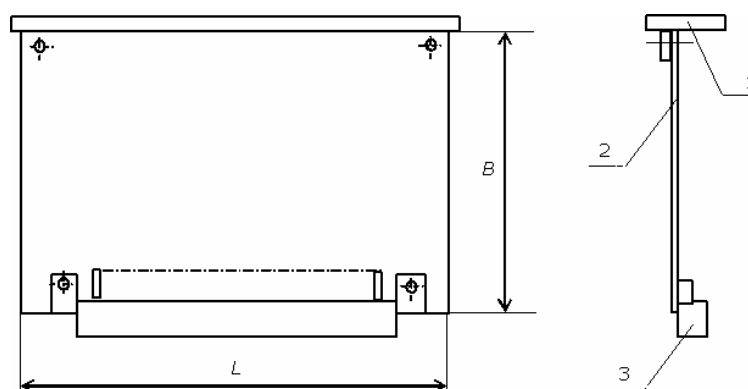
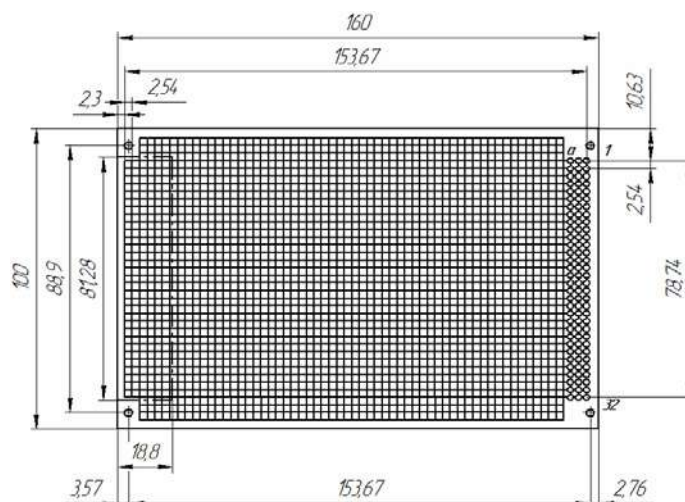
*a**б*

Рис. 7.16. Конструктивное исполнение: *a* – ячейки; *б* – европлаты:  
*1* – панель; *2* – печатный узел; *3* – электрический соединитель (один или два)

Проектирование технологичной ЭС основано на модульном принципе. В настоящее время существует ряд систем модульных конструктивов, которые предназначены для размещения стандартных плат, кассет и конструкций, унифицированных по высоте, ширине и глубине. В них приняты несколько опорных и рекомендуемых для повторения величин высоты, ширины и глубины. Эти конструктивы учитывают тот факт, что в раму (корзину, крейт) могут встраиваться изделия различных производителей.

Модульные конструкции с ПУ ([рис. 7.16](#)) в отечественной литературе называются *ячейками*, для стандарта ЕВРОМЕХАНИКА приняты названия *плата* (*Druckplatte*) и *кассета* (*Kassete*).

Плата, в отличие от кассеты, представляет собой бескаркасную конструкцию, ячейка может быть как каркасной, так и бескаркасной.

Базовые несущие конструкции (БНК) для ЭС, определяющие размеры печатных плат, делятся на три уровня: БНК-1, БНК-2 и БНК-3. Структура обозначения входящих в них ячеек имеет следующий вид.

Для конструкций БНК-1 и БНК-2 модуль приращения  $M = 5$ , для БНК-3 –  $M = 10$ . Соответственно, для ячейки БНК-1 Я34.15.01.01 размеры печатной платы  $H \times B = 170 \times 75$  мм.

Для универсальных типовых конструкций УТК-I и УТК-II применяются три типоразмера печатных плат:  $140 \times 150$ ,  $160 \times 220$  и  $160 \times 280$ . Печатные платы типоразмера  $140 \times 150$  предназначены для кассетной компоновки блоков, типоразмера  $160 \times 220$  – для книжной компоновки, типоразмера  $160 \times 280$  – для установки в частичный блок.

Размеры европлаты в стандарте ЕВРОМЕХАНИКА приведены на [рис. 7.16, б](#).

Исходя из изложенного, можно рекомендовать такую последовательность в предварительном определении габаритных размеров ПП:

- вычисление площади монтажной зоны по формуле ([7.2](#));
- определение длины и ширины монтажной зоны. В первом приближении их можно определить как  $L = B = \sqrt{S}$ ;
- учет габаритных размеров зон подключения внешних выводов;
- учет габаритных размеров зон размещения элементов контроля;
- учет зон механического крепления ПП и зон, определяемых несущей конструкцией блока (направляющие и т. п.);
- приведение полученных значений размеров к стандартным ([см. табл. 7.8](#)).

## 7.8. Расчет элементов печатного рисунка

При реализации схемотехнических решений минимально необходимые размеры элементов печатного монтажа и их взаимное расположение определяются в результате расчета исходя из технологических ограничений и заданных электрических параметров. Однако из практики известно, что слишком малые размеры элементов и жесткие допуски значительно снижают процент выхода годных изделий, поэтому при конструировании печатных плат после определения параметров элементов необходимо определить их оптимальные размеры, зазоры между ними и допуски на изготовление.

К параметрам элементов печатной схемы, которые необходимо определить перед трассировкой, относятся:

- диаметры монтажных и переходных отверстий;
- форма и размеры контактных площадок;
- размеры печатных проводников;
- расстояния между элементами печатного рисунка.

Расчет или обоснование численных значений параметров указанных элементов проводятся исходя из технологических ограничений и электрических режимов работы (токов, напряжений и т. д.) проектируемого ПУ.

При проведении энергетических расчетов допустимую токовую нагрузку на элементы проводящего рисунка ПП (в зависимости от допустимого перегрева проводника относительно температуры окружающей среды) выбирают по табл. 7.9. Для проводников, имеющих дополнительное металлическое покрытие менее 12 мкм, за толщину принимают толщину основного проводящего слоя (фольги). При толщине покрытия более 12 мкм за толщину принимают суммарную толщину основной и осажденной меди  $H_{\text{пр}}$ . Величину допустимой токовой нагрузки следует уменьшать на 15 % для проводников, расположенных на расстоянии, равном или меньшем их ширины, а также для проводников, выполненных по полуматричной или матричной технологиям.



Допустимая токовая нагрузка на элементы проводящего рисунка ПП

| Характеристика медного слоя | Допустимая токовая нагрузка, А/мм <sup>2</sup> |
|-----------------------------|------------------------------------------------|
| Медная фольга               | От 100 до 250                                  |
| Гальваническая медь         | От 60 до 100                                   |

При использовании значений ширины печатного проводника  $t$ , расстояния между проводниками  $S$  и ширины гарантийного пояса  $b$ , указанных в табл. 7.5, следует иметь в виду, что они заданы для узких мест. Для свободных мест указанные значения следует устанавливать по любому более низкому классу, а для первого класса – увеличивать в два раза.

## 7.9. Расчет диаметров отверстий

Расчет рекомендуется начинать с определения размеров металлизированных отверстий. Металлизированные отверстия на печатных платах могут быть двух типов: *переходные* – для создания электрических связей между слоями (контактирование между слоями производят только через отверстия, через край ПП – недопустимо) и *монтажные* – для крепления вывода ЭРЭ. Для переходных отверстий с целью увеличения плотности монтажа диаметр выбирается по возможности минимальным и ограничивается только рассеивающей плотностью электролита, которая влияет на качество осаждения меди на диэлектрик.

Минимальный диаметр  $d_{\text{мин}}$  металлизированного отверстия зависит в первую очередь от класса точности и определяется из следующего соотношения:

$$d_{\text{мин}} = JH, \quad (7.3)$$

где  $J$  – относительная толщина ПП;  $H$  – толщина платы с учетом фольги.

Особенностью отверстий в пластмассах, применяемых для оснований ПП (в отличие от металлов), является то, что допуск на номинальный размер диаметра может быть как положительным, так и отрицательным, в соответствии с ГОСТ 23751. Это связано с тем, что в отверстиях возможно выступание неполимеризовавшейся смолы (отрицательное поле допуска), а также усадки диэлектрической подложки. Поэтому минимально применимый диаметр переходного отверстия необходимо вычислять по формуле

$$d_{\text{пер}} = JH + |\Delta d|, \quad (7.4)$$

где  $\Delta d$  – максимальное предельное отклонение диаметра рассчитываемого отверстия. Для переходных отверстий значение  $\Delta d$  следует выбирать как для металлизированных отверстий ([табл. 7.10](#)).



При установке объемных проводников и выводов элементов в металлизированное монтажное отверстие обеспечивается более надежный электрический контакт при пайке. Как видно из [рис. 7.17](#), в этом случае припой затекает в отверстие и тем самым уменьшает возможность создания «ложных» паек.

Диаметр монтажного отверстия, в отличие от переходного, должен быть больше диаметра вывода на величину, удовлетворяющую условиям пайки и автоматизированной сборки, и может быть рассчитан следующим образом:

$$d_{\text{пер}} = d_{\text{выв}} + |\Delta d| + r, \quad (7.5)$$

где  $d_{\text{выв}}$  – диаметр (для прямоугольных выводов – размер по наибольшей стороне) вывода ЭРЭ;  $r$  – гарантированный зазор между диаметром монтажного отверстия и выводом ЭРЭ.

Величину для монтажных отверстий следует выбирать с учетом всех факторов – диаметра, металлизации и оплавления. Оплавление следует учитывать при нанесении покрытий (припой ПОС-61 и сплав РОЗЕ) горячим методом (для ПП, изготовленных фотоспособами) или гальваническим (О-С (60) с последующим оплавлением (комбинированный позитивный способ или полуаддитивная технология).

Численное значение гарантированного зазора  $r$  лежит в пределах от 0,1 до 0,4 мм и выбирается исходя из следующего. Чем меньше зазор, тем больше капиллярный эффект и, соответственно, лучше пропай в монтажном отверстии. С другой стороны, большая величина зазора облегчает автоматизацию сборочных работ. Поэтому при автоматизированной установке ЭРЭ на ПП желательно применять металлизированные отверстия с зазором, равным 0,4 мм.

[Формула \(7.5\)](#) применима для случая, когда  $d_{\text{выв}} > d_{\text{пер}}$ . Для обратной ситуации при расчете  $d_{\text{монт}}$  необходимо пользоваться следующим выражением:

$$d_{\text{пер}} = JH + |\Delta d| + r. \quad (7.6)$$

Условия выбора значения такие же, как и для выражения [\(7.5\)](#). Обычно монтажные отверстия диаметром менее  $0,5H$  не применяют.

Таблица 7.10

## Предельные отклонения диаметров монтажных и переходных отверстий

| Диаметр отверстий | Наличие металлизации            | Предельные отклонения диаметра $\Delta d$ , мм |                |                |                |                |
|-------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                   |                                 | Класс точности                                 |                |                |                |                |
|                   |                                 | 1                                              | 2              | 3              | 4              | 5              |
| До 1,0            | Без металлизации                | $\pm 0,10$                                     | $\pm 0,10$     | $\pm 0,05$     | $\pm 0,05$     | $\pm 0,05$     |
|                   | С металлизацией без оплавления  | +0,05<br>-0,15                                 | +0,05<br>-0,15 | +0<br>-0,1     | +0<br>-0,1     | +0<br>-0,075   |
|                   | С металлизацией и с оплавлением | +0,05<br>-0,18                                 | +0,05<br>-0,18 | +0<br>-0,13    | +0<br>-0,13    | +0<br>-0,13    |
| Свыше 1,0         | Без металлизации                | $\pm 0,15$                                     | $\pm 0,15$     | $\pm 0,10$     | $\pm 0,10$     | $\pm 0,01$     |
|                   | С металлизацией без оплавления  | +0,1<br>-0,20                                  | +0,1<br>-0,20  | +0,05<br>-0,15 | +0,05<br>-0,15 | +0,05<br>-0,15 |
|                   | С металлизацией и с оплавлением | +0,1<br>-0,23                                  | +0,1<br>-0,23  | +0,05<br>-0,18 | +0,05<br>-0,18 | +0,05<br>-0,18 |

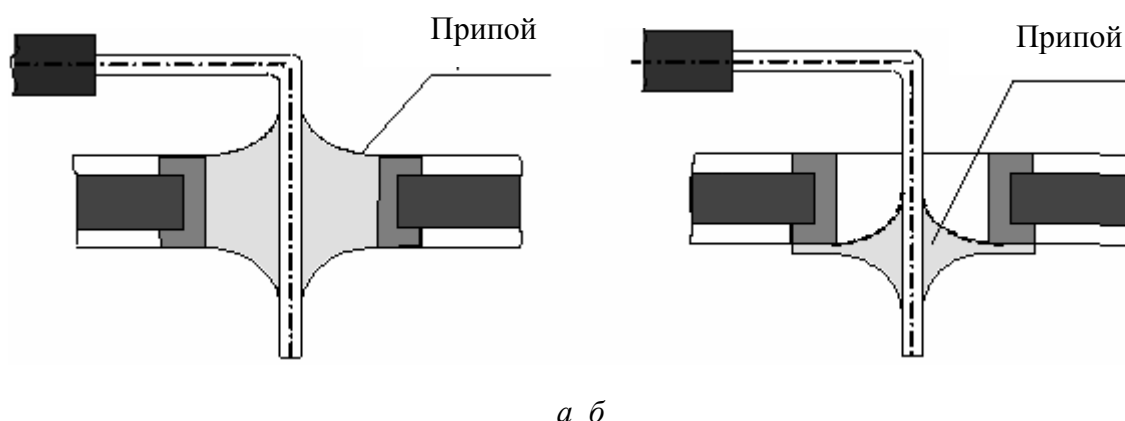


Рис. 7.17. Вид паяного соединения: *а* – пайка металлизированного отверстия; *б* – пайка неметаллизированного отверстия

Диаметры неметаллизированных монтажных отверстий рассчитывают по выражению (7.5) с учетом того, что при автоматизированной сборке ПУ гарантированный зазор  $r = 0,4$  мм, при ручной сборке  $r = 0,1-0,2$  мм.

Расчетные значения диаметров монтажных и переходных металлизированных и неметаллизированных отверстий приводятся к номинальным, которые в соответствии с ГОСТ 10317 должны быть выбраны из ряда 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 3,0.

Предпочтительные размеры монтажных отверстий выбирают из ряда 0,7; 0,9; 1,1; 1,3; 1,5, переходных – из ряда 0,7; 0,9; 1,1. Рекомендуемое количество типоразмеров значений диаметров – не более трех, как для монтажных, так и для переходных отверстий.

Для переходных отверстий необходимо проводить поверочные расчеты на возможность протекания через них заданного в ЧТЗ тока. Толщина осажденной меди в отверстиях составляет 20–25 мкм.

Металлизированные отверстия *не выполняют* на гетинаксе, фольгированном фторопласте (ФФ-4) и фольгированном армированном фторопласте (ФАФ-4). Гетинакс имеет температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) отличный от ТКЛР меди примерно в 10 раз (стеклотекстолит – всего в три раза), поэтому возможно отслаивание осажденной металлизации. С фторопластом осажденная медь имеет плохую адгезию, и, соответственно, надежность металлизированных отверстий в ФФ-4 и ФАФ-4 низка.

## 7.10. Выбор формы и размеров контактных площадок

Для припайки к печатному проводнику объемного проводника или вывода навесного ЭРЭ, на проводнике делают контактную площадку (КП) в виде участка с увеличенной шириной. Наиболее широко применяются четыре формы контактных площадок ([рис. 7.18](#)).

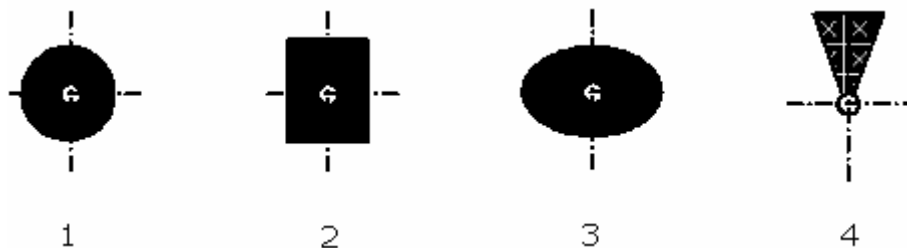


Рис. 7.18. Основные формы контактных площадок:  
1 – круглая; 2 – прямоугольная; 3 – овальная; 4 – клиновидная

Самая распространенная КП – круглая контактная площадка технологична и обеспечивает равномерное растекание припоя. Овальная КП при равномерном растекании припоя создает более прочное и надежное соединение. Прямоугольная контактная площадка, из-за неравномерности растекания припоя и, соответственно, низкого качества соединения, для монтажа выводов ЭРЭ в отверстия практически не применяется. Основное ее назначение – КП для пайки планарных выводов микросхем и бескорпусных ЭРЭ.

Клиновидные КП применяются в узких местах при недостатке площади под другие типы контактных площадок.

Рассмотрим вычисление минимального диаметра  $D_{\min}$  круглой КП для различных методов изготовления печатной платы. В основу расчетов положено определение минимального эффективного диаметра контактной площадки для каждого монтажного или переходного отверстия:

$$D_{i\text{эфф}} = 2(b + d_{i\min}/2 + T_d + T_D), \quad (7.7)$$

где  $d_{i \min}$  – максимальный диаметр монтажного или переходного отверстия с учетом допуска;  $T_d$  и  $T_D$  – позиционные допуски расположения осей отверстий и контактных площадок по ГОСТ 23751 соответственно.

*Минимальный эффективный диаметр* – это диаметр, полученный при изготовлении с учетом подтравы проводящего слоя под защитной маской (подтрав составляет порядка 70 % от толщины проводящего слоя). Поскольку толщина проводящего слоя  $H_{\text{пр}}$  (т. е. толщина фольги плюс толщина осажденной меди) различается для различных типов печатных плат, то при расчете минимального диаметра контактной площадки обязательно должен быть учтен способ изготовления ПП. Способ нанесения защитной маски также влияет на величину  $D_{\min}$ .

Для субтрактивных технологий

$$D_{\min} = D_{i \text{эфф}} + 1,5H_{\text{пр}}. \quad (7.8)$$

Для комбинированного позитивного метода и полуаддитивной технологии при фотохимическом способе нанесения защитной маски

$$D_{\min} = D_{i \text{эфф}} + 1,5H_{\text{пр}} + 0,03. \quad (7.9)$$

Для сеткографического способа нанесения защитной маски

$$D_{\min} = D_{i \text{эфф}} + 1,5H_{\text{пр}} + 0,08. \quad (7.10)$$

Толщина осажденной меди для комбинированного позитивного способа изготовления ПП составляет 15–25 мкм.

Контактную площадку, рассчитанную по формулам (7.8), (7.9), (7.10), необходимо развивать в свободную сторону, чтобы ее площадь, без учета отверстия, составляла для 1-го и 2-го классов точности не менее 2,5 мм<sup>2</sup>, а для 3-го и 4-го – 1,6 мм<sup>2</sup>.

Контактные площадки выполняют около каждого монтажного отверстия, для металлизированных отверстий – с двух сторон. При попадании в зону экрана КП формируют вырезами (секторными или кольцевыми), для предотвращения растекания припоя по экрану при пайке (рис. 7.19, а, б) или создания изоляционного зазора (рис. 7.19, в).

Обеспечение качественной пайки в зоне подсоединения вывода возможно только для контактной площадки с площадью не более 8 мм<sup>2</sup>. Поэтому формирование контактных площадок вырезами производится в случае подсоединения вывода как к печатному экрану, так и к широким проводникам.

Количество секторных вырезов (рис. 7.19, а) – 2–4, их ширина – 1–1,5 мм, расстояние между ними – 1–2 мм. Ширина одного проводника (перемычки) в случае прямоугольных вырезов (рис. 7.19, б) должна быть не менее минимальной (из технологических ограничений) для широких мест, а суммарное сечение перемычек должно обеспечивать протекание заданного тока.

В ОСТ 4.010.030 – «Установка навесных элементов на печатные платы» приведены размеры контактных групп для микросхем с планарными выводами ([рис. 7.20](#)).

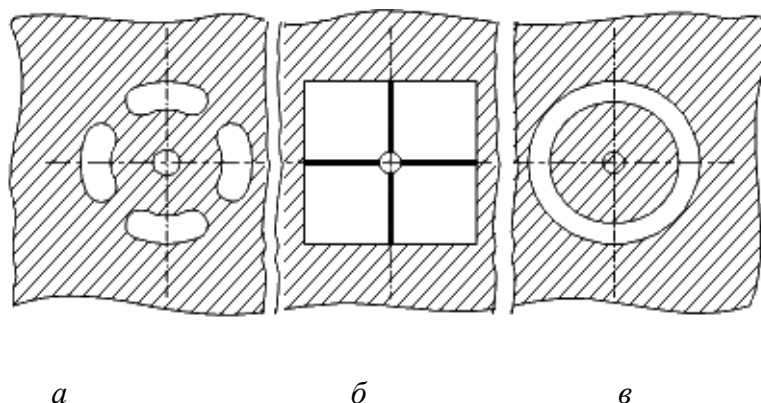


Рис. 7.19. Формирование контактных площадок в зоне экрана:  
а, б – при электрическом контакте с экраном; в – без электрического контакта

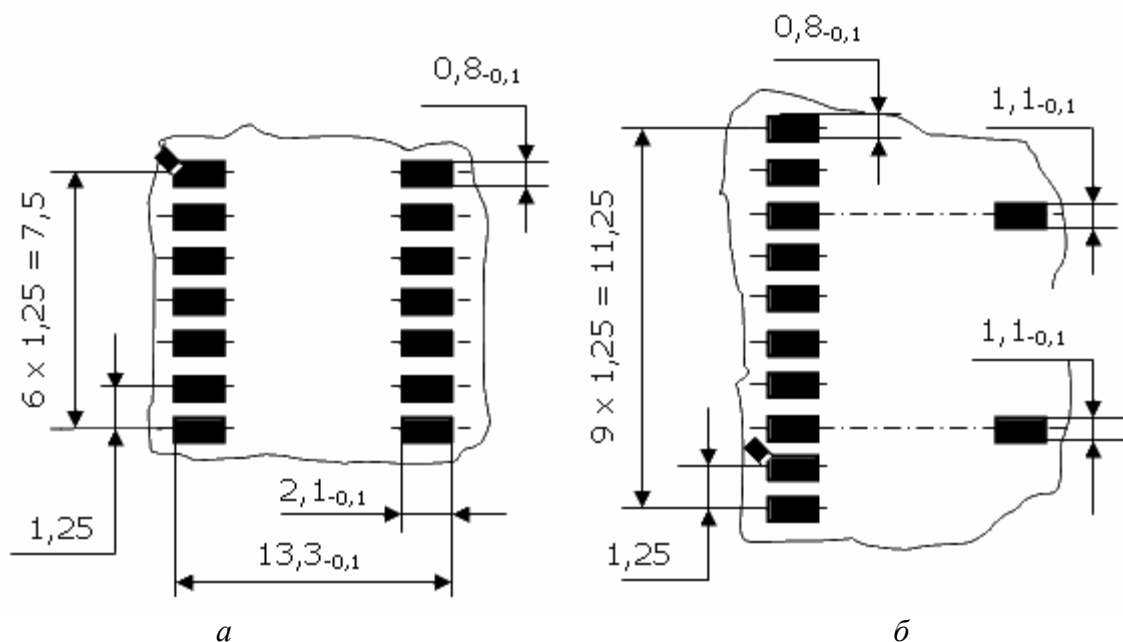


Рис. 7.20. Пример контактных групп для микросхем с прямоугольными контактными площадками: а – для микросхемы в корпусе 401.14-3; б – для диодной матрицы 2Д 908А

Таблица 7.11

**Предельные отклонения ширины печатных элементов**

| Наличие<br>металлического<br>покрытия | Предельное отклонение ширины печатных элементов $\Delta t$ , мм |                    |            |            |                 |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------|------------|------------|-----------------|
|                                       | Класс точности                                                  |                    |            |            |                 |
|                                       | 1                                                               | 2                  | 3          | 4          | 5               |
| Без покрытия                          | $\pm 0,15$                                                      | $\pm 0,10$         | $\pm 0,05$ | $\pm 0,03$ | $+0$<br>$-0,03$ |
| С покрытием                           | $+0,25$<br>$-0,20$                                              | $+0,15$<br>$-0,10$ | $\pm 0,10$ | $\pm 0,05$ | $\pm 0,03$      |

При специальном проектировании прямоугольных контактных площадок их габаритные размеры должны быть больше соответствующих размеров выводов на 0,1–0,4 мм, а расстояние между ними соответствовать 1–2-му классам точности.

Габариты прямоугольных КП для бескорпусных ЭРЭ и под планарные выводы ЭРЭ зависят от размеров паяемых элементов или выводов, а расстояние между КП определяется возможностями технологического оборудования и электрической прочностью.

Предельные отклонения размеров ширины печатных элементов  $\Delta t$  (проводников, контактных площадок, концевых печатных контактов, экранов) для узких мест не должны превышать значений, указанных в [табл. 7.11](#).

### 7.11. Расчет параметров проводников

Расчет минимальной ширины проводника  $t_{\min}$  должен производиться так же, как и для диаметра КП, с учетом подтравы проводящего слоя.

Для субтрактивных технологий

$$t_{\min} = t_{i \min} + 1,5H_{\text{пр}}, \quad (7.11)$$

где  $t_{\min}$  – минимальная ширина проводника, определяемая классом точности или полученная при проведении энергетических расчетов.

Для комбинированного позитивного метода и полуаддитивной технологии при фотохимическом способе нанесения защитной маски

$$t_{\min} = t_{i \min} + 1,5H_{\text{пр}} + 0,03. \quad (7.12)$$

Для сеткографического способа нанесения защитной маски

$$t_{\min} = t_{i \min} + 1,5H_{\text{пр}} + 0,08. \quad (7.13)$$

Плотность тока и потери кроме ширины проводника  $t$  зависят и от толщины проводящего слоя  $H_{\text{пр}}$ , которая определяется толщиной фольги и, при использовании полуаддитивных технологий, толщиной гальванически наращенной меди. Толщина фольги (в зависимости от марки применяемого материала) регламентирована для отечественных фольгированных диэлектриков значениями 5, 20, 35 и 50 мкм, для импортных – 12, 18 и 35 мкм. Если потери незначительны для работы электрической схемы, то предпочтение отдается минимальной толщине. Проводники толщиной более 50 мкм изготавливать не рекомендуется, так как с увеличением толщины происходит ухудшение сцепления проводника с материалом основания ПП.

Допустимую токовую нагрузку на элементы проводящего рисунка ПП (в зависимости от допустимого перегрева проводника относительно температуры окружающей среды) выбирают по [табл. 7.9](#). На графике [рис. 7.21](#) приведена нагрузочная способность по току одиночных медных проводников постоянной ширины  $S_{\text{пр}}$ , мм, расположенных на расстоянии большем, чем ширина проводников.

Представленный на [рис. 7.21](#) график используют при выборе токовой нагрузочной способности проводников для ПП, критичных к рассеиваемой мощности с их поверхности, и проводников, допускающих прохождение тока большой плотности. Например, для проводника толщиной 35 мкм, шириной 1 мм при нагреве на 20 °С нагрузочная способность по току будет составлять примерно 3 А.

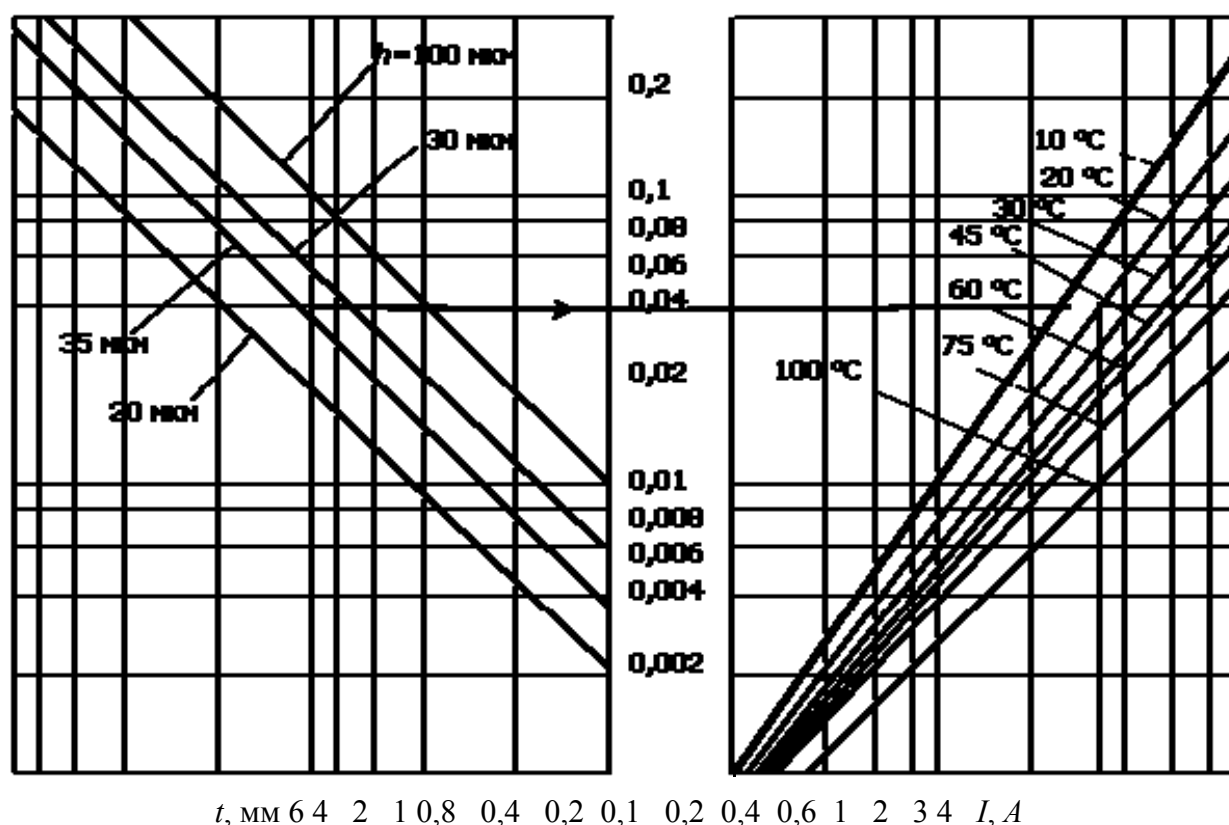


Рис. 7.21. Нагрузочная способность по току для печатных проводников

Допустимую токовую нагрузку следует уменьшать на 15 % для проводников, расположенных на расстоянии, равном или меньшем их ширины, и для проводников, выполненных по полуаддитивным технологиям. Исходя из нагрузочной способности по току, обычно выбирают 2–3 типоразмера ширины проводников на проектируемой печатной плате.



## 7.12. Расчет расстояния между элементами печатного рисунка

Минимальное расстояние между элементами печатного рисунка  $S_{\min}$  определяется исходя из технологических возможностей производства печатных плат (разрешающая способность), условий сборки ПУ (автоматизированная или ручная) и электрических параметров (пробивного напряжения и сопротивления изоляции). Технологические ограничения  $S_{\min}$  задаются классом точности, электрические – указанием в ЧТЗ пробивного напряжения, допустимых токов утечки и т. д.

Цель расчетов – определить расстояние между центрами рассматриваемых токопроводящих элементов  $L_0$ .

Расстояние  $L_0$  между серединой проводника и центром контактной площадки определяется по формуле

$$L_0 = S_{\min} + [(D_{\max} / 2 + T_l) + (t_{\max} / 2 + T_l)], \quad (7.14)$$

где  $D_{\max}$  – диаметр КП; с учетом допуска при изготовлении

$$D_{\max} = D_{\min} + (0,02-0,06);$$

$T_l$  – позиционный допуск расположения печатного проводника относительно соседнего элемента проводящего рисунка ([табл. 7.12](#));  $t_{\max}$  – ширина печатного проводника; с учетом допуска при изготовлении

$$t_{\max} = t_{\min} + (0,02-0,06).$$

Таблица 7.12

**Значения позиционного допуска расположения печатного проводника**

| Вид изделия                             | Размер печатной платы по большей стороне, мм | Значение позиционного допуска расположения $T_l$ , мм |      |      |      |      |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------|------|------|------|
|                                         |                                              | Класс точности                                        |      |      |      |      |
|                                         |                                              | 1                                                     | 2    | 3    | 4    | 5    |
| ОПП, ДПП<br>ГПК, МПП<br>(наружный слой) | До 180 включительно                          | 0,35                                                  | 0,25 | 0,15 | 0,10 | 0,5  |
|                                         | Свыше 180 до 360 включительно                | 0,40                                                  | 0,30 | 0,20 | 0,10 | 0,08 |
|                                         | Свыше 360                                    | 0,45                                                  | 0,35 | 0,25 | 0,20 | 0,15 |
| МПП<br>(внутренний слой)                | До 180 включительно                          | 0,40                                                  | 0,30 | 0,20 | 0,15 | 0,10 |
|                                         | Свыше 180 до 360 включительно                | 0,45                                                  | 0,35 | 0,25 | 0,20 | 0,15 |
|                                         | Свыше 360                                    | 0,50                                                  | 0,40 | 0,30 | 0,25 | 0,20 |



Таблица 7.13

**Электрофизические параметры лаков для покрытия печатных плат**

| Параметр                                              | Лак                   |                        |                        |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
|                                                       | ФЛ-583<br>(фенольный) | Э-4100<br>(эпоксидный) | УР-231<br>(уретановый) |
| Относительная диэлектрическая проницаемость, отн. ед. | –                     | 4                      | 3,46                   |
| Электрическая прочность, МВ/м, не менее               | 75                    | –                      | 75                     |
| Удельное сопротивление, Ом · см                       | –                     | $10^{15}$              | $10^{15}$              |
| Тангенс угла потерь (при $f = 1$ кГц), отн. ед        | –                     | 0,02                   | 0,02                   |
| Технологическая толщина покрытия, мк:<br>двухслойное  | –                     | 35–40                  | 35–40                  |
| трехслойное                                           | –                     | 30–55                  | 30–55                  |

Расстояние  $L_0$  между центрами двух контактных площадок определяется как

$$L_0 = S_{\min} + (D_{\max} + 2T_l). \quad (7.15)$$

Расстояние  $L_0$  между центрами двух проводников

$$L_0 = S_{\min} + [(D_{\max} / 2 + T_l) + (t_{\max} / 2 + T_l)]. \quad (7.16)$$

Минимально допустимое расстояние между печатными проводниками  $S_{\min}$ , с точки зрения обеспечения электрической прочности изоляции, определяется расположением проводников в одном или разных слоях. Нанесение на ПП диэлектрических покрытий ([табл. 7.13](#)) позволяет повысить устойчивость ПП к климатическим воздействиям, а также уменьшить расстояние между проводниками (в 1,5–2 раза) вследствие увеличения пробивного напряжения. При этом пробивное напряжение между проводниками не будет зависеть от влажности и атмосферного давления.

### 7.13. Размещение электрорадиоэлементов

Размещение ЭРЭ на монтажной зоне ПП проводят, учитывая выбранные варианты установки электрорадиоэлементов, формовки их выводов, ва-

рианты разметки под монтажные отверстия и контактные площадки (ОСТ 4.010.030) и придерживаясь приведенных ниже правил.

Сначала размещают входные и выходные контактные площадки, определяют зоны установки разъемов и КП для контроля, затем размещают ЭРЭ.

Контроль работоспособности печатных плат разделяется на контроль функционирования и внутрисхемный контроль. Контроль функционирования, как правило, проводится через выходные контактные площадки или выводы. Внутрисхемный контроль проводят с помощью испытательных контактных площадок, хотя их введение снижает плотность монтажа на 4–10 %.

При монтаже в отверстия электрорадиоэлементы устанавливают на ПП с одной стороны (для ОПП – со стороны, противоположной проводящему рисунку), ЭРЭ с планарными выводами можно располагать с двух сторон печатной платы.

Размещение проводят по каскадно от входа к выходу, группируя элементы одного каскада (особенно развязывающие и блокировочные конденсаторы) вблизи активного прибора. Функциональные узлы размещаются на плате отдельно друг от друга. Это позволяет, в ряде случаев без принятия дополнительных средств защиты (введение экранов, экранирующих проводников и т. п.), значительно уменьшить паразитные связи и наводки.

Условно схемы можно разделить на пять групп:

- чувствительные схемы с высоким входным импедансом ( $> 376,7 \text{ Ом}$ , в которых высока вероятность возникновения паразитной емкостной связи);
- чувствительные схемы с низким входным импедансом ( $< 376,7 \text{ Ом}$ , в которых высока вероятность возникновения паразитной индуктивной связи);
- схемы умеренной чувствительности или схемы, рассчитанные на умеренный уровень потребляемой мощности;
- высоковольтные схемы;
- схемы, рассчитанные на большой ток.

Аналоговые схемы обычно относятся к первым двум группам, цифровые схемы – к третьей группе, а схемы сопряжения и источники питания – к двум последним. Схемы, принадлежащие к одной и той же группе, легко объединяются и komponуются в подсистемы, однако схемы с высоким импедансом следует располагать подальше от высоковольтных схем, а схемы с низким импедансом не следует помещать рядом со схемами, рассчитанными на большой ток.

Схемы, образующие данную подсистему, должны обладать общими свойствами по входу/выходу и сравнимым уровнем помех. Такие требования обуславливают подразделение большинства систем на аналоговые и цифровые подсистемы, источники питания и подсистемы, содержащие электромагнитные приборы и переключатели.

Функциональные узлы следует размещать так, чтобы уровень сигнала возрастал с одного конца ПП к другому и можно было осуществить разводку цепей питания от источников со стороны выходного каскада ([рис. 7.22](#)).

При размещении ЭРЭ на ПП необходимо учитывать следующее:

- не следует располагать близко к теплонагруженным элементам полупроводниковые приборы, интегральные схемы, конденсаторы и другие теплочувствительные компоненты;
- должна быть предусмотрена возможность легкого доступа к элементам, которые подбираются при регулировке схемы;
- должна быть предусмотрена возможность конвективной теплоотдачи в зоне расположения теплонагруженных элементов;
- массивные и крупногабаритные ЭРЭ следует размещать вблизи элементов крепления платы.

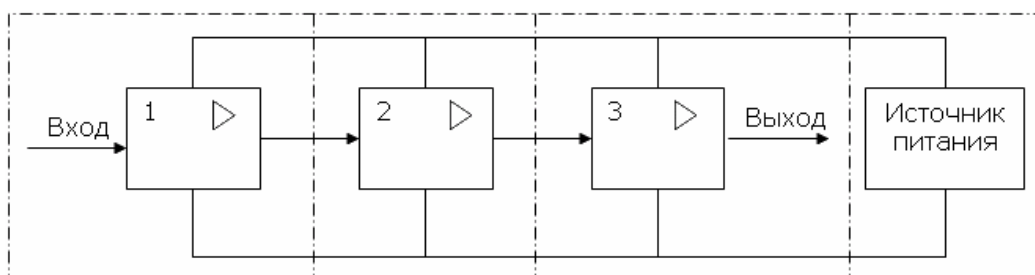


Рис. 7.22. Размещение функциональных узлов на ПП

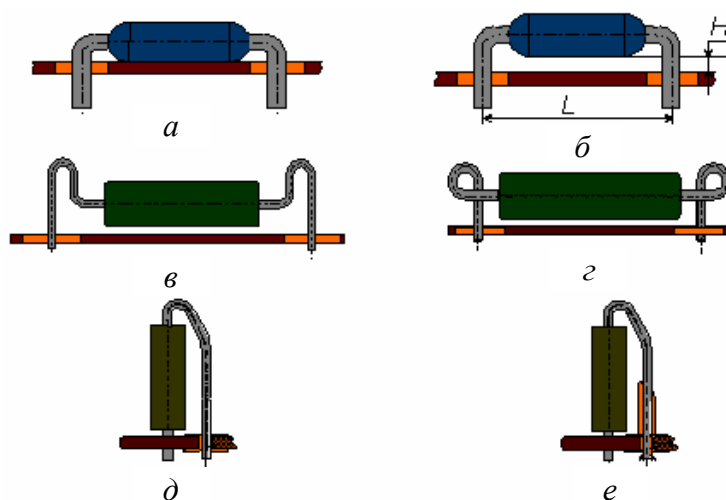


Рис. 7.23. Варианты установки ЭРЭ: *а* — непосредственно на плату; *б* — с зазором; *в, г* — со специальной формовкой выводов; *д, е* — с минимизацией установочной площади

Трансформаторы, соленоиды и другие электромагнитные устройства следует устанавливать так, чтобы их магнитные поля были направлены перпендикулярно друг другу, а сами устройства находились на максимальном расстоянии от кабелей.

Наиболее часто используемые способы установки ЭРЭ с двумя выводами показаны на [рис. 7.23](#). Вариант установки непосредственно на плату ([рис. 7.23, а](#)) прост, технологичен, обеспечивает фиксацию при групповых методах пайки. Повышение механической прочности легко осуществить покрытием электроизоляционными лаками. К недостаткам можно отнести ухудшенный конвективный отвод тепла, возможность замыкания корпуса

ЭРЭ с проводниками, проложенными под , пониженную ремонтпригодность.

Изоляцию производят надеванием на корпус элемента трубок из изоляционного материала, нанесением эпоксидной маски, установив электроизоляционные прокладки под корпусом ЭРЭ.

Защитная маска (тонкий слой эпоксидной смолы, термостойкой краски, сухого пленочного фоторезиста) применяется не только для электроизоляции, но и для экономии припоя при групповых методах пайки с одновременной защитой проводников. В этом случае маска наносится на весь проводящий слой, за исключением монтажных и контрольных контактных площадок. При проектировании защитной маски следует учитывать, что зазоры менее 0,3–0,5 мм недопустимы.

Наиболее полное устранение указанных недостатков обеспечивает переход к варианту установки с зазором между платой и корпусом (рис. 7.23, б). Однако данный вариант установки имеет ограниченное применение из-за низкой стойкости к вибрационным воздействиям (наиболее частая причина отказа в этом случае – обламывание вывода в месте крепления к корпусу) и невозможности применения групповых методов пайки.

Более устойчивы к вибрационным воздействиям варианты установки со специальной формовкой выводов (рис. 7.23, в, г). Для групповой пайки применяют либо технологические прокладки, обеспечивающие необходимый зазор (1,5–2 мм), либо дополнительную формовку, обеспечивающую фиксацию ЭРЭ (рис. 7.24).

Варианты установки, представленные на рис. 7.23, д, е, применяют для минимизации занимаемой площади. К недостаткам этих вариантов можно отнести: отсутствие возможности автоматизированной сборки и низкую стойкость к вибрационным нагрузкам. Вариант установки по рис. 7.23, е используют при коротких выводах компонентов.

Необходимо учитывать, что для всех типов ЭРЭ ограничено минимальное расстояние от корпуса элемента, на котором можно производить гибку вывода, и минимальное расстояние от корпуса до места пайки. Межцентровое расстояние определяется не только конструкцией компонента, но и его функциональными параметрами. Так, например, для диодов 2Д103 и КД103, имеющих одинаковое конструктивное исполнение, размер  $L$  составляет 22,5 мм, а для КД102 – 12,5 мм (см. ОСТ 4.010.030).

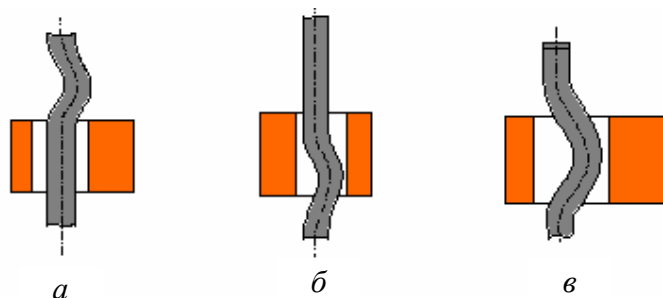


Рис. 7.24. Виды формовки выводов ЭРЭ для обеспечения возможности групповой пайки:  
а – с «зигом»; б – с «замком»; в – с «зигзамком»

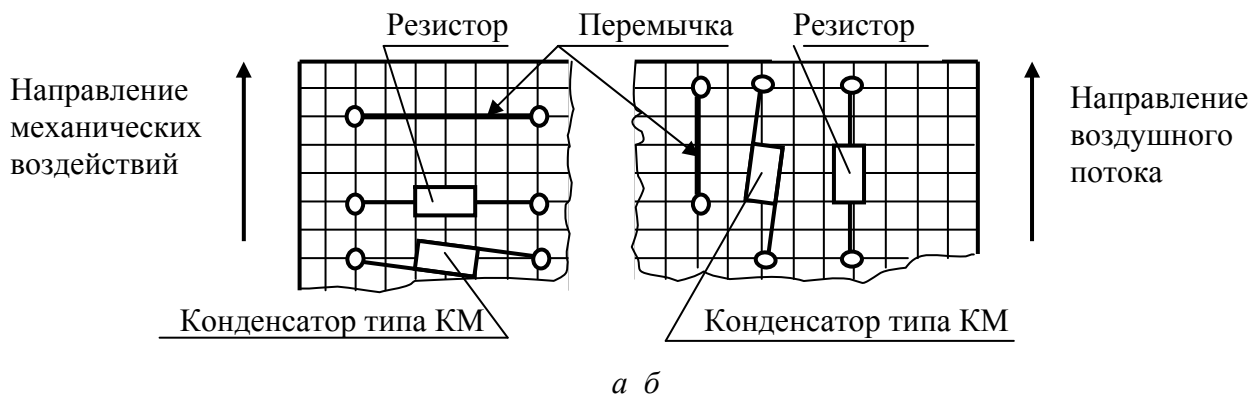


Рис. 7.25. Установка элементов на ПП:

*а* – с учетом направлений воздушного потока и механических воздействий;  
*б* – без учета направлений воздушного потока и механических воздействий

Если указания о размерах от корпуса ЭРЭ до места изгиба или до места пайки выводов ЭРЭ отсутствуют в государственных стандартах или технических условиях, то ОСТ 4.010.030 устанавливает следующие размеры:

- от корпуса ЭРЭ до места пайки – не менее 2,5 мм (для полупроводниковых приборов – не менее 3 мм);
- от корпуса ЭРЭ до оси изогнутого вывода – не менее 2 мм;
- для выводов диаметром или толщиной до 0,5 мм минимальный внутренний радиус сгиба 0,5 мм;
- для выводов диаметром или толщиной 0,5–1,1 мм минимальный внутренний радиус сгиба 1 мм.

Выводы элементов одного и того же типоразмера следует изгибать на одни и те же установочные размеры по их кратности шагу координатной сетки. Для прямоугольных выводов изгиб делают по длинной стороне.

Компоненты располагают на печатной плате так, чтобы осевые линии их корпусов (или осевые линии, соединяющие центры выводов) были параллельны сторонам печатной платы (рис. 7.25) (однотипные элементы – параллельно друг другу) и центры монтажных отверстий были расположены в узлах координатной сетки. В каждом монтажном отверстии размещают один вывод.

В случае когда расстояния между выводами многоконтактных ЭРЭ, выводы которых не подлежат формовке, не кратны шагу координатной сетки, центры отверстий под выводы располагаются по следующим правилам:

- если в конструкции навесного элемента имеются два или более выводов, расстояния между которыми кратны шагу координатной сетки, то центры отверстий под эти выводы обязательно размещают в узлах сетки, а центры отверстий под другие выводы располагают согласно чертежу на данный элемент;

- если в конструкции не имеется выводов, расстояния между которыми кратны шагу координатной сетки, то в узле сетки располагают центр монтажного отверстия, принятого за основное, а остальные помещают на вертикальной или горизонтальной линиях сетки, если это допускает расположение выводов.

Для автоматической установки ЭРЭ на ПП следует оставлять зазор между корпусами не менее 1,5 мм в одном из направлений. Зазор необходим и для улучшенной ремонтопригодности. Исходя из сказанного варианты компоновки ЭРЭ на ПП ([рис. 7.26](#)) не рекомендуются.

Расстояние между осями выводов соседних ЭРЭ или осями выводов и корпусами соседних ЭРЭ должно быть не менее 2,5 мм, минимальное расстояние между корпусами дискретных ЭРЭ – 1 мм, между корпусами дискретных ЭРЭ и микросхем – 2 мм ([рис. 7.27](#)).

Кроме того, отверстия (монтажные, переходные, крепежные) в плате нужно располагать таким образом, чтобы расстояние между краями отверстий было не меньше толщины платы, в противном случае перемычка между отверстиями будет обладать малой механической прочностью.

ЭРЭ с корпусами, ориентированными вдоль одного из направлений, нужно располагать с учетом определяющего размера (например, длинной стороной вдоль направления конвекционного потока воздуха) для улучшения теплоотдачи (см. [рис. 7.25, а](#)). Такая же ориентация ЭРЭ (см. [рис. 7.25, б](#)) должна быть и при компоновке с учетом направления механических воздействий.

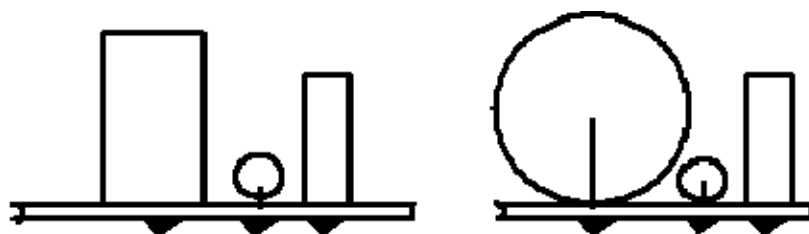


Рис. 7.26. Примеры неудачного расположения ЭРЭ на ПП

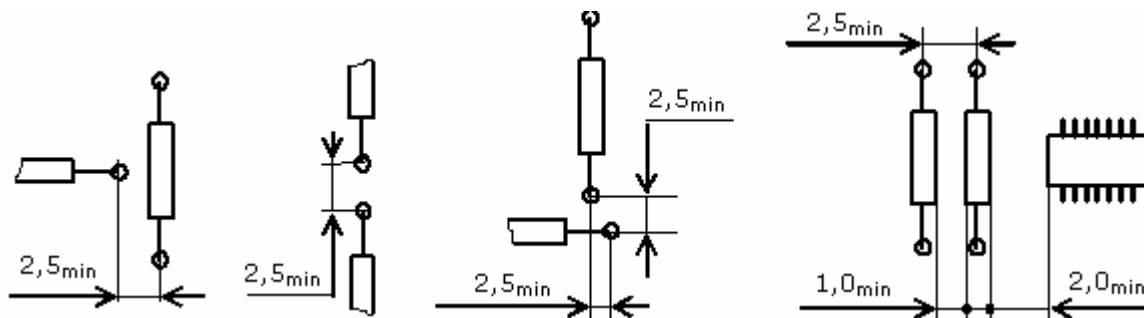


Рис. 7.27. Расположение ЭРЭ с учетом минимально допустимых расстояний

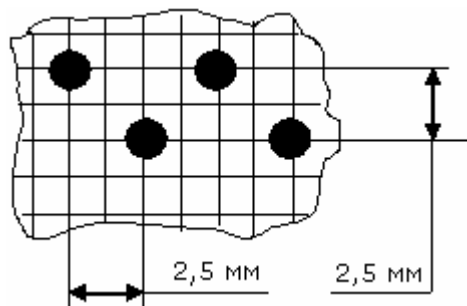


Рис. 7.28. Расположение контактных площадок для автоматизированного контроля

К элементам, устанавливаемым на плату, относят и перемычки. Они служат для соединения двух проводников одной цепи и применяются в случаях: упрощения топологического рисунка ПП, необходимости уменьшения количества проводящих слоев и для возможности отдельной настройки и регулировки отдельных ФУ. В последнем случае они устанавливаются после завершения указанных операций. Перемычки располагают параллельно сторонам платы, аналогично другим ЭРЭ ([см. рис. 7.25](#)), и их длина (до места сгиба) обязательно кратна шагу координатной сетки.

По конструктивному исполнению перемычки могут быть двух типов: выполненные из медной проволоки (покрытие – лужение или серебрение) без изоляции и с полимерной изоляцией. Использование перемычек без изоляции предпочтительнее, но их применение ограничивается односторонними печатными платами. Диаметр перемычек, как правило, 0,4–1,2 мм и определяется величиной протекающего тока. Количество типоразмеров – обычно не более трех.

При компоновке плат стандарта ЕВРОМЕХАНИКА следует ориентироваться на применение для внешнего соединения разъема СНП 59, который является аналогом применяемых для европлат разъемов стандарта DIN 41612.

Плоские и опрессованные кабели для внешнего подключения размещаются с одной стороны (стороны установки ЭРЭ) ПП, и шаг расположения отверстий под их распайку – 2,5 мм. Гибкие печатные кабели могут устанавливаться с двух сторон.

Контактные площадки, предназначенные для автоматического контроля, следует располагать в соответствии с [рис. 7.28](#) и выполнять диаметром не менее 2 мм.

При проектировании контактных площадок для внутрисхемного контроля плат с поверхностным монтажом необходимо придерживаться следующих правил:

- местами зондирования должны быть испытательные контактные площадки или межслойные переходы, а не компоненты или их выводы;



- испытательная контактная площадка должна быть покрыта припоем и иметь размеры  $1 \times 1$  мм (не менее);
- рекомендуемый шаг расположения испытательных контактных площадок должен составлять 2,5 мм, но не менее 1,25 мм;
- испытательное зондирование должно проводиться с одной стороны платы;
- расстояние от высокопрофильных компонентов (высотой более 5 мм) до испытательной контактной площадки должно быть не менее 5 мм;
- испытательные контактные площадки должны быть расположены равномерно по площади подложки (платы).

## 7.14. Трассировка печатных элементов

После размещения ЭРЭ приступают к трассировке, т. е. к прокладке необходимых линий соединений (проводников) между контактными площадками.

Трассировка обычно проходит в два этапа. На первом (как правило, с привлечением автоматизированных средств) осуществляют предварительное соединение выводов всех ЭРЭ (включая входные и выходные КП и КП для контроля качества ПП) в соответствии со связями, предусмотренными электрической принципиальной схемой.

На втором этапе проводится доработка и оптимизация полученного печатного рисунка. Коррекция первоначального варианта топологии необходима по нескольким причинам:

во-первых, применяемые автоматические трассировщики ПП не всегда могут полностью осуществлять прокладку всех цепей (особенно при коэффициенте заполнения по площади, большем 0,75);

во-вторых, ограничения, связанные с трудностью гибкого изменения для различных областей ПП применяемых стратегий трассировки, не позволяют сразу получить оптимальный вариант конструкции;

в-третьих, после анализа электромагнитной совместимости, как правило, требуется корректировка печатного рисунка.

Проводники располагаются на всей площади ПП, кроме зон, запрещенных для их прокладки. К таким зонам относятся:

- зоны направляющих элементов;
- зоны крепежных отверстий;
- зоны полигонов.

Размер зоны направляющих элементов обычно составляет 4–8 мм и зависит от вида и материала самих элементов направляющих, расположенных в блоке кассетной конструкции. Расположение проводников в этих зонах возможно в исключительных случаях и только при применении направляющих из диэлектрического материала (ЭРЭ, монтажные и крепежные отверстия в зонах направляющих элементов не располагаются).



В случае применения диэлектрических изолирующих шайб размер этих зон может быть уменьшен до минимально возможного (1 мм от края крепежного отверстия). При используемых напряжениях от 20 до 250 В зоны крепежных элементов должны выбираться с учетом обеспечения минимального промежутка размером 3 мм при отсутствии изоляционных покрытий.

*Полигоны* – это участки поверхности ПП (расположенные с одной или двух сторон платы), где по каким-либо соображениям запрещено прокладывать проводники. Обычно полигоны имеют сплошную металлизацию, однако при механических способах формирования печатного рисунка (гравирование) к полигонам относятся участки поверхности, где должна быть полностью снята фольга.

Кроме полигонов при настройке программ-трассировщиков выделяют *регионы* – участки поверхности ПП, где установлены определенные правила в расположении проводников, в отличие от других мест. К ним, например, могут быть отнесены ранее разработанные топологические рисунки отдельных каскадов и ФУ, внедряемые в разрабатываемую конструкцию ПП. При механическом способе формирования рисунка к полигонам относят участки платы, где должна быть полностью снята фольга.

Обычно придерживаются следующей очередности в прокладке цепей:

- цепи питания;
- земли;
- сигнальные цепи;
- остальные цепи.

При наличии входных высокочастотных цепей их прокладывают в первую очередь и делают максимально короткими.

Для уменьшения паразитных связей в ДПП шины питания и заземления необходимо располагать со стороны установки ЭРЭ, а сигнальные цепи – с обратной стороны ПП. Следует отметить, что заземляющие цепи должны быть разделены для цифровой части схемы, аналоговой части и устройств питания и их топологическое построение не должно быть последовательным ([рис. 7.29](#)).



Рис. 7.29. Пример расположения земляных проводников

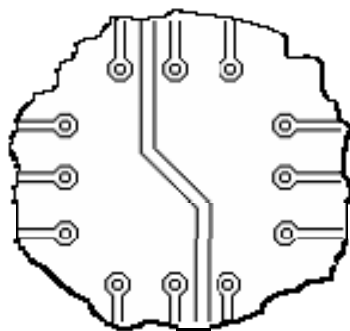


Рис. 7.30. Прокладка проводников перпендикулярно отверстиям

Печатные проводники на печатной плате располагают:

- равномерно по площади платы;
- во взаимно перпендикулярных направлениях в разных слоях ПП (параллельно линиям координатной сетки);
- параллельно направлению движения при пайке волной припоя. Угол между направлением движения и осью проводника не должен превышать  $30^\circ$ ;
- печатный проводник, проходящий между двумя КП, следует располагать так, чтобы его ось была перпендикулярна линии, соединяющей центры отверстий ([рис. 7.30](#));
- для рационального формирования токопроводящего рисунка целесообразно печатные проводники и контактные площадки выполнять без резких перегибов и острых углов, так как это затрудняет технологию изготовления (печать, травление, пайку), а также приводит к концентрации механических напряжений при нагревании (вследствие разницы ТКЛР фольги и основания) и отслаиванию проводников;
- если длина проводника более 70 мм, то целесообразно предусмотреть дополнительные КП (или металлизированные отверстия) для более надежного сцепления печатных проводников с основанием.

Допускается прокладка проводников под углом  $45^\circ$  для уменьшения длины проводника и снижения напряжений в углах при перегибе проводников.

Запрещается прокладка проводников под корпусами навесных элементов, когда между ними существует разность потенциалов. В противном случае увеличивается возможность коррозионного разрушения печатного проводника.

Переход проводника с одной стороны на другую должен осуществляться только через отверстия. Переходы через край недопустимы. Исключение составляют:

- платы ВЧ- и СВЧ-диапазонов, в которых соединяются между собой заземляющие слои, расположенные на разных сторонах платы;

- платы, предназначенные для автоматической установки элементов, в которых слой металлизации по всему периметру располагается с целью предохранения изоляционного основания от механических повреждений.

Печатные проводники, как правило, выполняются одинаковой ширины на всем их протяжении. До минимально допустимых значений проводники могут быть сужены на небольшой длине в узких местах и в местах перекрестий проводников различных слоев. Ширина печатных проводников, с учетом протекающих токов, может быть различной, однако количество их типов-размеров стараются делать минимальным.

Рекомендуется не размещать проводники на минимально допустимом расстоянии от других печатных элементов. Расстояние от проводника до края платы (края выреза) должно быть не менее толщины платы с учетом допуска на габаритные размеры и позиционного допуска расположения печатного элемента, но не менее 1 мм.

В широких проводниках и экранах (шире 5 мм) необходимо делать перфорацию (рис. 7.31) во избежание вспучивания фольги из-за газовыделения при пайке (для плат ВЧ- и СВЧ-диапазонов вырезы допускается не делать).

Форма выреза может быть любой: овал (рис. 7.31, а, б), круг (рис. 7.31, в), прямоугольник (рис. 7.31, г) или сетка. Размеры выреза определяются следующим образом: чтобы вырез не был излучающим элементом, его наибольший размер не должен составлять более  $1/8$  длины волны; при максимальном размере (не более  $1/20$ ) экранирующий эффект уменьшается незначительно; для качественного экранирования максимальный размер не должен превышать  $1/50$ . С другой стороны, минимальный размер выреза в экране определяется выбранным классом точности. Площадь вырезов обычно составляет 30–50 % от площади экрана.

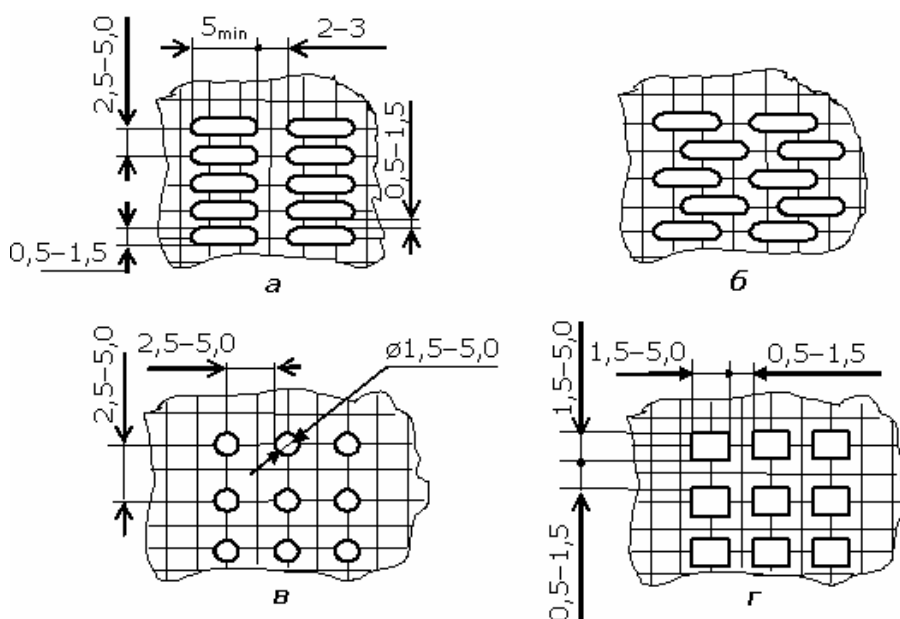


Рис. 7.31. Форма вырезов в экране: а, б – овал; в – круг; г – квадрат

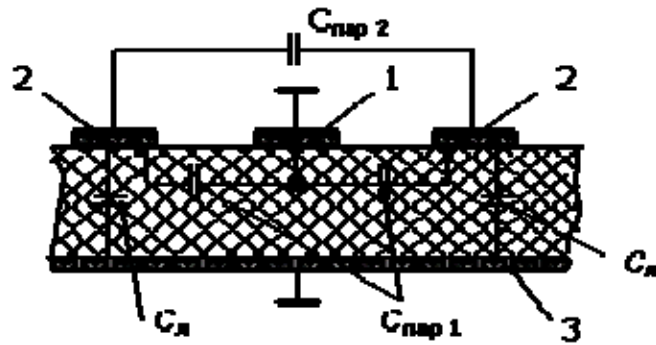


Рис. 7.32. Экранирование печатных проводников (2) шиной с нулевым потенциалом (1), экранирующей поверхностью (3):  $C_{\text{л}}$  – емкость линии;  $C_{\text{пар 1}}$  – емкость между экранирующей и основным проводником;  $C_{\text{пар 2}}$  – емкость между основными проводниками

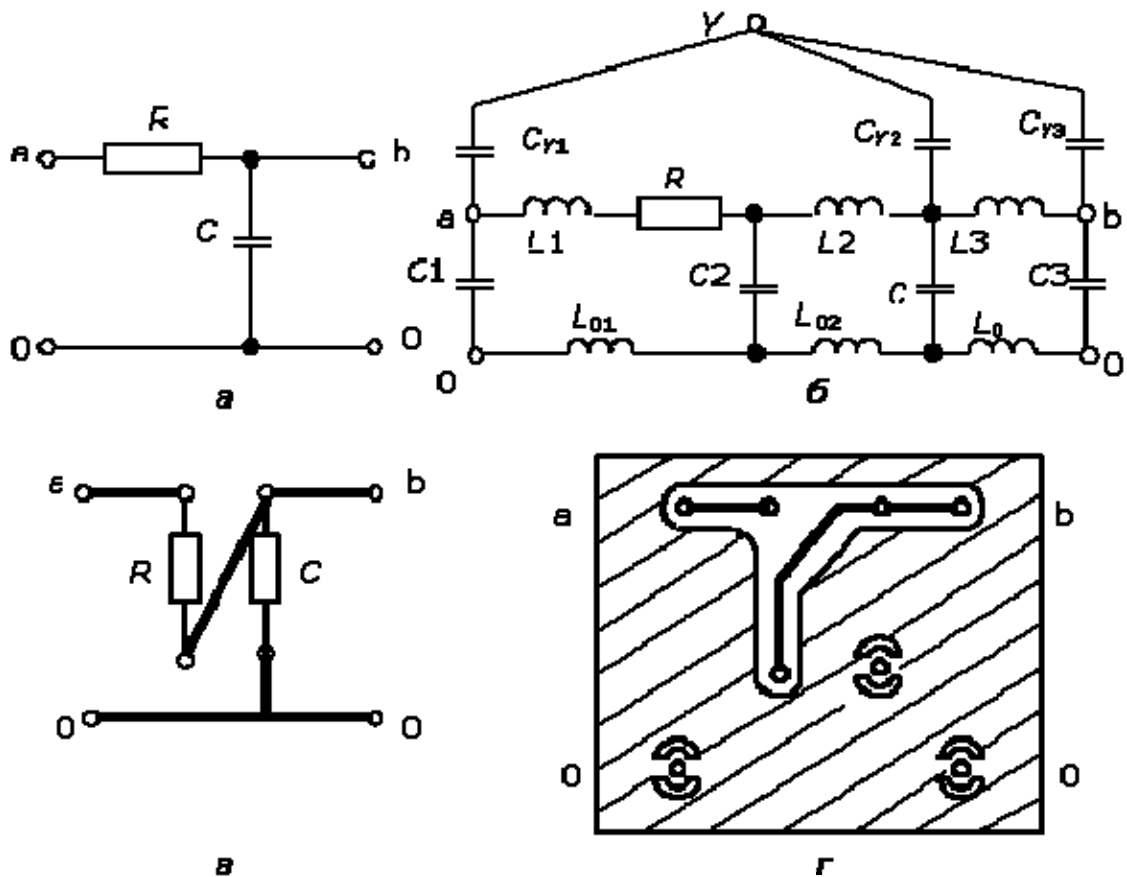


Рис. 7.33. Примеры нейтрализации паразитных элементов печатного монтажа: *а* – схема электрическая; *б* – эквивалентная схема; *в* – «разомкнутая» топология; *г* – «замкнутая» топология

Прокладка рядом с входными выходных проводников одного каскада не рекомендуется во избежание возникновения паразитных связей. Проводники входных и выходных цепей, связанные в систему для подсоединения к краевому разъему, целесообразно разделить экранирующими проводниками или шинами с нулевым потенциалом ([рис. 7.32](#)); введение экранирующей

плоскости увеличивает емкость линии, а введение плоскости с нулевым потенциалом уменьшает. В любом случае коэффициент связи между проводниками уменьшается.

Качество экранирования тем выше, чем ближе экран расположен к проводнику, чем он шире и чем уже проводник.

В общем случае топологию рисунка необходимо строить таким образом, чтобы снижать паразитные электрические параметры (паразитную емкость между рядом лежащими проводниками или проводником и экранным слоем, их взаимную индуктивность, индуктивность сигнальных проводников и т. д.). Это достигается максимально возможным уменьшением размеров приемных и передающих элементов печатного рисунка (проводников и контактных площадок), соблюдением заданных (расчетных) расстояний между этими элементами и встраиванием между этими цепями малочувствительных и нейтральных цепей ([рис. 7.32](#)).

На [рис. 7.33](#) показано, как разработчик ПП может влиять на паразитные параметры схемы, внося определенные изменения в топологический рисунок ПП.

Для грамотного проведения анализа паразитных связей, возникающих при конструктивной реализации изделия, схемы электрические принципиальные ([рис. 7.33, а](#)) необходимо преобразовывать в эквивалентные.

На эквивалентной схеме [рис. 7.33, б](#) показаны паразитные емкости и индуктивности:  $C_{y1}$ ,  $C_{y2}$ ,  $C_{y3}$  – распределенные емкости по отношению к соседнему источнику сигнала  $Y$ ;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  – распределенные емкости относительно заземления;  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  и  $L_{01}$ ,  $L_{02}$ ,  $L_{03}$  – распределенные индуктивности сигнальной и заземляющей шин соответственно. Если рисунок платы является «разомкнутым» ([рис. 7.33, в](#)), то преобладают паразитные параметры  $C_{y1}$ ,  $C_{y2}$ ,  $C_{y3}$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_{01}$ ,  $L_{02}$ ,  $L_{03}$ . В «замкнутом» и менее чувствительном варианте ([рис. 7.33, г](#)) емкости  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  являются преобладающими, в то время как  $C_{y1}$ ,  $C_{y2}$ ,  $C_{y3}$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_{01}$ ,  $L_{02}$ ,  $L_{03}$  существенно малы.

Как правило, введение экранов применяется для ПП высокочастотных, высокочувствительных и измерительных устройств, так как расположение на плате участков с большой металлизацией поверхности обладает рядом недостатков, а именно: увеличенный расход меди (при гальваническом наращивании) и защитных металлических покрытий; усложнение топологии трафаретов; затрудненность в применении групповых методов пайки; несколько увеличенный вес ПП; кроме этого возможно увеличение паразитных наводок при использовании экрана в качестве «возвратного» земляного проводника.

Таким образом, экраны должны применяться только тогда, когда другими способами (рациональной компоновкой ЭРЭ, оптимизацией топологического рисунка проводников и т. п.) нельзя удовлетворить требования по электромагнитной совместимости.

## Контрольные вопросы

1. Как устанавливаются ЭРЭ при монтаже на ПП?
2. Как следует размещать функциональные узлы на ПП?
3. Что необходимо учитывать при размещении ЭРЭ на ПП?
4. Перечислите, какие существуют варианты установок на ПП?
5. По каким правилам располагаются центры отверстий под выводы?
6. Каких правил необходимо придерживаться при проектировании контактных площадок для внутрисхемного контроля плат с поверхностным монтажом?
7. Какие зоны относятся к запрещенным для прокладки проводников, располагающихся на всей площади ПП?
8. Как необходимо располагать печатные проводники на печатной плате?
9. В каких случаях запрещается прокладка проводников под корпусами навесных элементов и что при этом может произойти?
10. Как происходит экранирование печатных проводников?

## 8. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

[8.1. Области применения и основные характеристики волоконно-оптических линий связи.](#)

[8.2. Компоненты волоконно-оптических систем передачи.](#)

[8.3. Оптические кабели.](#)

[8.4. Оптические волокна.](#)

[Контрольные вопросы.](#)

Л и т е р а т у р а: [4, 27, 31, 52, 53].

### 8.1. Области применения и основные характеристики волоконно-оптических линий связи

Волоконно-оптические линии связи – это вид связи, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, известным под названием «оптическое волокно».

Обобщенная структурная схема волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) показана на [рис. 8.1](#). Сообщение в цифровой форме поступает от источника на преобразователь, где формируется первичный электрический сигнал в цифровой форме. В кодере осуществляется избыточное кодирование, необходимое для обеспечения требуемой помехоустойчивости. Далее электрическим сигналом осуществляется модуляция оптического излучения, генерируемого источником (лазером или светоизлучающим диодом).

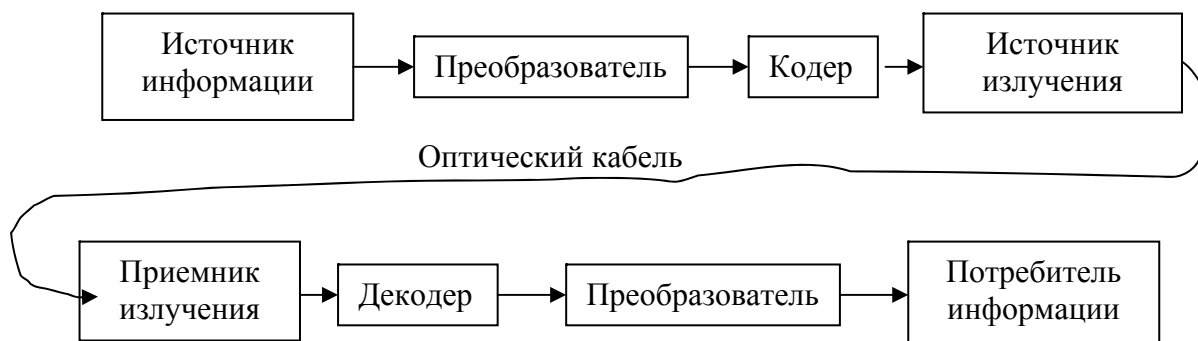


Рис. 8.1. Обобщенная структурная схема ВОЛС

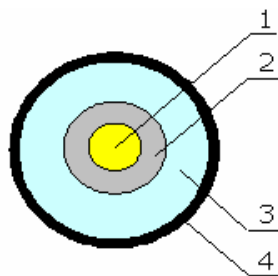


Рис. 8.2. Структура оптического волокна: 1 – сердцевина; 2 – оболочка; 3 – внутренний слой защитного покрытия; 4 – наружный слой защитного покрытия

Передача сигнала осуществляется по оптическому кабелю (ОК), основой которого является оптическое волокно (ОВ) ([рис. 8.2](#)). С помощью демодулятора оптический сигнал преобразуется в электрический. В декодере осуществляется восстановление первичного (модулирующего) сигнала, который с помощью преобразователя приобретает необходимую для информации форму (текст, звук, изображение и т. д.).

*Основными преимуществами* применяемых волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) являются:

- электромагнитная совместимость;
- высокая защищенность от несанкционированного доступа;
- гальваническая развязка элементов сети;
- высокая помехозащищенность;
- широкая полоса пропускания;
- малый вес и габаритные размеры;
- взрыво- и пожаробезопасность;
- длительный срок эксплуатации.

**Электромагнитная совместимость.** Проблема борьбы с электромагнитными помехами самой различной природы, включая взаимные помехи многочисленных средств связи, является в современных условиях едва ли не самой острой. Обычные системы связи предусматривают весьма сложные и дорогие средства защиты от помех, создаваемых транспортом с электрической тягой, энергетическими, технологическими и другими электроустановками. Использование ВОЛС радикально решает проблему электромагнитной совместимости. Поскольку волокно изготовлено из диэлектрического материала, оно невосприимчиво к электромагнитным помехам со стороны окружающих медных кабельных систем и электрического оборудования, способного индуцировать электромагнитное излучение (линии электропередачи, электродвигательные установки и т. д.). В многоволоконных кабелях исключено перекрестное влияние электромагнитного излучения, присущее многопарным медным кабелям.

**Защищенность от несанкционированного доступа (скрытность связи).** Поскольку волоконно-оптический кабель (ВОК) практически не излу-



чаает в радиодиапазоне, то передаваемую по нему информацию трудно «подслушать», не нарушая приема-передачи. Системы мониторинга (непрерывного контроля) целостности оптической линии связи, используя свойства высокой чувствительности волокна, могут мгновенно отключить «взламываемый» канал связи и подать сигнал тревоги. Сенсорные системы, использующие интерференционные эффекты распространяемых световых сигналов (как по разным волокнам, так и разной поляризации), имеют очень высокую чувствительность к механическим колебаниям, к небольшим перепадам давления. Такие системы особенно необходимы при создании линий связи в правительственных, банковских и некоторых других специальных службах, предъявляющих повышенные требования к защите данных.

**Гальваническая развязка элементов сети.** Данное преимущество оптического волокна заключается в его изолирующем свойстве. Волокно помогает избежать электрических «земельных» петель, которые могут возникать, когда два сетевых устройства неизолированной вычислительной сети, связанные медным кабелем, имеют заземления в разных точках здания, например на разных этажах. При этом может возникнуть большая разность потенциалов, которая способна повредить сетевое оборудование. Для волокна этой проблемы просто нет.

**Высокая помехозащищенность.** Поскольку волокно изготовлено из диэлектрического материала, оно невосприимчиво к электромагнитным помехам со стороны окружающих медных кабельных систем и электрического оборудования, способного индуцировать электромагнитное излучение (линии электропередачи, электродвигательные установки и т. д.).

**Широкая полоса пропускания** обусловлена чрезвычайно высокой частотой несущей 10<sup>14</sup> ГГц. Это дает потенциальную возможность передачи по одному оптическому волокну потока информации в несколько терабит в секунду. Большая полоса пропускания – это одно из наиболее важных преимуществ оптического волокна перед традиционными медными проводниками.

**Малые габаритные размеры и масса оптических кабелей.** Волоконно-оптические кабели (ВОК) имеют меньший вес и объем по сравнению с медными кабелями в расчете на одну и ту же пропускную способность (например, 900-парный телефонный кабель диаметром 7,5 см может быть заменен одним волокном диаметром 0,1 см).

Использование ВОК:

- неизмеримо упрощает прокладку магистральных и зонавых линий связи;
- исключает привлечение тяжелой машинной техники, необходимой для земляных и строительных работ при подготовке трасс, для транспортировки и укладки тяжелых кабелей;

- дает возможность оперативного развертывания кабельных линий с большой пропускной способностью, в том числе в труднодоступной местности, с преодолением водных и иных преград.

**Взрыво- и пожаробезопасность.** Отсутствие явлений искрения при обрывах, коротких замыканиях, ненадежных контактах позволяет обеспечить полную безопасность использования ВОЛС во взрывоопасных и пожароопасных помещениях. Кроме того, при работе персонала с действующим кабелем исключена опасность поражения электрическими разрядами. Можно добавить, что и для оконечной аппаратуры не возникает аварийных режимов, которые нередко наблюдаются при коротких замыканиях и обрывах в обычной аппаратуре электросвязи.

**Длительный срок эксплуатации.** Со временем волокно испытывает деградацию. Это означает, что затухание в проложенном кабеле постепенно возрастает. Однако, благодаря совершенству современных технологий производства оптических волокон, этот процесс значительно замедлен, и срок службы ВОК составляет примерно 25 лет. За это время может смениться несколько поколений стандартов приемопередающих систем.

**Стоимость интерфейсного оборудования.** Электрические сигналы должны преобразовываться в оптические и наоборот. Цена на оптические преобразователи пока остается довольно высокой.

**Монтаж и обслуживание оптических линий.** Стоимость работ по монтажу, тестированию и поддержке волоконно-оптических линий связи также остается высокой.

При повреждении ВОК необходимо осуществлять сварку волокон в месте разрыва и защищать этот участок кабеля от воздействия внешней среды.

**Требование специальной защиты волокна.** Стекло как материал выдерживает колоссальные нагрузки с пределом прочности на разрыв выше 1 ГПа. Это, казалось бы, означает, что волокно (в единичном количестве) диаметром 125 мкм выдержит вес гири в 1 кг. Однако на практике это не достигается. Причина в том, что оптическое волокно, каким бы совершенным оно ни было, имеет микротрещины, которые инициируют разрыв. Для повышения надежности оптическое волокно при изготовлении покрывается специальным лаком на основе эпоксикарилата, а сам оптический кабель упрочняется, например нитями на основе кевлара. Если требуется удовлетворить еще более жесткие условия на разрыв, кабель можно упрочнить специальным стальным тросом или стеклопластиковыми стержнями. Но все это влечет увеличение стоимости оптического кабеля.

Несмотря на многочисленные преимущества перед другими способами передачи информации, волоконно-оптические системы имеют и *недостатки*, а именно высокую стоимость прецизионного монтажного оборудования и относительную надежность лазерных источников излучения.

## 8.2. Компоненты волоконно-оптических систем передачи

На [рис. 8.3](#) представлена обобщенная классификация компонентов ВОЛС. Передающие оптоэлектронные модули, выполненные в едином конструктивном блоке, включают в себя источник излучения, электронные схемы для стабилизации режимов работы, оптический соединитель или отрезок оптического кабеля.



Рис. 8.3. Обобщенная классификация компонентов ВОЛС

Приемные оптоэлектронные модули содержат фотоприемное устройство, электронные схемы обработки электрического сигнала и стабилизации режимов работы, а также оптический соединитель или отрезок оптического кабеля.

## 8.3. Оптические кабели

Оптическое волокно в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. Основания так считать вытекают из ряда особенностей, присущих оптическим волноводам.

### 8.3.1. Классификация оптических кабелей

По назначению оптические кабели (ОК) в отличие от электрических кабелей достаточно классифицировать на две основные группы:

- *линейные* – для прокладки вне зданий (для наружной прокладки и эксплуатации);

- *внутриобъектовые* – для прокладки внутри зданий (для внутренней прокладки и эксплуатации).

Линейные ОК подразделяются на *магистральные, зонавые, городские и сельские*, т. е. по принципу их принадлежности к магистральной, зонавым или местным сетям связи. Однако современные одномодовые оптические волокна (ОВ), выполняющие в ОК роль среды передачи, имеют малое затухание, слабую частотную зависимость и не являются ограничивающим фактором применения линейных ОК на сетях связи (магистральной, зонавых или местных).

Классификация оптических кабелей по назначению, условиям и вариантам применения представлена на [рис. 8.4](#). Предложенная классификация ОК определяется техническими требованиями к ОК с учетом их назначения, условий и вариантов применения на Взаимоувязанной сети связи (ВСС) России.



Рис. 8.4. Классификация оптических кабелей

Определяющим фактором применения линейных ОК на сетях связи являются условия их прокладки и эксплуатации. Оптические кабели позволяют создавать сети во всех средах: на суше, в воде и воздухе. С учетом этого линейные ОК можно классифицировать на три группы:

- подземные;
- подвесные;
- подводные.

Внутриобъектовые ОК по условиям применения можно классифицировать на две группы:

- распределительные;
- станционные (монтажные).

Условия прокладки и эксплуатации ОК в одной и той же среде далеко не одинаковы, поэтому целесообразно классифицировать ОК и по вариантам их применения.

### **8.3.2. Основные конструктивные элементы оптических кабелей**

В оптических кабелях, представляющих собой сложную оптико-физическую систему, в качестве направляющей среды передачи применяется кварцевое оптическое волокно (ОВ). Специфичность оптического волокна заключается не только в особенностях распространения по нему информационных сигналов, но и в конструкции самого ОВ, критичности ОВ к механическим нагрузкам (усилиям растяжения и сжатия, изгибам, кручению и ударам), чувствительности ОВ к таким факторам, как перепады температур, химическое воздействие, влияние влаги и водорода. Параметры эластичности и механизмы отказа у оптического волокна и медных жил электрических кабелей различны.

Основные воздействующие факторы, которым должны противостоять оптические кабели различного назначения и для различных условий прокладки, приведены в [табл. 8.1](#). По существу, эти воздействующие факторы и определяют особенности конструкций ОК различного назначения и использование в них конструктивных элементов, обеспечивающих прокладку и эксплуатацию ОК в заданных интервалах воздействия внешних факторов.

*Основные конструктивные элементы ОК:*

- оптическое волокно;
- оптические модули;
- оптические сердечники;
- силовые элементы;
- гидрофобные материалы;
- броня;
- оболочка.

Таблица 8.1

## Основные факторы, воздействующие на ОК

| Условия эксплуатации             | Факторы                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                        |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|                                  | механические                                                                                                                                                                                                                                                                                     | климатические                                                                                                                                                                                                       | электромагнитные                                                                       |
| Подземные                        | Растягивающие и раздавливающие нагрузки:<br>средние – в легких грунтах, тоннелях, коллекторах;<br>значительные – в остальных грунтах;<br>очень значительные – в вечномёрзлых грунтах;<br>меньше средних – в кабельной канализации.<br>Изгибы, кручения, удары, вибрация.<br>Воздействие грызунов | Циклическая смена температур в диапазоне рабочих температур.<br>Повышенная относительная влажность.<br>Повышенное атмосферное давление.<br>Плесневые грибы.<br>Влага и вода.<br>Химическое воздействие              | Импульсный ток молнии.<br>Индуктированное напряжение от источников высокого напряжения |
| Подвесные                        | Растягивающие и раздавливающие нагрузки:<br>средние – при подвеске на опорах высоковольтных и низковольтных ЛЭП, железных дорог;<br>значительные – при подвеске на опорах высоковольтных ЛЭП.<br>Вибрация.<br>Пляска проводов.<br>Ветер                                                          | Циклическая смена температур в более значительном диапазоне рабочих температур.<br>Атмосферные осадки (дождь, снег, иней).<br>Воздействие прямого солнечного излучения.<br>Соляной туман.<br>Химическое воздействие | Импульсный ток молнии.<br>Термическое воздействие тока                                 |
| Подводные                        | Растягивающие и раздавливающие нагрузки – очень значительные.<br>Высокое избыточное гидростатическое давление                                                                                                                                                                                    | Прямое длительное воздействие воды.<br>Циклическая смена температур в диапазоне рабочих температур (меньше, чем для подземных)                                                                                      | –                                                                                      |
| Распределительные и стационарные | Растягивающие и раздавливающие нагрузки:<br>близкие к средним – для распределительных;<br>очень незначительные – для стационарных.<br>Изгибы и удары                                                                                                                                             | Прямое воздействие огня при пожарах.<br>Циклическая смена температур в диапазоне рабочих температур (меньше, чем для подземных)                                                                                     | –                                                                                      |

Отдельные элементы могут отсутствовать, в зависимости от назначения и условий применения ОК.

*Оптическое волокно – основной конструктивный элемент ОК, выполняющий роль направляющей среды передачи излучения.*

*Оптический модуль (ОМ) – самостоятельный конструктивный элемент оптического кабеля, содержащий одно и более ОВ. Оптический модуль выполняет функции защитного элемента, уменьшает опасность обрыва ОВ и*

обеспечивает стабильность его работы при воздействии продольных и поперечных сил.

Оптические модули могут быть следующих типов:

- трубчатые;
- профилированные;
- ленточные.

В трубчатом ОМ оптические волокна могут свободно укладываться либо без скрутки ([рис. 8.5, а](#)), либо путем скрутки вокруг центрального силового элемента ([рис. 8.5, б](#)) либо размещаться в плотном буферном покрытии ([рис. 8.5, в](#)). Плотный буферный слой увеличивает сопротивляемость ОВ к сжатию и изгибам.

В профилированном ОМ в спиралеобразных пазах *V*-образного типа, образуемых в полимерном стержне, ОВ (одно или несколько) свободно укладывается по спирали. Силовой элемент в центре профилированного стержня обеспечивает необходимые механические параметры и стойкость к температурным изменениям ([рис. 8.5, г](#)).

В ленточном ОМ оптические волокна (два и более) размещаются в линейный ряд, образуя линейный элемент. Фиксация ОВ в линейном элементе может осуществляться с помощью полимерного материала по длине элемента, выполняющего функцию вторичного защитного покрытия ([рис. 8.6, а](#)), или адгезивного слоя и наложенных поверх синтетических лент ([рис. 8.56, б](#)).

Из оптических модулей ленточного типа может создаваться матрица (единичный блок) с определенным числом ОВ, которая затем размещается либо в полимерной трубке, либо в пазах спиралеобразного профилированного элемента (стержня).

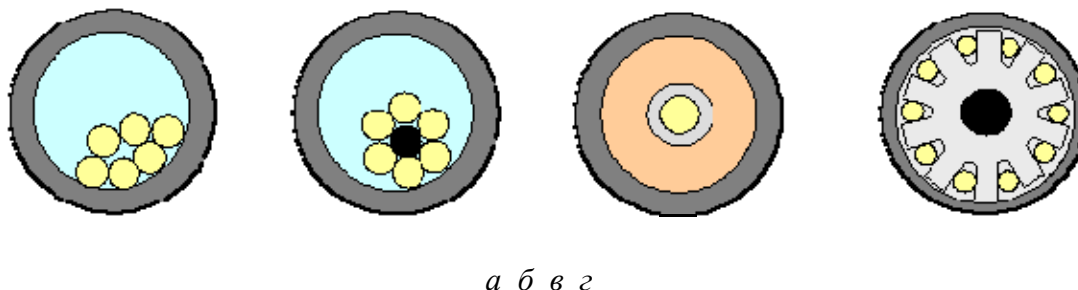


Рис. 8.5. Примеры конструкций оптических модулей: *а–в* – трубчатых; *г* – профилированного: 1 – трубка; 2 – воздух или гидрофобный компаунд; 3 – ОВ в защитном покрытии; 4 – ЦСЭ; 5 – лента; 6 – стержень профилированного типа со спиралеобразными *V*-образными пазами; 7 – плотный буферный слой

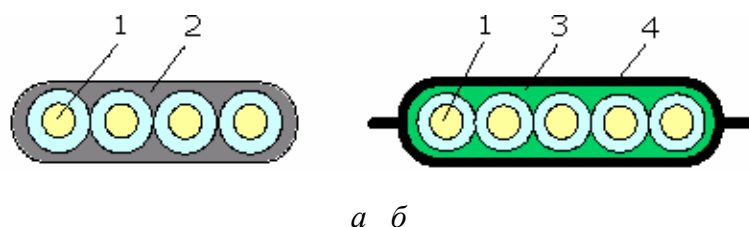


Рис. 8.6. Примеры конструкций ленточного оптического модуля: *а* – с полимерным защитным материалом; *б* – с дополнительным защитным покрытием из адгезивного слоя и синтетических лент: 1 – ОВ в защитном покрытии; 2 – полимерный материал; 3 – адгезивный слой; 4 – синтетическая лента

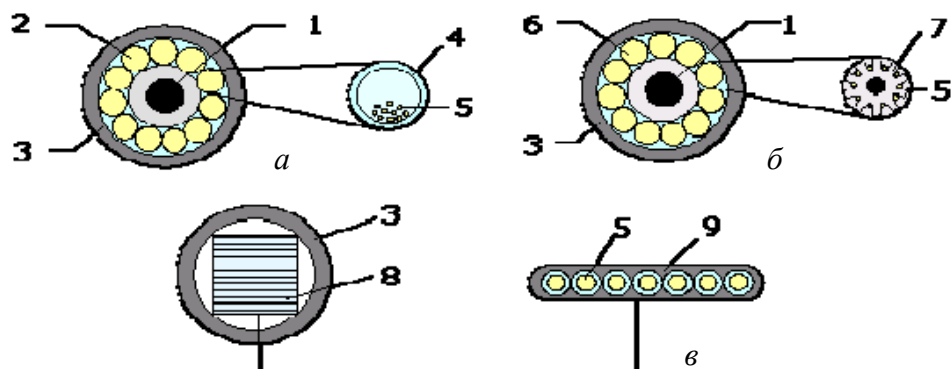


Рис. 8.7. Примеры конструкций оптических сердечников подземных и подвесных ОК из ОМ различного типа: *а* – трубчатого; *б* – профилированного; *в* – ленточного; 1 – центральный силовой элемент; 2 – оптический модуль трубчатого типа; 3 – защитное покрытие (трубка, скрепляющие полимерные ленты и т. п.); 4 – полимерная трубка; 5 – оптические волокна в защитном покрытии; 6 – оптический модуль профилированного типа; 7 – стержень профилированного типа; 8 – единичный блок (матрица) из ленточных ОМ; 9 – ленточный оптический модуль

Оптический сердечник ОК формируется либо из одного ОМ, расположенного, как правило, в центре, либо из нескольких ОМ или пучков ОМ, скрученных вокруг центрального силового элемента. В первом случае оптический сердечник следует рассматривать как одномодульную конструкцию, во втором – как многомодульную.

Оптический сердечник повышает механическую прочность ОК, защищает ОВ от изгибов и нагрузок на растяжение и сдвливание в пределах, не оказывающих влияние на передаточные параметры. Центральный силовой элемент выполняет основную функциональную нагрузку.

Оптические сердечники могут содержать дополнительные элементы: элементы заполнения, не содержащие ОВ (кордели), медные жилы, пары или четверки из медных жил. Обычно повив оптического сердечника из элементов скрепляется нитями или скрепляющей лентой. Конструкция оптического сердечника (емкость, тип ОМ и его место в сердечнике, медные жилы, пары и четверки из медных жил, элементы заполнения) определяется функциональным назначением и условиями применения ОК.



Примеры конструкций оптических сердечников ОК, образованных из ОМ различного типа, для подвески или прокладки в грунте и внутри зданий приведены на [рис. 8.7](#).

Силовые элементы обеспечивают требуемую механическую прочность ОК и величину деформации ОВ в заданных пределах. При выборе материалов для силовых элементов учитывают следующие факторы: модуль Юнга, соотношение механической прочности и массы, стабильность параметров во времени и в пределах заданных изменений температур, стойкость к коррозии, возможность прокладки и монтажа, а также условия работы ОК.

В качестве материалов для силовых элементов могут применяться стальная, медная и алюминиевая проволоки, а также арамидные нити и стеклопластиковые стержни, параметры которых приведены в табл. 8.2, где значение  $n$  коэффициента применимости материала для силового элемента соответствует лучшим свойствам материала.

Силовые элементы, размещенные в центре ОК, обеспечивают бóльшую гибкость, а на периферии – бóльшую стойкость ОК к ударам и растягивающим нагрузкам.

Гидрофобные материалы препятствуют проникновению влаги в ОК, увеличивая срок службы ОВ. Свободное пространство в модулях, пазах, а также между оптическими модулями и силовыми элементами заполняется гидрофобным компаундом.

Оболочки ОК защищают оптические сердечники ОК от внешних воздействий и механических повреждений. Тип оболочки выбирают с учетом механической стойкости (к изгибам, кручению, поперечному сжатию, продольному растяжению и др.), стойкости к воздействию окружающей среды (климатическим и химическим воздействиям, нераспространению горения, выделению водорода и др.), физических характеристик материала (диаметр, масса и др.), а также удобства монтажа.

Сравнительные параметры ряда материалов, из которых могут изготавливаться оболочки ОК, приведены в [табл. 8.3](#).

Таблица 8.2

**Параметры материалов для силовых элементов**

| Параметры                                                                                        | Проволока |        |             | Арамидные нити | Стеклопластиковые стержни |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|-------------|----------------|---------------------------|
|                                                                                                  | стальная  | медная | алюминиевая |                |                           |
| Модуль Юнга $E$ , кг/мм <sup>2</sup>                                                             | 20000     | 12000  | 7000        | 13000          | 5000                      |
| Удельная плотность $\rho$ , г/см <sup>2</sup>                                                    | 7,8       | 8,9    | 2,7         | 1,4            | 2,0                       |
| Коэффициент применимости $n$<br>= $aE\rho$ при допустимой величине деформации ОВ ( $a = 0,002$ ) | 35        | 15     | 11          | 25             | 8,0                       |

Таблица 8.3

### Параметры материалов для оболочек ОК

| Параметр                               | ПЭ низкой плотности | ПЭ высокой плотности | Алюмо-полиэтилен | ПВХ | Полиуретан | Полиамид | Свинец |
|----------------------------------------|---------------------|----------------------|------------------|-----|------------|----------|--------|
| Механические характеристики            |                     |                      |                  |     |            |          |        |
| Растяжение                             | с                   | с                    | х                | с   | с          | х        | х      |
| Изгиб                                  | х                   | х                    | х                | х   | х          | х        | с      |
| Кручение                               | х                   | х                    | х                | х   | х          | х        | х      |
| Радиальное сжатие                      | с                   | с                    | х                | с   | с          | х        | х      |
| Трение                                 | с                   | х                    | с/х              | с   | х          | х        | с      |
| Климатические характеристики           |                     |                      |                  |     |            |          |        |
| Стойкость к климатическим воздействиям | х                   | х                    | х                | х   | х          | х        | х      |
| Защита от проникновения влаги          | п                   | п                    | х                | п   | п          | п        | х      |
| Стойкость к химическому воздействию    | х                   | х                    | х                | с   | х          | х        | х      |
| Стойкость к воздействию углерода       | п                   | х                    | с/х              | с   | с          | х        | х      |
| Физические характеристики              |                     |                      |                  |     |            |          |        |
| Теплостойкость                         | с                   | с                    | х                | с   | с          | с        | х      |
| Малая масса                            | х                   | х                    | х                | х   | х          | х        | п      |
| Нераспространение горения              | п                   | п                    | п                | х   | п          | п        | х      |

П р и м е ч а н и е. ПЭ – полиэтилен; х – хорошее; с – среднее; п – плохое; с/х – среднее/хорошее, в зависимости от наружной оболочки.

### 8.3.3. Технические требования к оптическим кабелям

В зависимости от условий применения на Взаимоувязанной сети связи России оптические кабели могут содержать основные конструктивные элементы, приведенные на [рис. 8.8](#).

Оптические кабели должны быть рассчитаны на возможность передачи всех видов информации на базе современных и перспективных оптических технологий передачи. Как правило, линейные ОК не должны иметь внутри оптического сердечника металлических элементов, чтобы не возникали дополнительные затраты на защиту от внешних электромагнитных воздействий.

Чтобы не удорожать и не усложнять техническую эксплуатацию конструкции, ОК должны исключать необходимость их содержания под избыточным воздушным давлением. Оболочка ОК должна в течение всего срока службы сохранять герметичность, влагонепроницаемость, электрическую

прочность, стойкость к воздействию соляного тумана, солнечного излучения, стойкость к избыточному гидростатическому давлению, к низким и высоким температурам, обеспечивать нераспространение горения и иметь требуемые механические свойства на растяжение, сдавливание, удары и изгибы.

Броня, применяемая в ОК, должна обладать механическими свойствами, адекватными условиям прокладки и эксплуатации ОК, и сохранять эти свойства в течение всего срока службы ОК, обеспечивать защиту от грызунов.



Рис. 8.8. Основные конструктивные элементы оптического кабеля

Таблица 8.4

**Коэффициент затухания оптических волокон в оптическом кабеле**

| Параметр                                                           | Многомодовые<br>(градиентные)<br>ОВ | Одномодовые ОВ          |           |           |                         |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------|-----------|-------------------------|
|                                                                    | Рекомендации МСЭ-Т                  |                         |           |           |                         |
|                                                                    | G.651                               | G.652                   | G.653     | G.654     | G.655                   |
| Рабочий диапазон<br>длин волн, нм                                  | 1300                                | 1260–1360;<br>1530–1565 | 1530–1565 | 1530–1565 | 1530–1565;<br>1550–1625 |
| Коэффициент затухания, дБ, не более,<br>на опорной длине<br>волны: |                                     |                         |           |           |                         |
| 1300 нм                                                            | 0,7                                 | –                       | –         | –         | –                       |
| 1310 нм                                                            | –                                   | 0,35                    | –         | –         | –                       |
| 1550 нм                                                            | –                                   | 0,22                    | 0,22      | 0,20      | 0,22                    |
| 1625 нм                                                            | –                                   | –                       | –         | –         | 0,25                    |

Таблица 8.5

**Электрические параметры оптических кабелей**

| Параметр                                                                                                                               | Значение     | Объект нормирования                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------|
| Электрическое сопротивление песто-янному току при 20 °С, Ом/км, не более                                                               | 160          | Жила ДП                                                      |
| Электрическое сопротивление изоляции по-стоянному току, МОм · км, не менее                                                             | 10000        | Между жилами ДП. Между жилами ДП и металлическими элементами |
| Испытательное напряжение в течение 2 мин, кВ:<br>переменным током<br>постоянным током                                                  | 2,5<br>5,0   | Между жилами ДП                                              |
| Электрическое сопротивление наружной (полиэтиленовой) оболочки постоянному току, МОм · км, не менее                                    | 2000         | Между металлическими элементами и землей (водой)             |
| Испытательное напряжение наружной (поли-этиленовой) оболочки в течение 5 с, кВ:<br>переменным током частотой 50 Гц<br>постоянным током | 10,0<br>20,0 | Между соединенными вместе ме-таллическими элементами и водой |

Оптические кабели должны иметь сертификат соответствия Минсвязи России. Требования к коэффициенту затухания приведены в [табл. 8.4](#). Эти требования являются более жесткими и обусловлены необходимостью создания больших длин регенерационных участков для высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), стремлением уменьшить затраты как на строительство, эксплуатацию, так и в дальнейшем на реконструкцию линий.

Электрические параметры ОК, представленные в [табл. 8.5](#), относятся к ОК с металлическими элементами внутри сердечника (жилы ДП, металлический центральный силовой элемент) и в наружных покровах (стальные проволоки, стальные ленты и т. п.).

Оптические кабели вне зависимости от условий применения должны выдерживать циклическую смену температур – от низкой до высокой рабочей температуры.

Подвесные ОК должны быть стойкими к воздействию атмосферных осадков, соляного тумана, солнечного излучения (радиации).

Подводные ОК должны выдерживать избыточное гидростатическое давление 70 МПа (при прокладке на береговых и морских участках) и 0,7 МПа (при прокладке на речных переходах и на глубоководных участках водоемов).

Оптические кабели должны иметь защиту от продольного распространения влаги.

Гидрофобный компаунд, заполняющий оптический кабель, *не должен* становиться текучим при температуре до 70 °С, влиять на параметры оптических волокон, легко удаляться при монтаже, быть токсичным и вызывать

коррозию и *должен* быть совместим с другими материалами оптического кабеля.

Оптические кабели, предназначенные для прокладки внутри зданий, в коллекторах и тоннелях, должны иметь наружную оболочку из материала, не распространяющего горение.

Срок службы оптических кабелей должен быть не менее 25 лет. Конструкция ОК должна исключать применение специальных мер безопасности.

## 8.4. Оптические волокна

### 8.4.1. Распространение сигнала в ОВ

Основой ВОЛП является световод ([рис. 8.9](#)), представляющий собой двухслойную конструкцию, состоящую из проводящей среды (сердцевины) и оболочки, имеющих разные показатели коэффициентов преломления.

Передача светового сигнала происходит в результате преломления и многократного полного отражения энергии сигнала при переходе из среды с одним коэффициентом преломления в среду с другим коэффициентом преломления.

Электромагнитная волна  $S_{\text{пад}}$ , падая на границу двух диэлектрических сред под углом  $\theta_{\text{пад}}$ , частично отражается ( $S_{\text{отр}}$ ) от границы раздела под углом  $\theta_{\text{отр}}$  и частично преломляется ( $S_{\text{пр}}$ ) под углом  $\theta_{\text{пр}}$  ([рис. 8.9, а](#)). При этом соблюдается соотношение  $n_1 \sin \theta_{\text{пад}} = n_2 \sin \theta_{\text{пр}}$ , где  $n_1, n_2$  – коэффициенты преломления соответственно сердцевины и оболочки.

Угол  $\theta_{\text{пр}}$  с увеличением угла  $\theta_{\text{пад}}$  возрастает и при  $\theta_{\text{пад}} = \theta_0$  становится равным  $90^\circ$ , а преломленный световой сигнал скользит вдоль границы раздела сред ([рис. 8.9, б](#)). При всех значениях  $\theta_{\text{пад}} > 0$  преломленная волна будет отсутствовать. Угол  $\theta_0 = \arcsin(n_1/n_2)$ , при котором световая энергия зигзагообразно распространяется по сердцевине световода ([рис. 8.9, в](#)), называют *углом полного внутреннего отражения*.

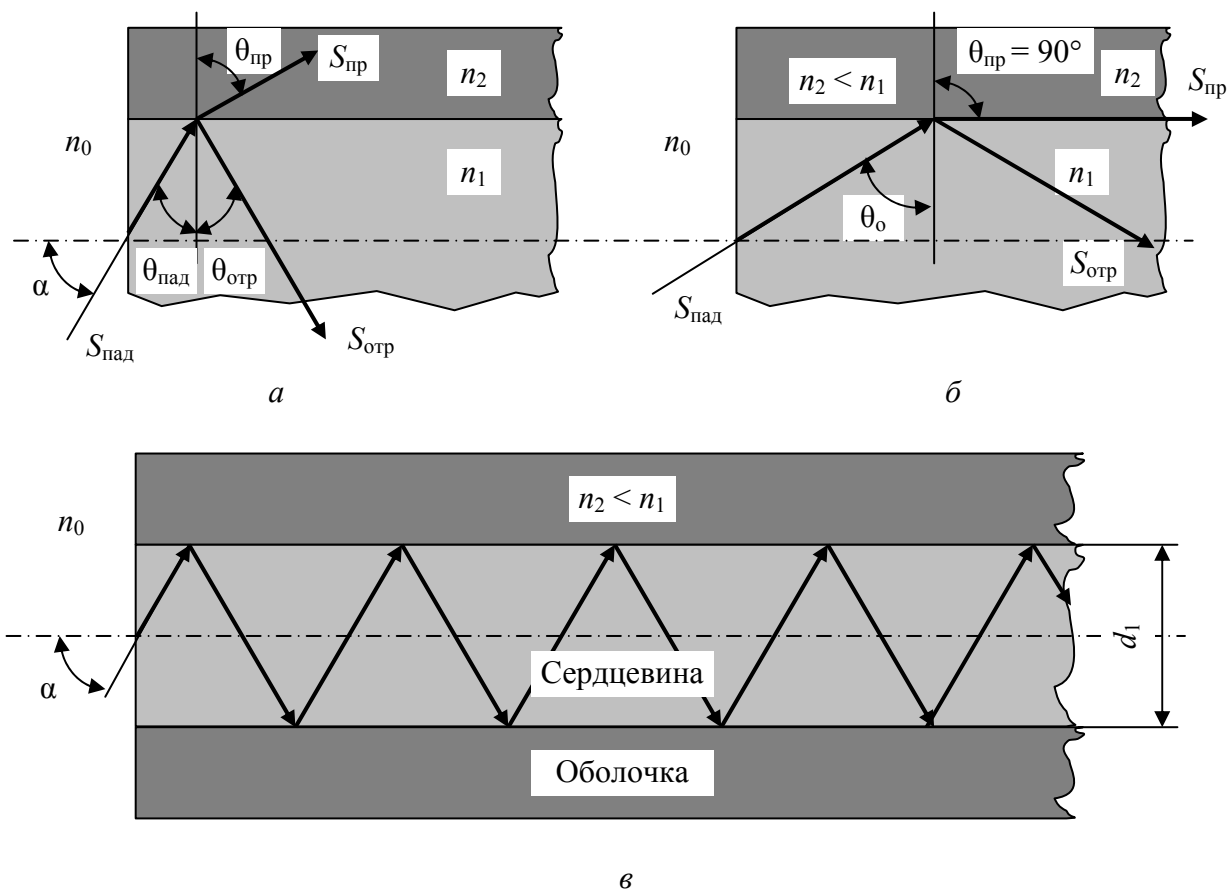


Рис. 8.9. Схема распределения и траектория распространения оптического сигнала в световоде

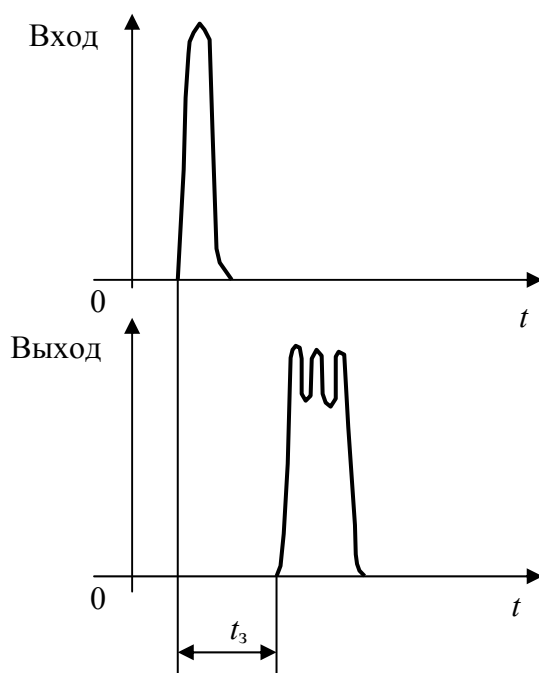


Рис. 8.10. Задержка и искажение сигнала на выходе световода

Угол полного внутреннего отражения определяет условие падения светового сигнала на торец световода. Если на торец световода из окружающей среды с коэффициентом преломления  $n_0$  падает сигнал под углом  $\alpha$  с коэффициентом преломления  $n_1$  к оси сердцевины, то при определенном угле падения

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_{\max} \right)$$

сигнал будет полностью отражаться от границы раздела сред «серцевина – среда». Для воздушной среды ( $n_0 = 1$ ) получим  $\sin \alpha_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ . Угол  $\alpha_{\max}$  между оптической осью и одной из образующих светового конуса, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения, называется *апертурой*. Большая апертура позволяет воспринимать и передавать максимум энергии от источника с большим углом излучения светового потока. Однако при  $\alpha_{\max}$  появятся искажения, так как часть световой энергии передается по сердцевине, часть – по оболочке и некоторая часть окажется в окружающем пространстве. Это приводит к расширению и некоторому ослаблению выходного сигнала световода (рис. 8.10). Кроме того, сигнал на выходе оказывается задержанным на величину  $t_3$  за счет конечного времени прохождения по световоду.

Между углом полного внутреннего отражения  $\theta_0$  и апертурным углом падения луча  $\alpha_{\max}$  существует взаимосвязь: чем больше  $\theta_0$ , тем меньше  $\alpha_{\max}$ . Поэтому необходимо стремиться, чтобы угол входа луча в световод укладывался в апертурный угол  $\alpha_{\max}$ , а угол падения луча на границу «серцевина – среда» был больше угла полного внутреннего отражения.

Длина волны  $\lambda$  передаваемого по световоду сигнала связана с диаметром сердцевины выражением  $\lambda = d \cos \theta_{\text{пад}}$ . Учитывая  $\cos \theta_{\text{пад}} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{\text{пад}}}$  и  $\sin \theta_{\text{пад}} = n_1/n_2$ , получим

$$\lambda_{\text{кр}} = d \sqrt{1 - \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2},$$

$$f_{\text{кр}} = \frac{c}{\lambda_{\text{кр}}},$$

где  $\lambda_{\text{кр}}$  – критическая длина волны;  $d$  – ширина сердцевины световода;  $f_{\text{кр}}$  – частота передаваемого по световоду сигнала;  $c$  – скорость света.

При  $\lambda_{\text{кр}}$  имеет место *режим стоячей волны*: когда энергия рассеивается в окружающее пространство и по световоду не передается. При частотах вы-

ше критической энергия поля концентрируется внутри сердцевины и эффективно передается по световоду. Таким образом, в световоде могут распространяться лишь сигналы с длиной волны  $\lambda < d$ , а световоды ведут себя как высокочастотные фильтры.

#### 8.4.2. Типы оптических волокон

Оптические волокна делятся на два типа: *многомодовые* и *одномодовые*. Первые имеют более толстую сердцевину (светонесущую жилу) с типовым диаметром 50 или 62,5 мкм, сердцевина вторых – от 2 до 10 мкм (для сравнения: диаметр обычного человеческого волоса – 140 мкм).

Многомодовыми волокна называют потому, что их диаметр значительно больше длины волны, а значит, в них распространяется множество различных типов световых лучей – *мод*. В отличие от одномодовых многомодовые кабели предназначены для использования на более коротких расстояниях. Причина этого – *дисперсия*, т. е. уширение световых импульсов. После прохождения фотонами некоторого расстояния импульсы «расплываются» до такой степени, что приемник уже не в состоянии отличить уровень логической единицы от нуля.

По одномодовому кабелю сигналы способны передаваться на сотни и даже тысячи километров, в зависимости от типа источника излучения, длины волны и скорости передачи данных. Поскольку визуально отличить многомодовое волокно от одномодового практически невозможно, многомодовые кабели обычно имеют оранжевую оболочку, а одномодовые – желтую.

В оптической связи используются два типа источников: *светодиоды* и *лазеры*. Первые применяются только с многомодовыми кабелями, вторые – чаще всего с одномодовыми. Светодиоды не могут работать с одномодовыми кабелями, так как их излучение недостаточно когерентно.

По медным линиям связи данные передаются в виде последовательностей импульсов, соответствующих нулевым и единичным битам. Оптоволоконно работает аналогичным образом, но импульсы образуются включением и выключением источника света. Если говорить точнее, то при низких скоростях передачи модулируется управляющий ток (лазеры с внутренней модуляцией), а при высоких – сам оптический сигнал (лазеры с внешней модуляцией). Чем чаще пульсация излучения, тем больше данных можно переслать по оптоволокну.

Существует предельная скорость, с которой лазер может включаться и выключаться, все еще генерируя столько фотонов, сколько необходимо для того, чтобы мощность на другом конце кабеля была достаточной для принимающей аппаратуры. По этой причине в высокоскоростных оптоволоконных соединениях для передачи данных используется несколько длин волн – *спектральных каналов*.

По одному медному кабелю тоже может передаваться несколько различных потоков данных за счет деления его полосы пропускания на каналы. Каждому каналу разрешается пересылать данные в течение определенного промежутка времени, и таким образом все каналы по очереди получают воз-



возможность отправить свои данные. Этот метод называется *временным уплотнением* – Time Division Multiplexing (TDM). Существует также *частотное уплотнение* – Frequency Division Multiplexing (FDM): когда каждый канал занимает определенную ему полосу частот. Примером применения FDM-систем является радио- и телевизионное вещание.

**Многомодовое волокно.** Существует два варианта многомодовых волокон: *со ступенчатым и градиентным профилем показателя преломления сердцевин*.

В многомодовом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления одновременно распространяется большое число мод, введенных в волокно под разными углами. Основным недостатком такого волокна является наличие межмодовой дисперсии, возникающей из-за того, что разные моды проходят в волокне разный оптический путь ([рис. 8.11, а](#)).

В многомодовом волокне с градиентным профилем показателя преломления значение показателя преломления сердцевин  $n$  плавно изменяется от центра к краям по закону

$$n(r) = n_1 \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^g \right]^{1/2}, \quad (8.1)$$

где  $r$  – текущий радиус;  $n_1$  – показатель преломления в центре сердцевин (тот же, что и для ступенчатого ОВ);  $\Delta$  – нормализованная разность показателей преломления;  $a$  – радиус сердцевин;  $g$  – параметр, определяющий форму профиля показателя преломления (при  $g = \infty$  профиль ступенчатый, при  $g = 2$  профиль параболический).

В соответствии с уравнением ([8.1](#)) моды в волокне распространяются по параболическим траекториям ([рис. 8.11, б](#)), и разность их путей, а следовательно, и межмодовая дисперсия, существенно меньше, чем в многомодовом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления.

Многомодовые волокна оптимизированы для работы на длинах волн 850 и 1310 нм и отличаются большим диаметром сердцевин (стандартное – 50 мкм, для особых целей – от 62,5 до 100 мкм) и высокой числовой апертурой (0,2–0,37), что позволяет вводить в волокно большую мощность и облегчает операцию сращивания волокон. Большая ширина полосы пропускания градиентных волокон (400–1000 МГц · км) обеспечивается жестким технологическим контролем формы (параболической) профиля показателя преломления. Эти волокна в основном применяются в локальных и внутриобъектовых сетях.

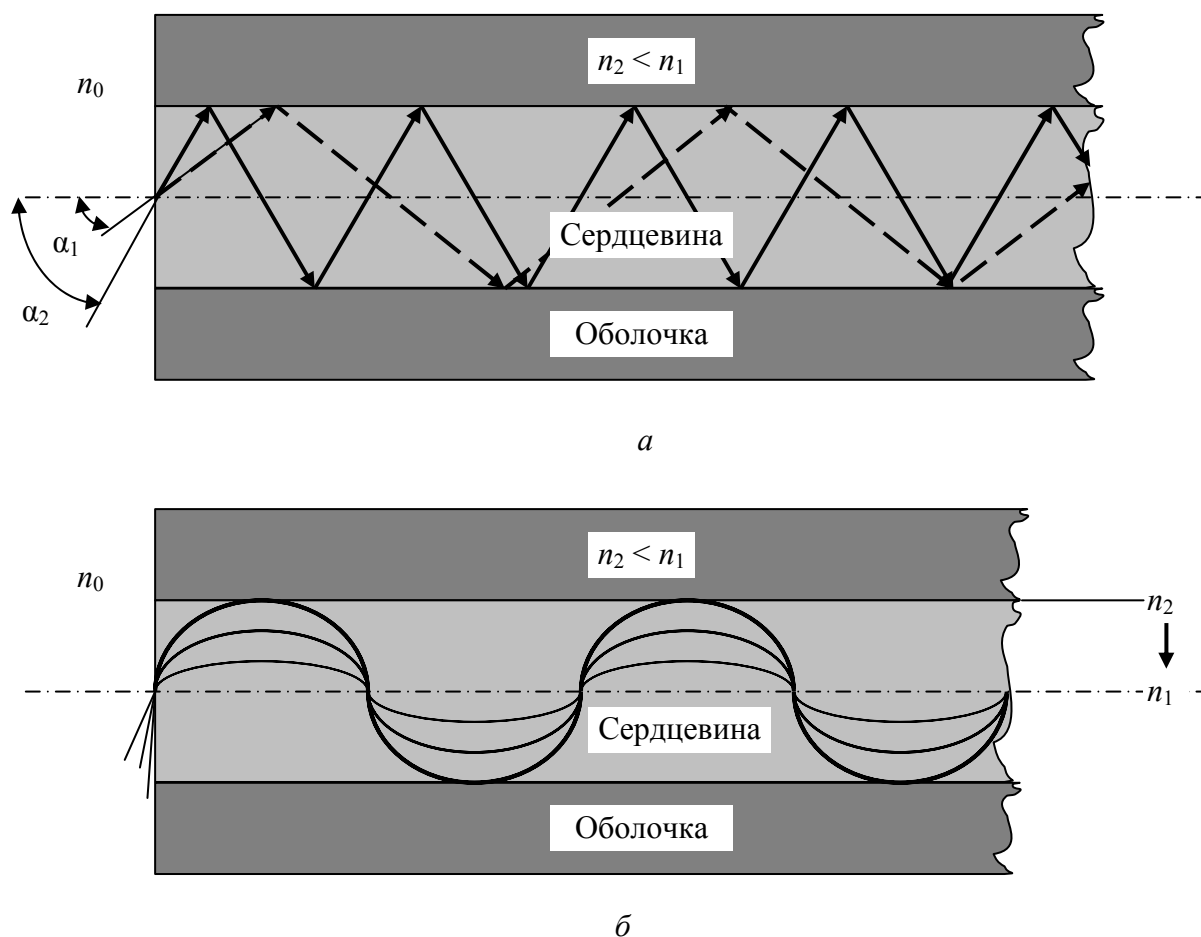


Рис. 8.11. Траектория распространения оптического сигнала:  
а – в ступенчатом волокне; б – в градиентном волокне

Потребность в высокоскоростных локальных сетях связи, работающих на протоколах типа Gigabit Ethernet (IEEE 802,32) с использованием лазерных источников, привела к созданию новой серии многомодовых волокон: марка InfiniCor фирмы Corning, марки GigaGuide и LazerWave фирмы OFS, марка Multimode GLight фирмы Alcatel. Эти волокна способны обеспечить не только скорость передачи от 1 до 10 Гбит/с на относительно большие расстояния, но и увеличение скорости передачи в будущем. Новые ОВ полностью совместимы с используемыми в локальных сетях многомодовыми волокнами и аппаратурой.

**Одномодовое волокно.** Потребность в увеличении полосы пропускания и дальности передачи сигнала привела к созданию одномодового оптического волокна, диаметр сердцевины и соотношение показателей преломления сердцевины и оболочки которого таковы, что в нем может распространяться только одна мода (строго говоря, две моды с взаимно ортогональными состояниями поляризации).

Развитие магистральных и внутризоновых систем связи в направлении роста скорости и дальности передачи обусловило создание нескольких типов одномодовых волокон, которые можно классифицировать по такому крите-

рию, как *хроматическая дисперсия*. В рекомендациях МСЭ-Т регламентированы параметры этих типов волокон.

*Одномодовое волокно с дисперсией, оптимизированной для использования на длине волны 1310 нм* (Рек. G.652 МСЭ-Т) – исторически первое и наиболее широко распространенное волокно, производство которого осуществляется с 1983 г. для магистральных и внутризоновых сетей связи.

Стандартное одномодовое волокно предназначено для работы в двух рабочих диапазонах длин волн – 1285–1330 нм и 1530–1565 нм. Его затухание на длине волны 1550 нм очень мало (0,2 дБ/км), а дисперсия на этой длине волны составляет 18–20 пс/нм · км ([рис. 8.12](#)).

Принципиально новой модификацией этого типа ОВ являются волокна с отсутствием гидроксильного пика: на длине волны 1383 нм коэффициент затухания равен 0,31 дБ/км, стабильность затухания сохраняется даже после испытаний на водородное старение. Эти волокна (марка ANWave фирмы OFS, марка SMF 28e фирмы Corning) позволяют увеличить почти на 100 нм рабочий диапазон длин волн по сравнению со стандартным ОВ, открывая пятое окно прозрачности 1360–1460 нм, и могут обеспечить многоканальную передачу без компенсации дисперсии в городских и внутризоновых сетях. Преимуществом волокон этого типа по сравнению со стандартным ОВ является возможность реализовать 16 недорогих CWDM-каналов в диапазоне 1260–1625 нм вместо 12. Волокна соответствуют Рек. G.652.C, полностью совместимы со стандартными ОВ и существующим оборудованием и могут заменить стандартные ОВ в системах связи.

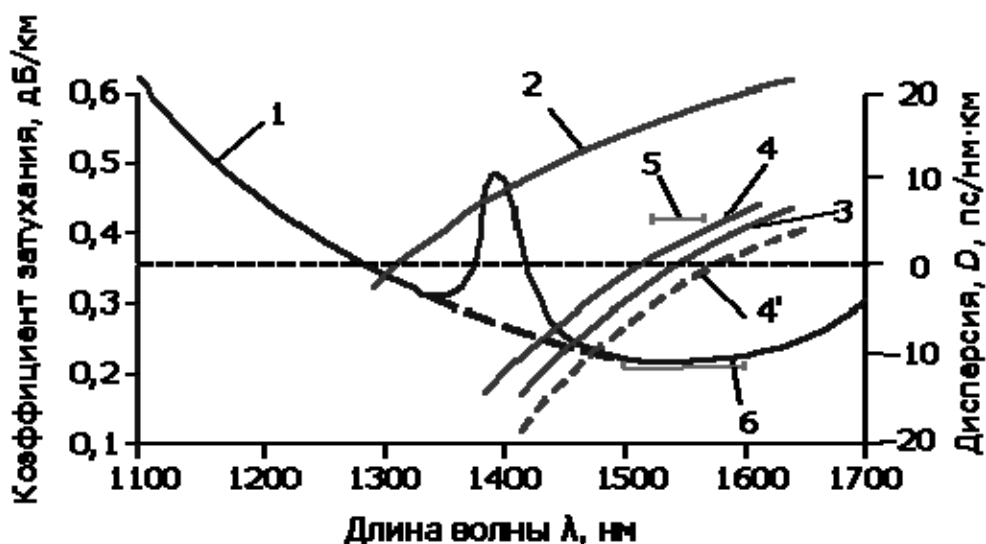


Рис. 8.12. Коэффициент затухания и дисперсионные характеристики различных типов одномодовых волокон: 1 – зависимость коэффициента затухания оптических волокон; 2 – зависимость  $D$  стандартного оптического волокна; 3 – зависимость  $D$  оптического волокна с нулевой, смещенной в область 1550 нм дисперсией; 4 и 4' – зависимость  $D$  оптического волокна с ненулевой смещенной дисперсией; 5 – ширина спектра оптического усилителя на эрбиевом волокне; 6 – диапазон минимального затухания ОВ

Одномодовое волокно со смещенной в область 1550 нм длиной волны нулевой дисперсии (Рек. МСЭ-Т G.653) имеет область минимума оптических потерь, совпадающую с областью минимальной хроматической дисперсии (см. [рис. 8.12](#)). Волокно этого типа хорошо совместимо с оптическими усилителями, поскольку интервал длин волн, в котором волокно имеет наилучшие параметры по затуханию и дисперсии, совпадает с полосой максимального усиления оптических усилителей на эрбиевом волокне.

Одномодовое волокно с ненулевой дисперсией, смещенной в область длин волн 1550 нм (Рек. МСЭ-Т G.655). Необходимость разработки этого типа ОВ была связана с внедрением эрбиевых оптических усилителей в линиях связи и развитием оптических систем со спектральным уплотнением каналов, что значительно снизило себестоимость каналов. Однако способность эрбиевых оптических усилителей одновременно усиливать уплотненные сигналы в диапазоне 1550 нм, высокий уровень мощности сигнала (100 мВт и более) и большие регенерационные участки (120 км и более) привели к возникновению нелинейных оптических эффектов в кварцевом волокне. Нелинейное взаимодействие вызывает искажение сигнала и накапливается вдоль всей длины регенерационного участка.

Одномодовое волокно с контролируемой величиной (отличной от нуля) хроматической дисперсии, находящейся в пределах 0,1–6,0 пс/нм · км в области спектра оптического усилителя (1530–1565 нм), было разработано для уменьшения четырехволнового смешивания – эффекта, наиболее опасного для систем передачи со спектральным уплотнением при равномерно разнесенных по частоте каналах. Низкий наклон дисперсионной кривой и малое затухание обеспечивают использование этого волокна в расширенном диапазоне – 1530–1625 нм. Структура волокна такова, что величина его дисперсии достаточно велика, чтобы подавить эффект четырехволнового смешивания, но мала, чтобы обеспечить скорость передачи до 10 Гбит/с на большие расстояния без компенсации дисперсии.

Важнейшей характеристикой волокна с ненулевой смещенной дисперсией является большая эффективная *площадь сечения*  $A_{\text{эфф}}$ , что позволяет уменьшить нелинейные эффекты, не уменьшая мощности вводимого в волокно света и длины линии. При этом оптимизация профиля показателя преломления волокна в сочетании с совершенной технологией его изготовления позволила найти приемлемый компромисс при решении такой противоречивой задачи, как увеличение эффективной площади сечения, уменьшение наклона дисперсионной кривой и снижение оптических потерь на излучение на микро- и макроизгибах. Лучшим примером такого волокна может служить волокно марки LEAF, впервые изготовленное фирмой Corning, площадь эффективного сечения которого составляет 72, а также волокно марки True Wave XL фирмы OFS для подводных кабелей. К этому типу ОВ относится также волокно марки MetroCor фирмы Corning, предназначенное для использования в высокоскоростных городских сетях, поскольку в диапазоне 1530–1605 нм данное волокно имеет более низкую дисперсию (отрицательную), чем стандартное ОВ, и может обеспечить многоканальную передачу с при-

менением недорогих систем спектрального уплотнения каналов DWDM (по сравнению со стандартным ОВ). Кроме того, диаметр модового поля волокна MetroCor невелик (8,0 мкм), что позволяет снизить наклон кривой дисперсии и сдвинуть на 160 нм вправо точку нулевой дисперсии (~1640 нм).

#### 8.4.3. Характеристики оптических волокон

Создание современных волоконно-оптических линий связи требует все более высокого качества оптического волокна и жесткого контроля за его параметрами, каждый из которых обеспечивает те или иные функции системы. Так, для оптимизации бюджета потерь и длин регенерационных участков магистральных волоконно-оптических линий связи крайне важно четко контролировать коэффициент затухания. Коэффициент хроматической дисперсии определяет предельное расстояние, на которое может передаваться оптический сигнал с заданными спектральными характеристиками при заданных требованиях к качеству передачи. В системах со спектральным уплотнением величина дисперсии влияет на степень проявления нелинейных эффектов и связанные с этим перекрестные помехи.

Диаметр модового поля, его неконцентричность по отношению к оболочке волокна, диаметр сердцевины волокна и ее некруглость, радиус собственной кривизны ОВ играют важную роль для минимизации потерь в местах сварных соединений и обеспечения их качества. Кроме того, асимметрия сердцевины вызывает появление поляризационной модовой дисперсии.

Стабильность затухания при макро- и микроизгибах, высокая механическая прочность ОВ и большие длины волокна (кабеля) позволяют оптимизировать процесс каблирования (замена одной кабельной сети на другую), прокладки и монтажа кабеля, а также техническое обслуживание линейных трактов. Механическая прочность ОВ является основным фактором, определяющим надежность и долговечность оптического кабеля и линии связи.

Затухание и дисперсия – два основных параметра оптического волокна, стремление к оптимизации которых в основном и определило ход развития волоконно-оптической технологии.

### 8.4.3.1. Затухание в оптическом волокне

Величина затухания в ОВ описывает уменьшение интенсивности излучения по мере его прохождения по волокну.

Затухание  $A(\lambda)$ , дБ, на длине волны  $\lambda$ , между поперечными сечениями волокна 1 и 2, находящимися на расстоянии  $L$ , км, определяется как

$$A(\lambda) = -10 \lg \frac{P_2(\lambda)}{P_1(\lambda)}, \quad (8.2)$$

где  $P_2(\lambda)$  – интенсивность импульса на выходе из поперечного сечения 2;  $P_1(\lambda)$  – интенсивность импульса на входе в поперечное сечение 1.

Коэффициент затухания  $\alpha(\lambda)$ , дБ/км, или затухание на единицу длины волокна, не зависит от длины волокна и рассчитывается как

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L}. \quad (8.3)$$

Оптические потери в кварцевом оптическом волокне  $\alpha$  определяются в основном тремя факторами ([рис. 8.13](#)):

- поглощением излучения материалом  $\alpha_{\text{погл}}$ ;
- рэлеевским рассеянием  $\alpha_{\text{расс}}$ ;
- потерями на излучение  $\alpha_{\text{изл}}$ .

Полные оптические потери в общем виде можно представить как

$$\alpha = \alpha_{\text{погл}} + \alpha_{\text{расс}} + \alpha_{\text{изл}}. \quad (8.4)$$

Потери на поглощение состоят из собственных оптических потерь в кварцевом стекле ОВ и избыточных потерь, вызванных поглощением излучения на примесях.

Собственные оптические потери обусловлены краями основных полос фундаментального поглощения в ультрафиолетовой и ближней инфракрасной областях спектра. Первая полоса обусловлена природой химической связи Si–O, а длинноволновый край поглощения – собственными колебаниями связи Si–O и ее обертонами. На рабочей длине волны 1550 нм поглощение длинноволнового края сказывается незначительно, что обеспечивает предельно низкие для кварцевого ОВ потери в этой области. В области длин волн, больших 1600 нм, потери на инфракрасное поглощение доминируют.

Избыточные потери поглощения вызываются наличием поглощающих примесей, среди которых наибольшее влияние оказывают ионы гидроксила  $\text{OH}^-$ . Среди ряда полос поглощения, причиной которого является наличие ионов  $\text{OH}^-$  в кварцевом стекле, наиболее интенсивна полоса поглощения на длине волны 1383 нм, обусловленная комбинацией обертонов основной полосы поглощения ионов  $\text{OH}^-$  (2,73 мкм) и колебаний кремнекислородной решетки кварцевого стекла. Эта полоса поглощения в рабочей области спектра кварцевого ОВ называется *гидроксильным пиком*.

*Рэлеевское рассеяние* является причиной собственных оптических потерь кварцевого стекла, имеющей в основе фундаментальный механизм – рассеяние излучения на флуктуациях плотности или показателя преломления (размером меньше  $0,1\lambda$ ), «замороженных» в стекле в процессе его изготовления.

Оптические потери  $\alpha$ , вызванные рэлеевским рассеянием, уменьшаются с возрастанием длины волны по закону  $\alpha = A/\lambda^4$ , и именно они определяют основные потери на длине волны 1550 нм, где потери для кварцевого волокна минимальны.

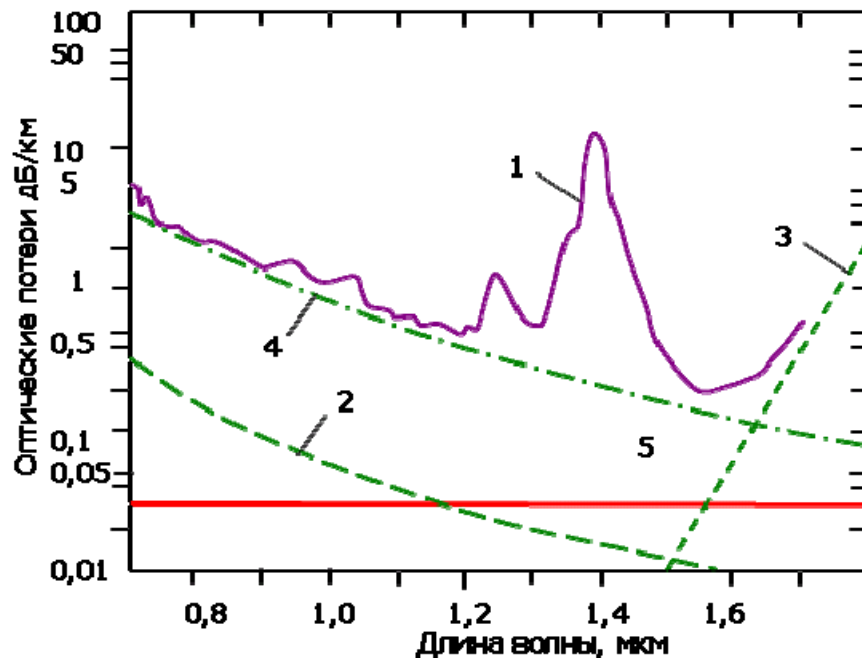


Рис. 8.13. Спектральная зависимость оптических потерь кварцевого одномодового ОВ и составляющие ее механизмы: 1 – спектральное поглощение кварцевого одномодового волокна с гидроксильными пиками на длинах волн 0,95; 1,25; 1,38 мкм; 2 – собственное поглощение в ультрафиолетовой области спектра; 3 – собственное поглощение в инфракрасной области спектра; 4 – рэлеевское рассеяние; 5 – потери на излучение, вызванные волноводными нерегулярностями

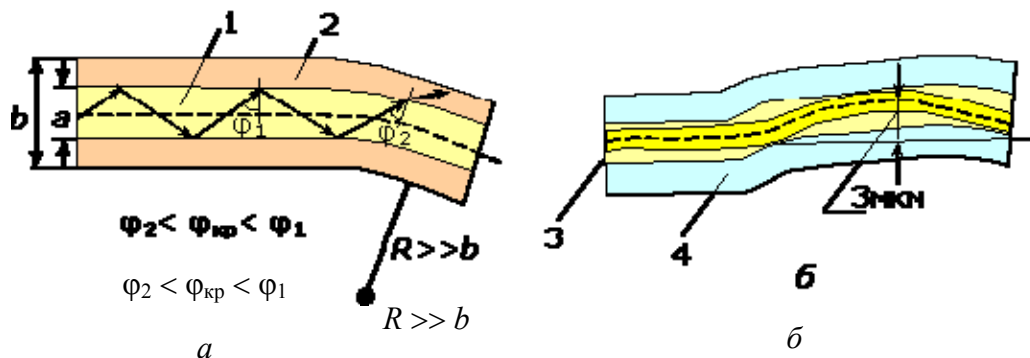


Рис. 8.14. Потери на излучение в оптических волокнах: а – на макроизгибах (многомодовое ОВ); б – на микроизгибах: 1 – сердцевина ОВ; 2 – оболочка ОВ; 3 – оптическое волокно; 4 – защитное полимерное покрытие;  $d$  – диаметр сердцевины;  $b$  – диаметр оболочки;  $1/b \cdot d$  диус изгиба;  $\varphi_{кр}$  – критический угол



*Потери на излучение* вызываются волноводными нерегулярностями, которые обусловлены в основном наличием макро- и микроизгибов ОВ и нерегулярностей геометрии ОВ с периодом менее 1 мм, когда энергия направляемых мод передается в моды излучения. Потери на излучение на макро- и микроизгибах ОВ возникают при любых отклонениях положения отрезка ОВ от прямолинейного и вызваны выходом некоторого количества излучения в оболочку и его потерей. Потери на излучение на макроизгибах возникают, когда радиус изгиба ОВ во много раз превышает диаметр его оболочки ([рис. 8.14, а](#)). В этом случае угол падения луча на границе «сердцевина – оболочка» в месте изгиба  $\varphi_2$  становится меньше критического угла полного внутреннего отражения ( $\varphi_2 < \varphi_{кр} < \varphi_1$ ) и луч выходит из сердцевины, что приводит к увеличению оптических потерь.

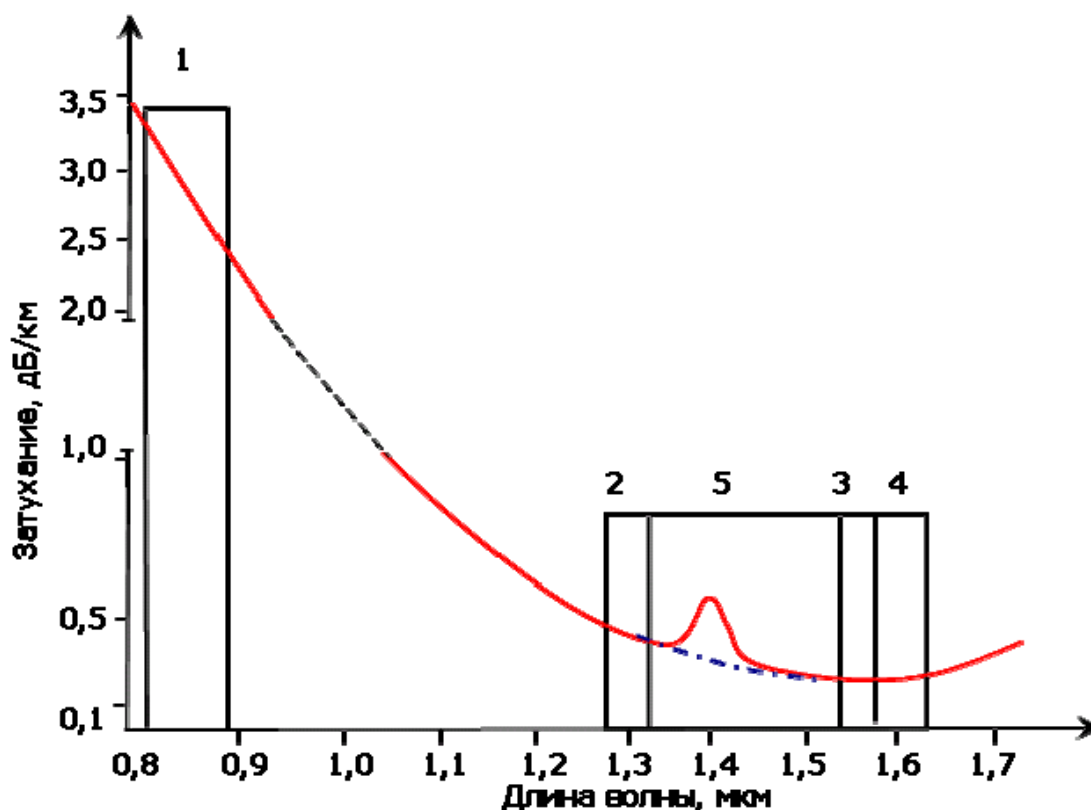
Микроизгибы вызываются случайными отклонениями ОВ от его номинального осевого положения, амплитуда отклонений составляет менее 3 мкм, а период – менее 1 мм ([рис. 8.14, б](#)). Причинами микроизгибов являются деформации растяжения и сжатия ОВ при изменениях температуры, наложении оболочек, скрутке при изготовлении кабеля.

*Рабочие диапазоны длин волн.* В современных линиях связи, где материалом среды передачи является кварцевое оптическое волокно, используются несколько рабочих диапазонов длин волн излучения (окон прозрачности), которые обозначены на кривой спектрального затухания кварцевого ОВ, представленной на [рис. 8.15](#).

Первые линии связи на многомодовых волокнах работали в первом окне прозрачности (850 нм), поскольку для работы в этом диапазоне были доступны лазерные источники и приемники. Применение линий, использующих первое окно прозрачности, ограничивается локальными и внутри-объектовыми сетями.

Линии магистральной и внутризоновой связи, имеющие длину регенерационного участка 30–70 км, работают во втором окне прозрачности (1285–1330 нм), величина хроматической дисперсии в котором минимальна.





Рис

8.15. Спектральное затухание и окна прозрачности кварцевого оптического волокна: 1 – первое окно; 2 – второе окно; 3 – третье окно; 4 – четвертое окно; 5 – пятое окно

Наиболее перспективным для высокоскоростных сетей связи оказалось освоение диапазонов пропускания в длинноволновой области: третьего (1530–1565 нм) и четвертого (1565–1625 нм) окон прозрачности, в которых все современные типы кварцевых оптических волокон имеют наименьшее затухание (0,18–0,20 дБ/км) и для которых разработаны оптические усилители на основе легированного эрбием оптического волокна.

В последние годы разработана принципиально новая технология изготовления оптических волокон, исключающая наличие ионов  $\text{OH}^-$  в стекле сердцевины волокна. Таким образом было открыто для передачи пятое окно прозрачности (1350–1530 нм), что увеличило рабочий диапазон длин волн почти на 100 нм по сравнению со стандартным волокном. При этом коэффициент затухания ОВ в пятом окне прозрачности оказывается даже меньшим, чем во втором окне.

Оценка качества ОВ по затуханию проводится с учетом комплекса характеристик, которые обычно представлены в спецификациях на оптические волокна, а именно:

- коэффициент затухания на опорных длинах волн 850, 1310 и 1550 нм;
- прирост коэффициента затухания в интервале рабочих длин волн относительно коэффициента затухания на опорной длине волны;

- коэффициент затухания на длине волны гидроксильного пика  $1383 \pm 3$  нм;
- однородность (непрерывность) затухания по длине волокна;
- макроизгибные потери (изменения затухания волокна, намотанного на оправку диаметром 32 мм, один виток, и на оправку диаметром 75 мм, 100 витков).

*Длина волны отсечки* определяется как наименьшая длина волны, при которой в волокне реализуется одномодовый режим распространения излучения. Длина волны отсечки зависит от натяжения волокна, радиуса изгиба волокна, сжатия и т. д., поэтому длина волны отсечки «свободного волокна»  $\lambda_c$  меньше, чем длина волны отсечки оптического кабеля  $\lambda_{cc}$ . Важность этого параметра обусловлена тем, что при превышении значения длины волны отсечки оптического кабеля над длиной волны используемого в линии связи оптического источника излучения передача сигнала по ОК в одномодовом режиме становится невозможной. В спецификациях на ОВ обычно приводится значение параметра  $\lambda_{cc}$  для волокна в кабеле.

*Диаметр модового поля (ДМП)* – одна из важнейших характеристик одномодового волокна. Характеризуется диаметром сечения ОВ, в котором сосредоточена основная часть мощности распространяющегося излучения. Диаметр модового поля по величине численно близок, но не равен диаметру сердцевины ОВ. В спецификации на ОВ обычно приводится также погрешность концентричности ДМП волокна. Некруглость ДМП, как правило, не измеряется.

#### 8.4.3.2. Дисперсия оптического волокна

Второй важнейшей характеристикой оптического волокна с точки зрения применения его в линиях связи является *дисперсия* – рассеяние во времени и в пространстве спектральных или модовых составляющих оптического импульса, что обуславливает увеличение его длительности при распространении по длине ОВ. При прохождении последовательности прямоугольных импульсов (цифрового сигнала) через определенную длину ОВ импульсы, вследствие дисперсии, будут уширяться и в итоге станет невозможным разделение двух соседних импульсов, т. е. возникнут ошибки передачи. Таким образом, дисперсия является основным фактором, ограничивающим пропускную способность ОВ, т. е. ширину его полосы пропускания.

Три механизма дисперсии являются причинами, уменьшающими ширину полосы пропускания ОВ:

- межмодовая дисперсия;
- хроматическая дисперсия;
- поляризационно-модовая дисперсия.

Относительное влияние каждого из этих механизмов зависит от типа ОВ (многомодовое или одномодовое) и типа источника излучения (лазерный или светоизлучающий диод).

*Межмодовая дисперсия* обусловлена различной скоростью распространения мод в волокне и возникает в многомодовых ОВ, в том числе при использовании лазерных источников. Величина межмодовой дисперсии определяется в основном профилем показателя преломления ОВ. В одномодовых ОВ межмодовая дисперсия возникает, если рабочая длина волны меньше длины волны отсечки волокна, т. е. когда режим работы ОВ перестает быть одномодовым.

*Хроматическая дисперсия* возникает из-за различия скоростей распространения длин волн, составляющих спектр источника излучения, что приводит к уширению импульса. Величина хроматической дисперсии определяется двумя составляющими: *материальной дисперсией*  $M_m(\lambda)$  и *волноводной дисперсией*  $M_v(\lambda)$ .

Материальная дисперсия может рассматриваться как уширение импульса при его распространении через массив стекла, что обусловлено зависимостью показателя преломления стекла сердцевины ОВ от длины волны.

Волноводная дисперсия связана с направляющими свойствами волокна и определяется зависимостью групповой скорости мод от длины волны излучения. Степень этой зависимости определяется волноводной структурой волокна: геометрическими размерами сердцевины и формой профиля показателя преломления, а также шириной спектра излучения источника.

Для расчета хроматической дисперсии  $D(\lambda)$ , пс/нм · км, волокон с несмещенной дисперсией на длине волны пользуются уравнением Селмейера:

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \lambda \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right] = \frac{S_0}{4} \left[ \lambda - \frac{\lambda_0^3}{\lambda^3} \right] \frac{n!}{r!(n-r)!}, \quad (8.5)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны нулевой дисперсии, нм;  $S_0$  – наклон дисперсионной кривой.

Типичные кривые материальной и волноводной дисперсии для разных типов одномодовых волокон: стандартного с несмещенной дисперсией (Рек. МСЭ-Т G.652), ОВ со смещенной дисперсией (Рек. МСЭ-Т G.653) и ОВ с ненулевой смещенной дисперсией (Рек. МСЭ-Т G.655) – приведены на [рис. 8.16](#).

Материальная дисперсия практически одинакова для всех типов ОВ и на длинах волн больше 1290 нм имеет положительный знак. Волноводная дисперсия имеет отрицательный знак, ее величина для стандартного ОВ незначительна, что в сочетании с материальной дисперсией дает нулевое значение хроматической дисперсии для стандартного волокна на длине волны 1310 нм.

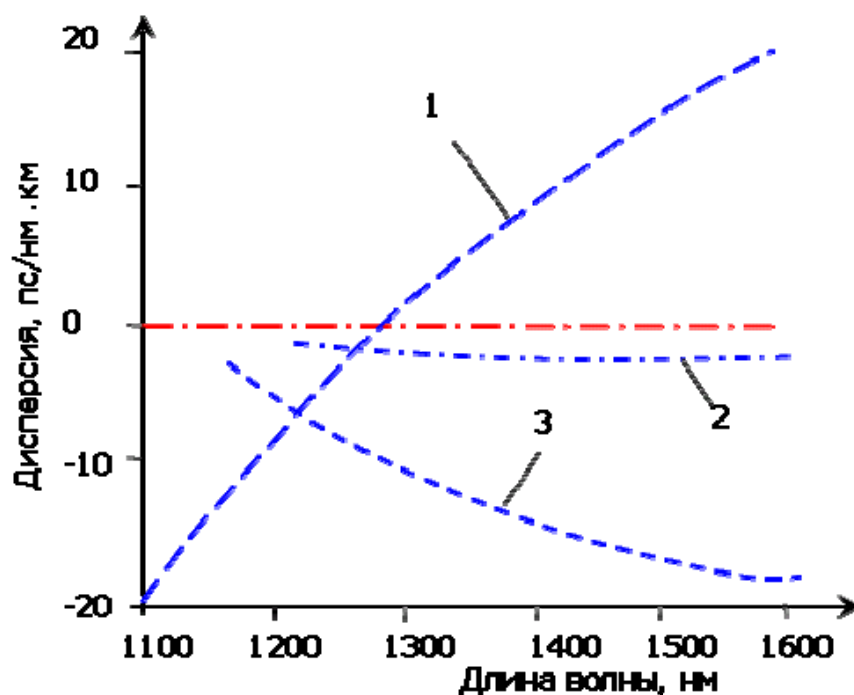


Рис. 8.16. Типичные кривые материальной и волноводной дисперсии одномодовых волокон: 1 – материальная дисперсия; 2 – волноводная дисперсия стандартного ОВ с несмещенной дисперсией (Рек. МСЭ-Т G.652); 3 – волноводная дисперсия ОВ со смещенной и ненулевой смещенной дисперсией (Рек. МСЭ-Т G.653 и G.655 соответственно)

Изменяя структуру профиля показателя преломления ОВ, т. е. меняя величину волноводной дисперсии, можно изменять соотношение между материальной и волноводной дисперсиями и, следовательно, величину суммарной хроматической дисперсии. Этот принцип лежит в основе технологии получения ОВ со смещенной (Рек. МСЭ-Т G.653) и ненулевой смещенной (Рек. МСЭ-Т G.655) дисперсиями. Волокна этих типов оптимизированы для работы в третьем и четвертом окнах прозрачности (1530–1625 нм), где сочетаются минимальное затухание на длине волны 1550 нм и низкое значение хроматической дисперсии в этом диапазоне.

В спецификациях хроматическую дисперсию ОВ обычно характеризуют следующие параметры:

- длина волны нулевой дисперсии  $A_0$ , нм;
- максимальная дисперсия, пс/нм · км, в рабочих интервалах длин волн 1285–1330 нм и 1530–1565 нм;
- максимальный наклон дисперсионной кривой при  $A_0$ , пс/нм<sup>2</sup> · км.

*Поляризационная модовая дисперсия (ПМД)* характеризуется временем дифференциальной групповой задержки между двумя ортогонально поляризованными модами, что приводит к уширению импульса. Причиной возникновения ПМД является небольшая асимметрия поперечного сечения, всегда имеющая место в реальных ОВ, и напряжения, которым эти ОВ подвергают-

ся. Величина ПМД определяется комбинацией двух факторов: линейного двулучепреломления и взаимодействия мод.

Появление ПМД в ОВ определяют два вида факторов: внутренние и внешние. *Внутренние факторы* – это некруглость сердцевины и оболочки ОВ, неконцентричность сердцевины по отношению к оболочке, эллиптичность покрытия, неконцентричность покрытия по отношению к волокну, внутренние напряжения в стекле ОВ. *Внешние факторы* ПМД связаны с усилиями, действующими на ОВ: это радиальные напряжения сжатия, напряжения сжатия и растяжения при изгибе ОВ и напряжения сдвига при кручении оптического волокна.

Характеристики асимметрии ОВ имеют случайное распределение по длине волокна и во времени, что свидетельствует о статистической природе явления ПМД. Величина ПМД одного участка линии может добавляться и вычитаться из величины другого случайным образом, отсюда имеет место квадратичная зависимость величины ПМД от длины ОВ.

Важной особенностью ПМД является то, что ее величина не является постоянной и зависит от технологии каблирования и воздействий на кабель, таких как сжатие, скручивание, изгиб, монтаж и прокладка кабеля и т. д.

В спецификациях обычно приводятся два параметра, характеризующие величину ПМД, – значение коэффициента ПМД конкретного волокна и величина коэффициента ПМД протяженной линии. В пределах ошибки измерения величина коэффициента ПМД одна и та же для длин волн 1310 и 1550 нм.

Коэффициент ПМД протяженной линии, состоящей из соединенных волокон, определяется как квадратный корень из математического ожидания квадрата (среднеквадратичная величина) коэффициентов ПМД отдельных волокон.

Эффект ПМД в линиях связи первого поколения не принимался во внимание, однако по мере увеличения протяженности линий и внедрения оптических усилителей ПМД стала проявлять себя как фактор, ограничивающий дальность и скорость передачи. При этом требования к ширине полосы пропускания растут на всех уровнях, начиная от магистральных сетей и кончая сетями доступа, и это обстоятельство вызывает необходимость ужесточения требований к ПМД и ее контроля при каблировании и эксплуатации линий связи.

#### 8.4.3.3. Нелинейные характеристики

Нелинейные оптические эффекты возникают в результате взаимодействия электромагнитного излучения световой волны с передающей средой – материалом оптического волокна. Эти эффекты начинают проявляться в условиях высокой интенсивности светового сигнала и большой протяженности линий, поскольку нелинейное взаимодействие накапливается вдоль всей длины регенерационного участка.

Взаимодействие светового сигнала и кварцевой среды ОВ приводит к возникновению целого ряда нелинейных эффектов, которые могут быть подразделены на две категории:

*рассеивающие эффекты:*

- вынужденное бриллюэновское рассеяние;
- вынужденное рамановское рассеяние;

*эффекты, имеющие природу эффекта Керра*, т. е. изменение показателя преломления среды от интенсивности передаваемого излучения:

- фазовая самомодуляция;
- фазовая кросс-модуляция;
- четырехволновое смешивание.

Первым по мере увеличения мощности сигнала проявляется *эффект четырехволнового смешивания*, когда в результате нелинейного взаимодействия энергия из двух соседних спектральных каналов перекачивается в два паразитных канала ([рис. 8.17](#)). Новые каналы накладываются на рабочие каналы, создавая помехи. Влияние этого эффекта особенно велико, когда длина волны нулевой дисперсии находится в рабочем диапазоне длин волн (волокно с нулевой смещенной дисперсией типа G.653).

*Нелинейные эффекты* являются важной проблемой высокоскоростных (высокомощных) систем передачи, которые используют эрбиевые оптические усилители, позволяющие вводить в ОВ сигнал высокой мощности, технику спектрального уплотнения и имеют большую протяженность.

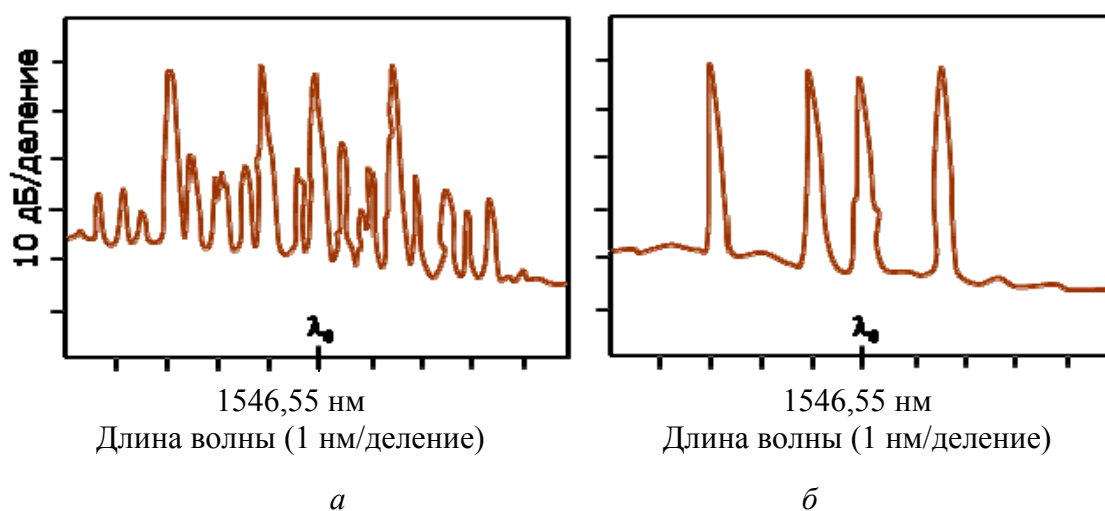


Рис. 8.17. Влияние четырехволнового смешивания на дисперсию ОВ: *а* – ОВ со смещенной дисперсией, длина ОВ 25 км,  $D = 0 \text{ пс/нм}\cdot\text{км}$  при  $\lambda_0 = 1546,55 \text{ нм}$ ; *б* – ОВ с ненулевой смещенной дисперсией марки TrueWave, длина ОВ 50 км,  $D = 2,5 \text{ пс/нм}\cdot\text{км}$  при  $\lambda_0 = 1546,55 \text{ нм}$

Оптическое волокно характеризуется рядом нелинейных характеристик, среди которых следует отметить две наиболее изученные к настоящему времени.



Эффективная площадь сечения  $A_{\text{эфф}}$  определяет характерную пространственную область поперечного сечения ОВ, в которой происходит нелинейное взаимодействие. Для волокон с несмещенной дисперсией (типов G.652 и G.654) вблизи длины волны отсечки при ступенчатом показателе преломления расчет эффективной площади  $A_{\text{эфф}}$ , использующий гауссову аппроксимацию при интегрировании распределения интенсивности фундаментальной моды в сечении волокна, дает выражение

$$A_{\text{эфф}} = \pi\omega^2, \quad (8.6)$$

где  $\omega$  – радиус модового поля.

При длинах волн, больших по сравнению с длиной волны отсечки, для волокон со смещенной и с ненулевой смещенной дисперсией типов G.653 и G.655 используется более общая эмпирическая формула, в которую вводится поправочный коэффициент – корректирующий фактор  $k$ :

$$A_{\text{эфф}} = k\pi\omega^2. \quad (8.7)$$

Таким образом, для точного определения эффективной площади сечения конкретного типа волокна и для данной длины волны необходимо определить диаметр модового поля и корректирующий фактор (безразмерный коэффициент), представляющий собой отношение диаметра модового поля к  $A_{\text{эфф}}$ .

В общем случае корректирующий фактор  $k$  зависит как от длины волны, так и от конструкции (профиля показателя преломления) волокна. Значения корректирующего фактора для некоторых волокон с разными показателями преломления приведены в [табл. 8.6](#).

Если рассматривать более узкий диапазон длин волн (1520–1560 нм), то для волокон со смещенной и с ненулевой смещенной дисперсией типов G.653 и G.655 корректирующий фактор практически не зависит от длины волны.

Таблица 8.6

**Значения корректирующего фактора  $k$**

| Тип волокна<br>(Рек. МСЭ-Т) | Корректирующий фактор |             |
|-----------------------------|-----------------------|-------------|
|                             | Длина волны, нм       |             |
|                             | 1310                  | 1550        |
| G.652                       | 0,970–0,980           | 0,955–0,965 |
| G.653                       | 0,0940–0,950          | 0,945–0,960 |
| G.654                       | –                     | 0,975–0,985 |

**Коэффициент нелинейности.** При высокой интенсивности поля показатель преломления  $n$  материала сердцевины ОВ становится зависимым от интенсивности излучения и выражается как

$$n = n_0 + n_2 + I = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{\text{эфф}}}, \quad (8.8)$$

где  $n_0$  – линейная часть показателя преломления;  $n_2$  – нелинейная часть показателя преломления;  $I$  – интенсивность светового потока;  $P$  – мощность излучения.

Нелинейная часть показателя преломления  $n_2$  характеризует только свойства стекла ОВ. Методы непосредственного измерения этой величины в оптическом волокне еще недостаточно разработаны. Стекло сердцевинны оптического волокна в поперечном сечении неоднородно по составу и физическим характеристикам, и в общем случае нелинейный показатель преломления должен быть различным в разных областях сердцевинны.

Коэффициент нелинейности  $n_2/A_{\text{эфф}}$  является наиболее полной характеристикой нелинейных свойств оптических волокон и используется для инженерных расчетов при рассмотрении системных ограничений. Однако требования к численным значениям коэффициента нелинейности и нелинейного показателя преломления  $n_2$  еще не сформулированы.

#### 8.4.3.4. Геометрические характеристики

Исключительно важными для строительства и эксплуатации волоконно-оптических линий передачи являются геометрические характеристики ОВ – один из основных показателей его качества, стабильности параметров по длине ОВ и, следовательно, совершенства технологии его изготовления.

Геометрические параметры считаются основным фактором, определяющим уровень оптических потерь при сварке волокон и количество успешных сварок, что существенно сказывается на уровне затрат на строительство линий связи. Жесткие допуски на геометрические параметры ОВ упрощают и ускоряют сварку волокон, снижают потребность в испытаниях, обеспечивая получение высококачественного сварного соединения ОВ. Так, например, несоблюдение допусков на диаметр оболочки ОВ существенно затрудняет заделку такого волокна в оптические разъемы, особенно в полевых условиях, а несоблюдение допусков на неконцентричность сердцевинны относительно оболочки приводит к возрастанию (иногда неприемлемому) потерь в сварных соединениях. Значительный собственный изгиб волокна (малый радиус кривизны) при одновременной сварке нескольких волокон может привести к большим отклонениям геометрических параметров и, как следствие, к большим приростам затухания в местах сварки. При этом необходимо, чтобы контроль геометрических параметров осуществлялся в процессе производства волокна в каждом метре его строительной длины, а не по общему распределению параметра после изготовления ОВ.

Значения геометрических параметров одномодовых волокон, достигнутые к настоящему времени ведущими мировыми фирмами (Corning Inc., OFS, Sumitomo и др.), приведены в [табл. 8.7](#).



Таблица 8.7

**Геометрические характеристики одномодовых волокон**

| Параметр                               | Единица измерения | Значение   |
|----------------------------------------|-------------------|------------|
| Диаметр оболочки                       | мкм               | $\pm 0,7$  |
| Некруглость оболочки                   | %                 | $\leq 1$   |
| Погрешность concentричности сердцевины | мкм               | $\leq 0,4$ |
| Допуск на диаметр покрытия             | мкм               | $\pm 5$    |
| Погрешность concentричности покрытия   | мкм               | $\leq 12$  |
| Радиус собственной кривизны            | м                 | $\leq 4,0$ |

В спецификации фирмы-изготовителя должен быть отражен комплекс параметров, характеризующих геометрию оптического волокна:

- диаметр оболочки волокна;
- допуск на диаметр оболочки волокна;
- диаметр сердцевины волокна;
- допуск на диаметр сердцевины;
- некруглость оболочки (разница между максимальным и минимальным диаметрами, деленная на среднее значение диаметра);
- погрешность concentричности сердцевины относительно оболочки (расстояние между центрами сердцевины и оболочки волокна);
- диаметр покрытия;
- погрешность concentричности покрытия относительно оболочки (расстояние между центрами покрытия и оболочки волокна);
- радиус собственной кривизны;
- строительная длина.

#### 8.4.4. Материалы для изготовления ОВ и ОК

##### 8.4.4.1. Материалы для изготовления ОВ

Оптическое волокно должно изготавливаться, по крайней мере, из двух материалов, различающихся показателем преломления. В мировой практике

нашли применение следующие виды ОВ, отличающиеся материалами, из которых они изготовлены.

*Полимерные оптические волокна (ПОВ)* изготавливаются на основе целого ряда полимерных материалов, из которых наиболее распространены полиметилметакрилат (сердцевина) и фторполимеры (оболочка).

Лидером в исследованиях ПОВ является Япония, где этими вопросами занимаются не менее 30 лет, однако только в последние годы появились сообщения о получении образцов длиной 50–100 м с затуханием менее 50 дБ/км в области длин волн 850–1300 нм. В 2001 г. было достигнуто затухание ~ 15 дБ/км с использованием нового химического процесса и создана экспериментальная локальная система связи в г. Кейо (Япония). Производители ПОВ декларируют его низкую стоимость и легкость монтажа в будущем, однако остальные характеристики, соответствующие требованиям техники связи, пока не реализованы.

Перспективная область применения ПОВ – линии длиной 10–100 м с большим количеством подключений при отсутствии высоких требований к надежности и емкости сетей, в том числе локальные сети, сети доступа, датчики в автомобилях и военная техника (бортовые линии связи).

*Кварц-полимерные оптические волокна* имеют сердцевину из кварцевого стекла и оболочку из полимерных материалов (кремнийорганические компаунды, тефлоны). Коэффициент затухания 5–8 дБ/км на длине волны 850 нм. Преимуществом этих ОВ является сердцевина большого диаметра (200–1000 мкм), высокая механическая прочность, малая чувствительность к изгибам и повышенная стойкость к ионизирующим излучениям. Область применения – линии длиной несколько сотен метров.

*Волокна из многокомпонентных силикатных стекол* разрабатывались для первых поколений линий связи, их достоинством являлась возможность получения высокой числовой апертуры (до 0,6). Однако эти волокна не нашли применения в технике связи из-за невозможности получения высокого уровня параметров, в том числе коэффициента затухания, при промышленном производстве.

*Волокна, прозрачные в среднем инфракрасном диапазоне.* Теоретические исследования показали, что существуют стеклообразные и кристаллические материалы, позволяющие создавать оптические волокна в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне (2–11 мкм) с ультранизкими потерями (101–105 дБ/км).

Материалы для ОВ среднего ИК-диапазона можно разделить на три группы:

- галогениды (стеклообразные и кристаллические);
- халькогениды;
- оксиды тяжелых металлов.

Несмотря на интенсивные исследования, развернутые в 1980-е годы в этом направлении, практически значимых результатов в разработке оптических волокон, прозрачных в среднем ИК-диапазоне, до настоящего времени не достигнуто. Это связано с крайне сложными проблемами создания технологии получения таких волокон.

*Кварцевые оптические волокна* имеют сердцевину из кварцевого стекла, легированного малыми добавками стеклообразующих компонентов (оксидов германия, фосфора, фтора) для изменения показателя преломления, и оболочку из кварцевого стекла.

Благодаря уникальному комплексу свойств, таких как прозрачность в ближней ИК-области спектра, высокая механическая прочность, вязкостные характеристики, обеспечивающие хорошую формуемость стекла, высокая химическая стойкость и стабильность характеристик, кварцевое стекло является наиболее широко применяемой средой передачи современных сетей связи. Именно на основе кварцевого стекла была создана высокопроизводительная, широкомасштабная и экономически выгодная промышленная технология производства оптического волокна с комплексом свойств, полностью отвечающих требованиям техники связи.

Оценка предельно достижимой скорости передачи по кварцевому оптическому волокну (10–30 Тбит/с) и сравнение ее с имеющимися место в настоящее время скоростями передачи показывает, что полоса пропускания ОВ действующих линий используется менее чем на 1 %.

*Защитные полимерные покрытия кварцевых ОВ.* Несмотря на то что предел прочности массивного кварцевого стекла очень высок ( $\sim 20$  ГПа), волокно, имеющее развитую поверхность по отношению к малому объему стекла, крайне чувствительно к поверхностным дефектам (микротрещинам, пылинкам), которые резко снижают его прочность, особенно в присутствии влаги и под действием высоких температур и напряжений. Для сохранения механической прочности и защиты поверхности ОВ от внешних воздействий используют полимерные покрытия, которые, как правило, имеют двухслойную структуру. При этом причиной роста оптических потерь в ОВ являются микроизгибы, возникающие при каблировании ОВ или изменениях температуры как следствие напряжений в конструкции «ОВ – покрытия – кабельные компоненты».

Материалом современных покрытий ОВ являются уретанакрилаты двух типов, отверждаемые под действием ультрафиолетового излучения. Первый тип имеет модуль упругости  $\sim 0,7$  МПа, образует мягкий внутренний слой поверх кварцевой оболочки ОВ, защищающий ОВ от внешних сжимающих усилий. Второй тип имеет модуль упругости почти на три порядка выше, образует твердый наружный слой, который обеспечивает прочность ОВ, его стойкость к абразивным воздействиям и влагозащиту.

Основными требованиями к защитным покрытиям ОВ являются стабильность характеристик в интервале рабочих температур и отсутствие химического взаимодействия с материалами кабеля (например, с гидрофобным наполнителем и др.). Кроме того, покрытие должно обеспечивать стабильную адгезию к ОВ в течение всего срока службы и в то же время легко удаляться механически, с помощью стриппера (инструмент для удаления изоляции и разделки ОК). Обычно усилие стягивания покрытий составляет 1,3–8,9.

#### 8.4.4.2. Материалы для изготовления ОК

При изготовлении ОК помимо ОВ используются следующие основные материалы:

- краски («чернила») для окраски ОВ;
- наполнители (гидрофобные компаунды, порошки, водоблокирующие нити и ленты) для защиты ОК от распространения влаги;
- полибутилентерефталат, поликарбонат, полиамид для изготовления оптических модулей;
- полиэтилентерефталатные ленты для скрепления элементов сердечника ОК;
- полиэтиленовые композиции для изготовления корделей;
- стеклопластиковые стержни, армидные нити, стальная проволока для силовых элементов;
- алюминиевая и стальная лента для изготовления комбинированных оболочек ОК;
- полиэтиленовые композиции, поливинилхлоридные пластикаты, полиуретаны, полиамиды для изготовления наружных оболочек ОК.

Характеристики основных материалов, используемых при изготовлении ОК, приведены в [табл. 8.8](#).

В качестве материалов для изготовления оптических модулей используются в основном полибутилентерефталат, поликарбонат и полиамид, имеющие механические характеристики, обеспечивающие защиту ОВ, размещаемого внутри оптических модулей, от внешних воздействий.

*Кордели* (конструктивные элементы заполнения сердечника ОК повивной скрутки, используемые в качестве элементов заполнения сердечника) изготавливаются из полиэтиленовых композиций в виде сплошных стержней диаметром, аналогичным диаметру оптических модулей. В ряде случаев вместо корделей используют оптические модули с гидрофобным наполнителем, не содержащие ОВ.

Таблица 8.8

**Характеристики материалов, используемых для изготовления ОК**

| Материал              | Модуль Юнга,<br>Н/мм <sup>2</sup> | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Коэффициент термического<br>расширения, 1/К |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Кварцевое стекло      | 72500                             | 2,20                            | $5,5 \cdot 10^{-7}$                         |
| Полибутилентерефталат | 1600                              | 1,31                            | $1,5 \cdot 10^{-4}$                         |
| Полиамид              | 1700                              | 1,06                            | $7,8 \cdot 10^{-5}$                         |
| Поликарбонат          | 2300                              | 1,20                            | $6,5 \cdot 10^{-5}$                         |
| Армидное волокно      | 100000                            | 1,45                            | $-2 \cdot 10^{-6}$                          |
| Стеклопластик         | 5000                              | 2,1                             | $6,6 \cdot 10^{-6}$                         |
| Сталь                 | 200000                            | 7,8                             | $1,3 \cdot 10^{-5}$                         |
| ПЭНП                  | 200–300                           | 0,92                            | $(1-2,5) \cdot 10^{-4}$                     |
| ПЭСП                  | 400–700                           | 0,93                            | $(1-2,5) \cdot 10^{-4}$                     |
| ПЭВП                  | 1000                              | 0,95                            | $(1-2,5) \cdot 10^{-4}$                     |
| ПВХ-пластик           | 60                                | 1,3                             | $1,5 \cdot 10^{-4}$                         |

При изготовлении ОК могут быть использованы равноценные материалы и изделия различных производителей, что предусматривается техническими условиями на производство конкретного типа ОК.

**8.4.4.3. Материалы для изготовления оболочек ОК**

Приведенные в [табл. 8.9](#) сравнительные характеристики полимерных материалов, используемых для изготовления ОК, основаны на усредненных данных материалов общего применения. Характеристики могут быть иными при применении специальных композиций полимеров.

*Полиэтилен*, широко используемый для изготовления оболочек ОК материал, получают в результате полимеризации этилена. В зависимости от способа полимеризации различают несколько видов полиэтиленов:

- ПЭНП – полиэтилен низкой плотности (в отечественной литературе преимущественно именуется «полиэтилен высокого давления») характеризуется высокими электрическими свойствами;
- ПЭВП – полиэтилен высокой плотности (в отечественной литературе преимущественно именуется «полиэтилен низкого давления»), полученный полимеризацией в присутствии металлоорганических катализаторов, характеризуется высокими механическими свойствами и худшими, по сравнению с ПЭНП, электрическими свойствами;
- ПЭСП – полиэтилен средней плотности обладает промежуточными характеристиками по сравнению с ПЭНП и ПЭВП.

Таблица 8.9

## Сравнительные характеристики полимерных материалов

| Характеристика                                                                   | Полимерные материалы |       |      |      |      |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------|------|------|------|
|                                                                                  | ПЭНП                 | ПЭВП  | ПВХ  | ПА   | ПУ   |
| Стойкость к окислению                                                            | +++                  | +++   | +++  | +++  | +++  |
| Стойкость к высоким температурам                                                 | ++                   | +++   | ++++ | +++  | ++   |
| Стойкость к нефтепродуктам                                                       | ++++                 | ++++  | +    | +++  | ++   |
| Гибкость при низких температурах                                                 | +++                  | +++   | -/+  | ++   | ++   |
| Стойкость к атмосферным воздействиям                                             | +++                  | +++   | ++++ | +++  | ++   |
| Стойкость к воздействию озона                                                    | +++                  | +++   | +++  | +++  | +++  |
| Абразивная стойкость                                                             | ++                   | +++   | +++  | ++++ | ++++ |
| Электрические характеристики                                                     | +++                  | +++   | +++  | –    | –    |
| Стойкость к горению                                                              | –                    | –     | +++  | –    | –    |
| Стойкость к воздействию радиации                                                 | ++++                 | ++++  | +    | +++  | ++   |
| Водопоглощение                                                                   | +++                  | +++   | +++  | -/+  | -/+  |
| Стойкость к воздействию кислот                                                   | ++++                 | +++   | ++++ | -/+  | +    |
| Стойкость к воздействию щелочей                                                  | ++++                 | +++   | ++++ | +++  | +    |
| Стойкость к воздействию бензина, керосина и других алифатических гидрокарбонатов | +++++                | +++++ | –    | ++   | -/+  |
| Стойкость к воздействию растворителей                                            | ++                   | ++    | -/+  | +++  | -/+  |

Примечание. ПВХ – поливинилхлоридный пластикат; ПА – полиамид; ПУ – полиуретан; оценка свойств: «–» – низкая, «+» – средняя, «++» – хорошая, «+++» – высокая, «++++» – превосходная.

Для изготовления оболочек ОК применяют полиэтиленовые композиции, в которые вводят различные компоненты, способствующие повышению стойкости материала к старению, к солнечной радиации и др. В частности, повышение стойкости полиэтилена к солнечной радиации чаще всего обеспечивается введением газовой сажи в объеме около 3 %, в связи с чем наружные полиэтиленовые оболочки ОК имеют преимущественно черный цвет.

Одним из недостатков полиэтилена является его горючесть, поэтому ОК с полиэтиленовыми оболочками используются только для наружной прокладки. Применять их для кабелей, прокладываемых внутри зданий, в коллекторах и туннелях, нельзя по соображениям пожаробезопасности. Разрывная прочность полиэтилена составляет 10–12 МПа, относительное удлинение при разрыве 400–500 %, температура плавления 110–130 °С.

Полиэтиленовые композиции, обладающие стойкостью к распространению горения, получают преимущественно за счет введения в них достаточно большого объема (до 50 %) тригидрооксида алюминия  $Al(OH)_3$ . При воздействии температуры свыше 200 °С тригидрооксид алюминия разлагается на негорючую окись алюминия  $Al_2O_3$  и воду (в виде водяных паров), благодаря чему температура падает, а концентрация горючих паров и кислорода уменьшается. Оптические кабели с такими оболочками относятся к категории кабелей с оболочками, не распространяющими горение, и предназначены для прокладки в туннелях, коллекторах и внутри зданий.

Поливинилхлоридный пластикат применяется преимущественно для изготовления оболочек станционных ОК, так как обеспечивает нераспро-

странение горения и позволяет изготавливать оболочки ОК высокой гибкости. К недостаткам материала относится возможность миграции пластификаторов в другие элементы конструкции, выделение, при воздействии пламени, дыма и хлора с последующим образованием удушающих газов и паров соляной кислоты из-за взаимодействия выделяющегося при горении хлора с влагой воздуха. Как правило, рабочий диапазон температур ОК с оболочками из ПВХ-пластиката составляет от минус 10 до 70 °С. При более низких температурах жесткость материала резко увеличивается, при более высоких также происходит увеличение жесткости за счет улетучивания пластификаторов из материала.

Таблица 8.10

**Назначение полиэтиленов**

| Назначение                                                                                         | ГОСТ,<br>фирма-изготовитель | Марка<br>полиэтилена          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Для оболочек ОК                                                                                    | ГОСТ 16336-77               | 102-10К<br>153-10К<br>178-10К |
| Для оболочек внутриобъектовых ОК                                                                   | Фирма Borealis              | HE6067<br>HE6062<br>ME6052    |
| Для изоляции жил                                                                                   | То же                       | FR4810                        |
| Для оболочек диэлектрических ОК, подвешенных на опорах ЛЭП (композиции, стойкие к электрокоррозии) | То же                       | ME6080<br>ME6081              |

Таблица 8.11

**Основные технические характеристики полиэтиленов по ГОСТ 16336**

| Параметр                                 | Единица<br>измерения | Марка полиэтилена |           |           |
|------------------------------------------|----------------------|-------------------|-----------|-----------|
|                                          |                      | 102-10К           | 153-10К   | 178-10К   |
| Плотность                                | г/см <sup>3</sup>    | Не нормируется    |           |           |
| Показатель текучести расплава            | г/10 мин             | 0,24–36           | 0,21–0,39 | 1,05–1,95 |
| Предел текучести при растяжении          | МПа                  | ≥ 11,3            | ≥ 11,3    | ≥ 9,3     |
| Предел прочности                         | МПа                  | ≥ 14,7            | ≥ 13,7    | ≥ 11,7    |
| Относительное удлинение при разрыве      | %                    | ≥ 600             | ≥ 600     | ≥ 600     |
| Стойкость к растрескиванию               | ч                    | ≥ 500             | ≥ 500     | ≥ 2,5     |
| Стойкость к термоокислительному старению | ч                    | ≥ 8               | ≥ 8       | ≥ 8       |
| Стойкость к фотоокислительному старению  | ч                    | 500               | 500       | 500       |

Таблица 8.12

**Основные технические характеристики полиэтиленов фирмы Borealis**

| Параметр                            | Единица измерения | HE6067           | HE6062           | HE6052           | FR4810             | ME6080 | ME6081 |
|-------------------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|--------|--------|
| Плотность                           | г/см <sup>3</sup> | 0,954            | 0,954            | 0,944            | 1,270              | 1,100  | 1,100  |
| Показатель текучести расплава       | г/10 мин          | 1,7              | 0,5              | 0,7              | 0,1                | 0,2    | 0,4    |
| Предел прочности                    | МПа               | 20               | 25               | 25               | 200                | 20     | 200    |
| Относительное удлинение при разрыве | %                 | 800              | 700              | 700              | 500                | 400    | 500    |
| Стойкость к растрескиванию          | ч                 | 1000             | 2000             | 2000             | 1000               | 1000   | 2000   |
| Температура хрупкости               | °С                | –76              | –76              | –76              | –35                | –50    | –80    |
| Модуль упругости на изгиб           | МПа               | 850              | 850              | 600              | –                  | 850    | –      |
| Удельное объемное сопротивление     | Ом·см             | 10 <sup>16</sup> | 10 <sup>16</sup> | 10 <sup>16</sup> | 5·10 <sup>16</sup> | –      | –      |

*Полиамид* (торговые названия – капрон, нейлон) применяют как дополнительное покрытие наружной оболочки ОК с целью повышения стойкости к абразивному воздействию, к химическим веществам, а также к воздействию грызунов и термитов. Оболочки из полиамида остаются гибкими при температурах от минус 40 до 90 °С, размягчение их происходит при температуре свыше 150 °С.

*Полиуретаны* – наиболее дорогостоящие полимеры, поэтому они редко применяются при изготовлении оболочек ОК. Они характеризуются превосходными механическими характеристиками (разрывная прочность 30–55 МПа, относительное удлинение при разрыве 400–700 %), высокой абразивной стойкостью, высокой гибкостью, стойкостью к химическим материалам, к окислению. Основная область применения – военно-полевые кабели и кабели для подвижных соединений машин и механизмов.

Характеристики некоторых полиэтиленовых композиций, используемых в конструкциях ОК связи, приведены в [табл. 8.10](#), [табл. 8.11](#), [табл. 8.12](#).



## Контрольные вопросы

1. Какие качества ВОЛС являются основными?
2. Классификация оптических кабелей.
3. Перечислите основные конструктивные элементы ОК.
4. Какие типы ОМ вы знаете? Приведите примеры конструкций ОМ.
5. Перечислите основные конструктивные элементы оптического кабеля.
6. Какой должна быть оболочка ОК?
7. Из каких материалов изготавливаются ОВ и чем они отличаются между собой?
8. Как по структуре отличаются многомодовые и одномодовые волокна?
9. Одномодовое волокно.
10. Многомодовое волокно.
11. Дисперсия оптического волокна.
12. Нелинейные характеристики.
13. Геометрические характеристики.
14. Какие материалы используются при изготовлении ОК?

## 9. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

[9.1. Определение понятия «надежность ЭС».](#)

[9.2. Показатели надежности ЭС.](#)

[9.3. Пути обеспечения надежности ЭС.](#)

[9.4. Методы резервирования.](#)

[Контрольные вопросы.](#)

Л и т е р а т у р а: [1, 10, 19, 37, 40, 41].

### 9.1. Определение понятия «надежность ЭС»

Современные ЭС отличаются повышенными показателями надежности. Однако создание таких ЭС требует применения современных технологий проектирования, и в первую очередь технологии надежного проектирования ЭС.

В соответствии с ГОСТ 27.002.83 **надежность – это свойство ЭС выполнять заданные функции в течение заданного времени при заданном воздействии внешних факторов.**

### 9.2. Показатели надежности ЭС

Показатели надежности характеризуют свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости ЭС. Номенклатура группы показателей надежности приведена в ГОСТ 27.002.83 – «Надежность в технике. Термины и определения».

*Показатели безотказности* характеризуют свойства ЭС сохранять работоспособность в течение заданного времени или заданной наработки.

*Показатели долговечности* характеризуют свойства ЭС сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технологического обслуживания и ремонтов.

*Показатели ремонтпригодности* характеризуют свойства ЭС, заключающиеся в ее приспособленности к обнаружению причин нарушения работоспособности и их устранению (т. е. восстановлению) путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

*Показатели сохраняемости* характеризуют свойства ЭС сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после хранения и транспортирования.

Анализ отказов современных ЭС 4-го и 5-го поколений показывает, что значительная часть их отказов обусловлена деградационными процессами, т. е. вполне определенными физическими, механическими, механофизичес-

кими, химическими и другими процессами, протекающими в тех или иных компонентах ЭС и вызывающих отказ.

### 9.3. Пути обеспечения надежности ЭС

К основным деградационным процессам, протекающим в ЭС относят: механическое разрушение, интерметаллизацию, электромиграцию, электротепловой пробой, плавление, старение.

**Механическое разрушение.** Большая доля отказов ЭС происходит из-за нарушения электрической цепи вследствие механических разрушений: обрыв проводника, нарушение целостности металлизации. Механизм разрушения, а также долговечность материала определяются постепенным накоплением локальных дефектов: вакансий, дислокаций, пластических деформаций и микротрещин в материале.

**Интерметаллизация.** Часто нарушения контактов разнородных металлов происходит в результате образования интерметаллических соединений или фазовых превращений в зоне контакта. В процессе работы ЭС, в результате необратимых изменений, увеличивается электрическое сопротивление, а также возможен обрыв сварных соединений.

**Электромиграция.** В результате прохождения постоянного тока повышенной плотности через проводник происходит перенос массы металла. Электромиграция может привести к нарушению целостности металлизации, образованию «бугорков», приводящих к пробое защитных пленок и короткому замыканию многоуровневой металлизации.

**Электротепловой пробой.** Основным механизмом короткого замыкания в диодных и транзисторных структурах является электротепловой пробой. Локальный разогрев за счет концентрации тока и рассеиваемой энергии в некоторой области полупроводниковой структуры, увеличение градиентов электрического потенциала и температуры во время работы полупроводникового прибора обусловлены дефектами металлизации, плохим соединением кристалла с корпусом и случайными перегрузками. Коррозия приводит к необратимым разрушениям твердых тел, вызываемым физико-химическим взаимодействием с внешней средой, сопровождаемым окислительными и восстановительными реакциями на границах раздела «материал – среда».

**Плавление.** При значительном уменьшении сечения токоведущих проводников и большом токе возможно их плавление.

**Старение материалов** – изменение физико-химических и механических свойств и структуры материалов при эксплуатации и длительном хранении.

Характерные недостатки разработки ЭС ([рис. 9.1](#)) связаны с тем, что при проектировании электрических схем не в полной мере учитываются свойства и особенности современной элементной базы, обладающей повышенными динамическими характеристиками, расширенным диапазоном рабочих частот, высоким быстродействием и высокими коэффициентами усиления при повышенной чувствительности к факторам, снижающим надежность изделий электронной техники (ИЭТ).

Кроме того, повторяющиеся нарушения технологического процесса монтажа ИЭТ на печатные платы приводят к превышению на них электрических, тепловых и механических воздействий, к другим нарушениям технологического процесса производства аппаратуры, в том числе дефектам многослойных печатных плат.

Для исключения внезапных отказов, связанных с возникновением коротких замыканий и электрических пробоев из-за выбросов напряжения на обмотках реле, в устройствах автоматики широко применяются шунтирующие диоды и стабилитроны. Вследствие этого повысилась вероятность возникновения параметрических отказов из-за изменения временных характеристик (времени срабатывания и отпускания) релейно-диодных схем, что приводит к отказам устройств автоматики и требует повышенного внимания.

С повышением плотности монтажа цифровых микроэлектронных устройств, снижением питающих напряжений интегральных схем (ИС) и применением многослойных печатных плат повышается вероятность возникновения отказов сбойного характера, что приводит к временной потере работоспособности и выдаче ложной информации. Поэтому необходимо обеспечение устойчивости цифровых устройств к возникновению внутренних помех, вызывающих отказы сбойного характера.

На [рис. 9.2](#) приведено распределение причин отказов ЭС, обусловленное вышеуказанными недостатками их разработки, производства и эксплуатации. Необходимо отметить, что в течение последних лет поток повторяющихся недостатков и нарушений при разработке и производстве аппаратуры не уменьшается и соотношение между причинами отказов ЭС, приведенное на [рис. 9.2](#), практически не меняется. Это свидетельствует о том, что головные предприятия по надежности, отраслевые центры анализа отказов и предприятия промышленности не уделяют должного внимания работам по предотвращению причин возникновения характерных повторяющихся отказов ЭС.

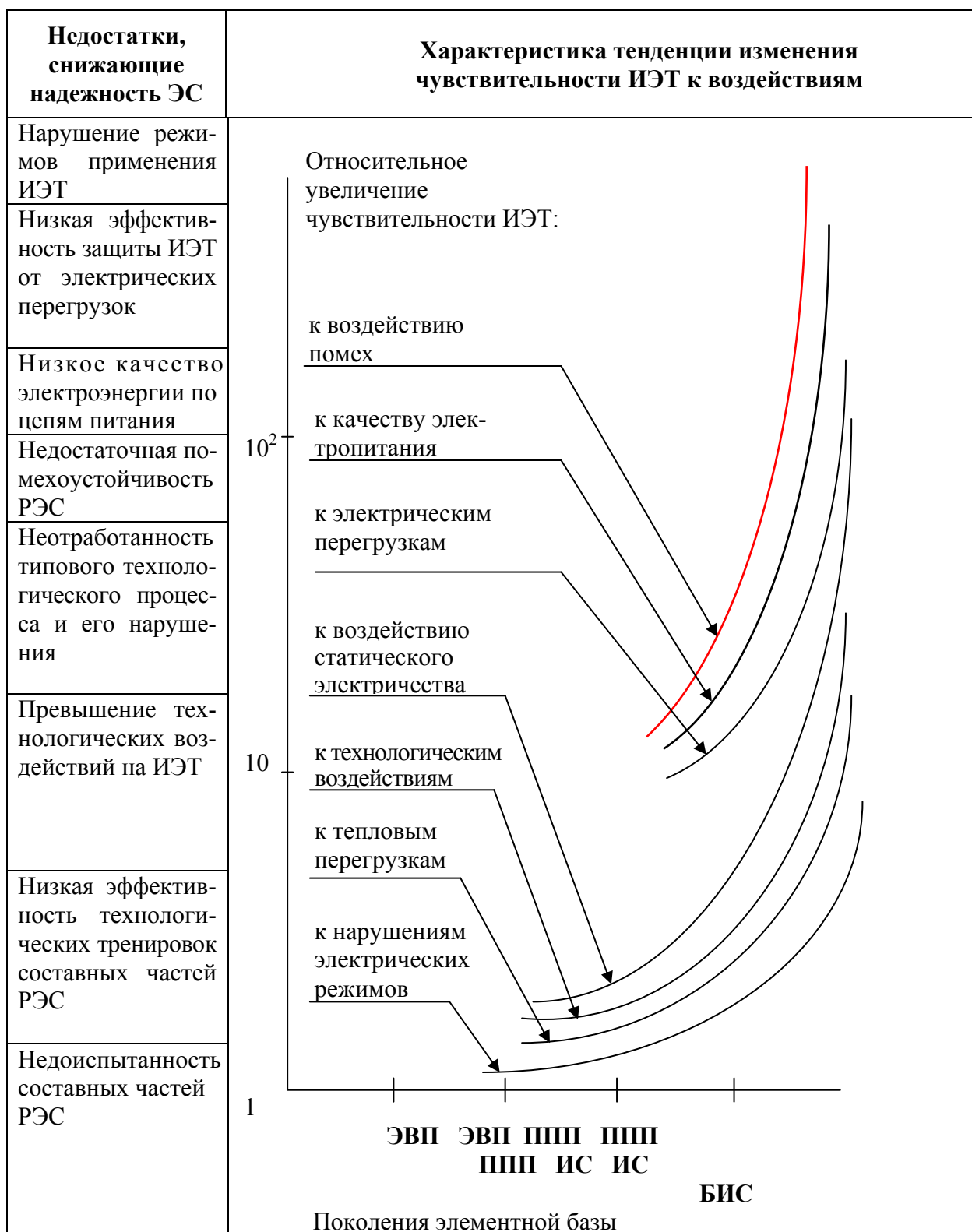


Рис. 9.1. Недостатки, снижающие надежность ЭС, и характеристика относительного увеличения чувствительности ИЭТ к воздействию факторов, снижающих их надежность

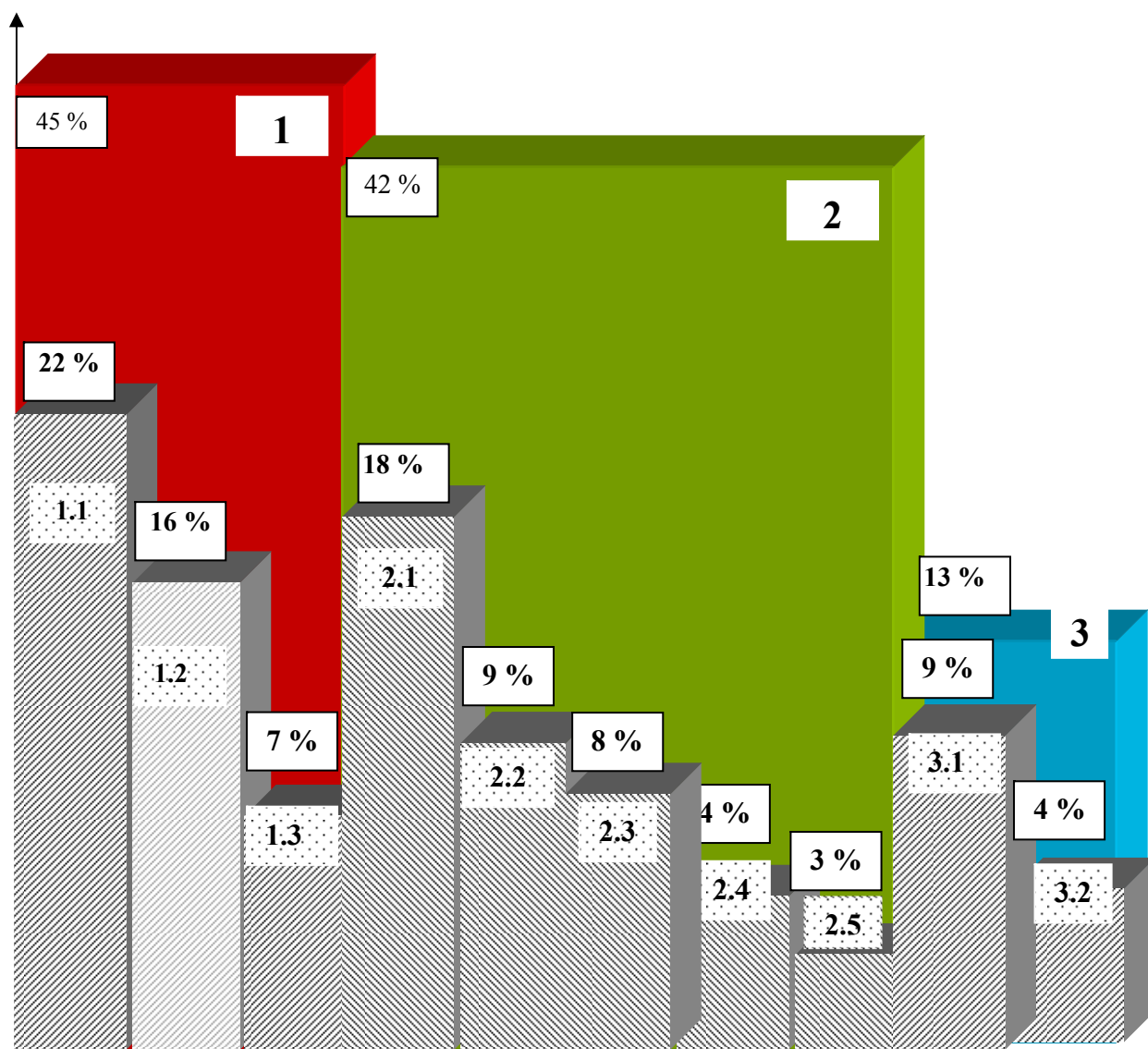


Рис. 9.2. Распределение отказов ЭС по причинам их возникновения: **1 – схемно-конструкционные отказы**: 1.1 – недостатки схемно-конструктивных решений; 1.2 – нарушение НТД по применению ИЭТ; 1.3 – недостатки отработки КД и ТД; **2 – производственно-технологические отказы**: 2.1 – нарушение техпроцесса монтажа ИЭТ; 2.2 – недостатки изготовления многослойных печатных плат; 2.3 – недостатки регулировки и настройки ЭС; 2.4 – недостатки КИА и технологического оборудования; 2.5 – внесение дефектов в ИЭТ на входном контроле; **3 – эксплуатационные отказы**: 3.1 – нарушение правил эксплуатации ЭС; 3.2 – несовершенство эксплуатационной документации

Характерные недостатки разработки аппаратуры, обуславливающие основную часть ее схемно-конструкционных отказов, состоят в следующем:

1. Недостаточные взаимоувязка и стыковка параметров функционально связанных между собой составных частей аппаратуры, и особенно параметров СВЧ-приборов и СВЧ-трактов, из-за неоптимально установленных на них норм и недостаточных конструктивно-технологических запасов.

2. Недостаточные объемы моделирования и макетирования принимаемых схемно-технических и конструкционных решений и низкий уровень их выполнения, что приводит к большому количеству доработок аппаратуры, необходимости многочисленных изменений конструкторской документации на всех стадиях жизненного цикла ЭС (разработки, изготовления, эксплуатации и утилизации).

3. Недостаточный объем отработки аппаратуры в комплексе в части стыковки и настройки приборов и блоков, выявления и устранения взаимовлияния различных типов аппаратуры на объекте установки.

4. Неэффективная защита входных цепей схем и ИЭТ от электрических перегрузок, возникающих в системах электроснабжения объектов установки из-за неучета требований основополагающих нормативно-технических документов (НТД) к качеству электропитания в ТЗ и ТУ на аппаратуру.

5. Нарушения электрических и тепловых режимов работы ИЭТ в аппаратуре, применение их в условиях, не предусмотренных ТУ на них, вследствие недостаточной глубины анализа электрических схем и конструкции ЭС при их разработке, использования при расчетах упрощенных моделей и методов, которые не позволяют учесть все необходимые особенности режимов и условий эксплуатации изделий в аппаратуре.

6. Пониженная помехоустойчивость блоков и устройств аппаратуры, а также возбуждение и генерация ряда узлов ЭС из-за неоптимальной разводки металлизации на печатных платах, использования навесных проводников, жгутов, неправильного выбора корректирующих цепей и цепей развязывающих фильтров.

7. Критичность схем узлов и блоков аппаратуры к изменению параметров ИЭТ в пределах норм ТУ на них, несогласованность параметров узлов и блоков между собой и с параметрами ИЭТ.

Таблица 9.1

**Основные пути обеспечения надежности ЭС**

| <b>Стадии ЖЦ ЭС</b> | <b>Мероприятия</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Разработка ТЗ       | Обоснование и выбор показателей надежности, установление уровня надежности (по всем свойствам надежности) с учетом модели эксплуатации аппаратуры                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Разработка          | Использование надежно-ориентированной САПР.<br>Обеспечение малой чувствительности изделий к изменению условий производства и воздействию внешних факторов.<br>Обеспечение производственных и эксплуатационных запасов изделий.<br>Проработка вопросов стыковки изделий с устройствами (узлами) ЭС.<br>Определение оптимальных условий и режимов применения изделий.<br>Экспериментальная оценка эффективности принятых конструктивных и технологических решений методами граничных и провоцирующих испытаний и средствами физико-технического анализа.<br>Выбор принципа действия, обеспечивающего простоту структуры.<br>Выбор рациональных форм избыточности и резервирования. |

| Стадии ЖЦЭС               | Мероприятия                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                           | <p>Использование модульных принципов конструирования и других прогрессивных методов.</p> <p>Применение высоконадежных ЭРИ.</p> <p>Облегчение режимов работы и условий применения ЭРИ.</p> <p>Применение схем, выходные параметры которых малочувствительны к изменениям параметров ЭРИ.</p> <p>Анализ проектных решений с помощью САПР для выявления нерациональных и потенциально ненадежных решений.</p> <p>Экспериментальный углубленный анализ режимов и условий работы ЭРИ с учетом возможных разбросов и уходов их параметров, изменений характеристик элементов конструкции.</p> <p>Анализ критичности возможных видов отказов и их последствий.</p> <p>Всесторонняя проверка схемных и конструктивных решений при испытаниях на надежность и других видах испытаний.</p> <p>Углубленный анализ выявленных причин отказов и корректировка схемных и конструктивных решений</p>                                                                                                                                                                                                   |
| Производство              | <p>Введение статконтроля и статистического регулирования технологического процесса.</p> <p>Привязка дефектов и отказов, обнаруженных на всех стадиях производства изделия, к партии.</p> <p>Повышение требований к гигиене производства.</p> <p>Введение аттестации технологического процесса по точности, настроенности и стабильности.</p> <p>Аттестация системы качества при заказе (потребителем).</p> <p>Применение провоцирующих испытаний с целью отбраковки изделий со скрытыми дефектами.</p> <p>Введение глубокого физико-технического анализа дефектных изделий.</p> <p>Аттестация процессов производства и сертификация систем качества.</p> <p>Диагностический входной контроль покупных ЭРИ, составных частей и материалов.</p> <p>Технологические и отбраковочные испытания составных частей и аппаратуры в целом.</p> <p>Проведение периодических испытаний на надежность, как правило, ускоренными методами.</p> <p>Анализ причин отказов, рекламационная работа с поставщиками и потребителями, корректировка конструкции, техпроцесса, системы контроля качества</p> |
| Приемка готовой продукции | <p>Введение гибкого приемочного контроля по качественным признакам.</p> <p>Повышение достоверности контроля за счет использования информации из сферы производства.</p> <p>Выбор режимов испытаний, ориентированных на выявление отказов.</p> <p>Введение испытаний на комплексное воздействие внешних факторов</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |



| Стадии ЖЦЭС  | Мероприятия                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Эксплуатация | Введение входного контроля с использованием электрофизических методов и электротермотренировки.<br>Обеспечение облегченных режимов работы.<br>Защита от недопустимых технологических воздействий, от воздействия внешних факторов и электроперегрузок.<br>Организация предремонтного и углубленного физико-технического анализа отказывающихся изделий.<br>Контроль за соблюдением требований нормативной документации при хранении, монтаже, вводе в строй и эксплуатации.<br>Организация подконтрольной эксплуатации с целью получения достоверных данных о наработке, отказах, проведение оперативных доработок, оценка достаточности запасных частей и др.<br>Оптимизация системы технического обслуживания и ремонта |

Методы обеспечения надежности ЭС направлены в основном на повышение качества их разработки, изготовления и исключение недопустимых внешних воздействий при их эксплуатации. Основные направления и пути решения этих задач перечислены в [табл. 9.1](#), где приведены основные элементы системы обеспечения надежности ЭС, включающие в себя комплекс организационно-технических мероприятий, выполняемых на всех стадиях ЖЦ аппаратуры, а также мероприятия, которые должны находиться в центре внимания служб надежности и контроля качества предприятий, специалистов маркетинговых служб предприятий-потребителей.

#### 9.4. Методы резервирования

Наиболее распространенным методом обеспечения надежности является **резервирование – применение некоторых дополнительных (избыточных по сравнению с минимально необходимыми для обеспечения работоспособности объекта) средств.**

Таковыми дополнительными средствами могут быть:

- резервные элементы, включаемые в структуру объекта;
- резервные возможности в выполнении элементом своих функций (например, использование коммутационного устройства, рассчитанного на коммутацию токов 100 А, для цепей с током 50 А);
- резерв времени, выделяемый для выполнения заданных функций (например, использование вычислительных средств, позволяющих решать поставленную задачу за время меньшее, чем допустимое по условиям его работы в составе системы управления);
- резерв информации, применяемый для восстановления полезной информации в случае ее искажения или потери при преобразовании и передаче.

Резервирование по виду используемых средств может быть *структурным, функциональным, временным, информационным.*

Рассмотрим структурные виды резервирования.

Структурное резервирование состоит в применении резервных элементов структуры объекта. Фактически включение резервных элементов в структуру объекта – своеобразная автоматизация процесса замены отказавшего элемента.

Из многочисленных способов структурного резервирования можно выделить:

- *общее резервирование*: резервируется весь объект в целом ([рис. 9.3, а](#));
- *раздельное резервирование*: резервируются отдельные элементы объекта ([рис. 9.3, б](#));
- *постоянное резервирование*: резервные элементы участвуют в функционировании объекта наравне с основными ([рис. 9.3, в](#));
- *динамическое резервирование*: резервные элементы подключаются в структуру объекта только при отказе основных ([рис. 9.3, г](#));
- *нагруженное резервирование*: резервный элемент находится в том же режиме работы, что и основной;
- *ненагруженное резервирование*: резервный элемент не несет нагрузки.

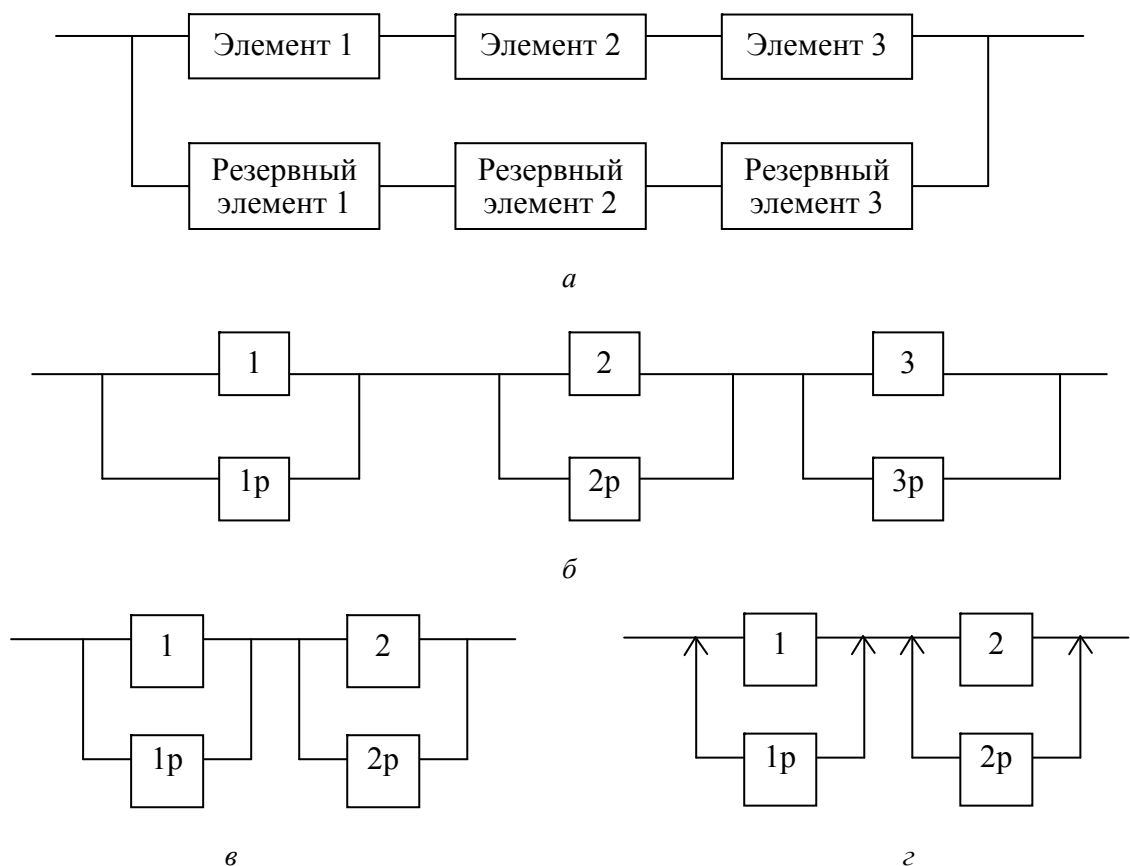


Рис. 9.3. Основные схемы резервирования

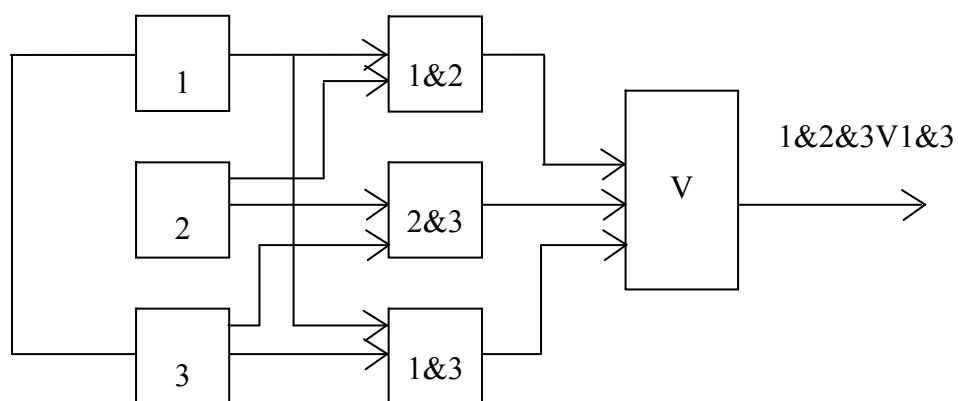


Рис. 9.4. Схема мажоритарного резервирования

Реализация схем динамического резервирования ([рис. 9.3, з](#)) может быть различной. Однако практически всегда необходимо устройство, осуществляющее подключение резервного элемента и отключение отказавшего элемента.

При резервировании устройств обработки информации используют так называемые мажоритарные формы резервирования. На [рис. 9.4](#) приведен пример простейшей из них – мажоритарное резервирование по принципу «два из трех», при котором результат работы резервированного объекта считается верным, если совпадают результаты работы не менее двух из трех содержащихся в объекте устройств.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «надежность ЭС».
2. Перечислите показатели надежности ЭС.
3. Критерии сохраняемости.
4. Что такое восстанавливаемость?
5. Что такое безотказность?

## **10. ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

[10.1. Характеристика вида защищенности ЭС.](#)

[10.2. Герметизация ЭС.](#)

[10.3. Классификация покрытий.](#)

[10.4. Лакокрасочные покрытия.](#)

[Контрольные вопросы.](#)

[Л и т е р а т у р а: \[1, 20, 24, 40, 41, 43, 44, 47\].](#)

### **10.1. Характеристика вида защищенности ЭС**

Для обеспечения надежности функционирования ЭС необходима влажно- и пылезащита. Основной защитой ЭС от влаги и пыли является герметизация.

В процессе производства, хранения и эксплуатации ЭС могут подвергаться воздействию влаги, содержащейся в окружающем пространстве, внутренней среде гермоблоков, материалах конструкций, а также в используемых при изготовлении ЭС материалах (электролитах, травителях, моющих средствах). На работающую аппаратуру воздействуют пары влаги окружающего воздуха или какой-либо иной газовой среды, в которой эксплуатируется аппаратура. Возможна конденсация водяных паров на холодных поверхностях конструкции как внутри аппаратуры, так и снаружи. Выпадение росы (конденсация) вызывается понижением температуры, которое практически всегда имеет место при отключении и последующем хранении аппаратуры.

При длительном воздействии высокой влажности металлические конструкции подвергаются коррозии, органические материалы – набуханию и гидролизу. Продуктом гидролиза являются органические кислоты, разрушающие органические материалы и вызывающие интенсивную коррозию металлических несущих конструкций.

Существенно влияние влажности на электрические соединения. При повышенной влажности корродируют проводники, на разъемных контактах появляются налеты, ухудшающие их качество, отказывают паяные соединения, особенно если они загрязнены. Слоистые диэлектрики, поглощая влагу, меняют свои параметры и характеристики. Образование на печатных платах водяной пленки приводит к снижению сопротивления изоляции диэлектриков, появлению токов утечки, электрическим пробоям, механическим разрушениям (поломкам, разрывам, заклиниванию) вследствие набухания-высыхания материала. Из-за поглощения влаги значительно уменьшается электрическая прочность, что особенно сказывается на работоспособности высоковольтных узлов, вызывая их возгорание.

Загрязненность воздуха пылью значительно снижает надежность ЭС. Пыль, попадая в смазочные материалы и прилипая к скользящим поверхностям деталей электромеханических узлов, приводит к ускоренному их износу.

Под воздействием пыли изменяются параметры и характеристики магнитных лент, дисков, магнитных головок, царапается и приходит в негодность магнитный слой. Пыль в зазорах контактов препятствует замыканию контактов реле. Оседающая на поверхности некоторых металлов пыль опасна ввиду своей гигроскопичности, поскольку уже при относительно небольшой влажности пыль существенно повышает скорость коррозии. Пыль, имеющая в своем составе электролит, поглощает влагу из воздуха, многократно усиливая коррозию. Пыль с поглощенными ею растворами кислот разрушает достаточно быстро даже очень стойкие краски.

Оседающая в изделии пыль препятствует естественному движению воздуха, снижает эффективность охлаждения изделия, образует на поверхностях ПП, не защищенных лаковым покрытием, токопроводящие перемычки между проводниками.

Применяются различные способы защиты ЭС от пыли и влаги, в зависимости от их назначения:

- полная герметизация изделий ЭС;
- частичная герметизация ЭС;
- создание избыточного давления (для защиты от влаги и пыли) и т. д.

Пыленепроницаемость ЭС или отдельных ее устройств может быть достигнута установкой их в герметичные корпуса. Однако при этом возрастает стоимость ЭС, ухудшается температурный режим работы. Если корпус ЭС выполнен с перфорациями, пыль вместе с охлаждающим воздухом проникает внутрь ЭС естественным путем либо, при принудительном воздушном охлаждении, вместе с воздушными потоками от вентиляторов. Таким образом, применение корпуса с вентиляционными отверстиями для охлаждающего воздуха приводит к проникновению пыли внутрь изделия. Уменьшить попадание пыли внутрь ЭС возможно установкой на вентиляционные отверстия мелкоячеистых сеток, созданием соответствующей чистоты воздуха внутри помещений, где эксплуатируется ЭС.

Влажность воздуха играет большую роль в борьбе с негативным влиянием воздействия пыли. С повышением относительной влажности выше 70 % пыль коагулирует, не поднимается слабыми движениями потоков воздуха и не прилипает на элементы конструкции. Поэтому рекомендуется регулярное влажное протирание полов в залах вычислительных центров, при этом моющие средства не должны выделять паров, которые могут вызывать коррозию металлов.

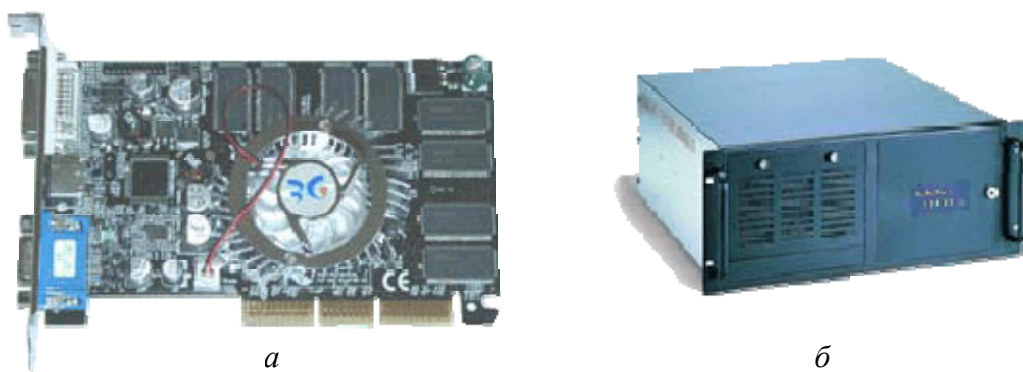


Рис. 10.1. Примеры применения вентиляторов в ЭС: *а* – видеокарта; *б* – корпус с вентиляционным отверстием и вентилятором

Для устранения проникновения загрязненного воздуха из других помещений в машинных залах вычислительных центров создается избыточное давление в 1–1,5 мм рт. ст. Используемые в помещениях строительные, отделочные, шумопоглощающие и изоляционные материалы не должны быть источником пыли. Для предотвращения попадания в помещения запыленного воздуха с улицы оконные проемы должны быть герметичными.

## 10.2. Герметизация ЭС

Герметизация узлов, блоков и шкафов ЭС является надежным средством защиты от воздействия влажности и вредных веществ окружающей среды, пыли, изменения барометрического давления. Хотя МС и ЭРЭ поставляются герметичными, часто в процессе эксплуатации ЭС влага все же проникает внутрь корпусов компонентов, изменяя свойства материалов, вызывая короткие замыкания.

Герметизация зависит от вида изделия, поэтому способы герметизации применяются разные для каждого вида изделия.

Модули первого уровня защищают *покрытием лаком, заливкой эпоксидной смолой, пропиткой, особенно точечных изделий, опрессовкой герметизирующими компаундами.*

*Компаундом* называется композиция на основе органических (смол, битумов, масел) или неорганических (алюмофосфатов, металлометафосфатов) веществ. Герметизация компаундами улучшает электроизоляционные и механические характеристики модуля. Однако низкая теплопроводность большинства компаундов ухудшает отвод теплоты, ограничивает или делает невозможным ремонт, внутренние напряжения могут нарушить целостность деталей и электрических соединений.

Полная герметизация блоков и шкафов путем *помещения в герметичный кожух* является самым эффективным способом защиты, но и самым дорогим. При этом возникает необходимость в разработке специальных корпусов, прокладок, способов герметизации внешних электрических соединителей, выходов жгутов, элементов управления и индикации. В условиях вакуума стенки герметизируемых изделий должны противостоять значитель-

ным усилиям из-за разницы давлений внутри и снаружи изделия. В результате увеличения жесткости конструкции возрастает ее масса и размеры. Применение полной герметизации может потребовать введения в конструкцию клапана-регулятора для снижения давления внутри корпуса.

Герметизация блоков, содержащих бескорпусные микросхемы и микросборки (МСБ), осуществляется с целью предотвращения воздействия внешних климатических факторов на бескорпусные компоненты, входящие в состав микросхем и МСБ.

Для создания наиболее благоприятного микроклимата внутри герметичного корпуса блока он через откачную трубку заполняется инертным газом или смесью газов с избыточным давлением не более  $12 \cdot 10^4$  Па. Как правило, для этого используют сухой азот, который по своим тепловым характеристикам приравнивается к воздуху.

Герметичность блоков обеспечивается герметизацией корпусов и внешних электрических соединителей, которые устанавливаются на лицевой или задней панели корпуса.

Герметизация корпусов блоков может осуществляться *сваркой основания и крышки корпуса блока* с помощью паяного демонтируемого соединения корпуса (основания) с крышкой (кожухом) блока и с помощью уплотнительной прокладки (рис. 10.5). Выбор способа герметизации определяется требованиями, предъявляемыми к блокам в зависимости от условий эксплуатации, габаритными размерами (объемом) блока, а также материалами корпуса и основания блока.

Герметизация сваркой применяется для блоков объемом не более  $0,5 \text{ дм}^3$ , не подлежащих ремонту. Вскрытие таких блоков возможно только путем механического снятия сварного шва. Это приводит к попаданию металлической пыли на бескорпусные компоненты и может вызвать их отказ. Этот способ широко используется для герметизации корпусов микросхем и МСБ и обеспечивает натекание не более  $1,33 \cdot 10^{-10} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па/с}$ .

Герметизация с помощью паяного демонтируемого соединения применяется для блоков, объем которых составляет  $0,5\text{--}5,0 \text{ дм}^3$ . Этот способ обеспечивает натекание  $5H = 1,33 \cdot 10^{-7} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па/с}$ , что гарантирует работоспособность блока в течение 12 лет.

Конструктивные элементы герметизации корпусов блоков паяным соединением приведены на рис. 10.2. К элементам паяного соединения конструкции блока предъявляются следующие требования: для устранения перегрева блока во время пайки между корпусом 1 и крышкой 2 вблизи паяного соединения вводится тепловая канавка 5. Прокладка 3 прямоугольного сечения изготавливается из термостойкой резины; размеры сечения прокладки определяются расчетным путем; диаметр проволоки 4 должен быть меньше ширины зазора между крышкой и корпусом на  $0,1\text{--}0,2 \text{ мм}$ .

В паяном соединении проволока над прокладкой укладывается по всему периметру соединения. Один конец проволоки через паз в крышке выводится из зоны соединения (обычно он укладывается в тепловую канавку). Расстояние по всему периметру соединения заполняется легкоплавким при-



поем, как правило, ПОС-61. Паяное соединение позволяет осуществлять демонтаж (вскрытие корпуса) блока до трех раз.

Для предотвращения нарушения герметичности блока наружная поверхность паяного соединения не должна являться установочной поверхностью блока и все элементы крепления блоков должны располагаться на максимально возможном расстоянии от паяного соединения.

Герметизация с помощью уплотнительных прокладок ([рис. 10.3](#)) применяется для блоков, объем которых превышает  $3 \text{ дм}^3$ , так как блоки меньших размеров герметизировать данным способом нецелесообразно из-за больших потерь на элементы крепления.

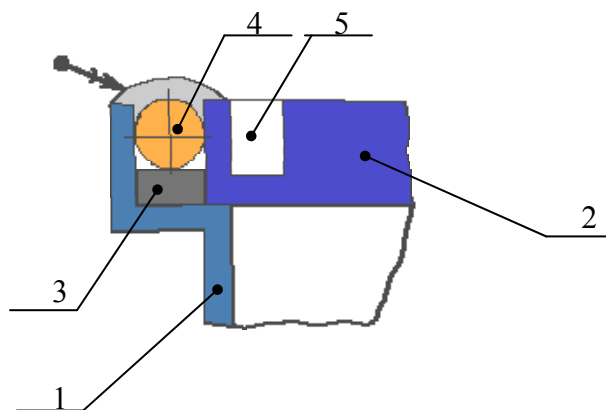


Рис. 10.2. Герметизация корпуса с помощью паяного соединения: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – прокладка; 4 – проволока; 5 – тепловая канавка

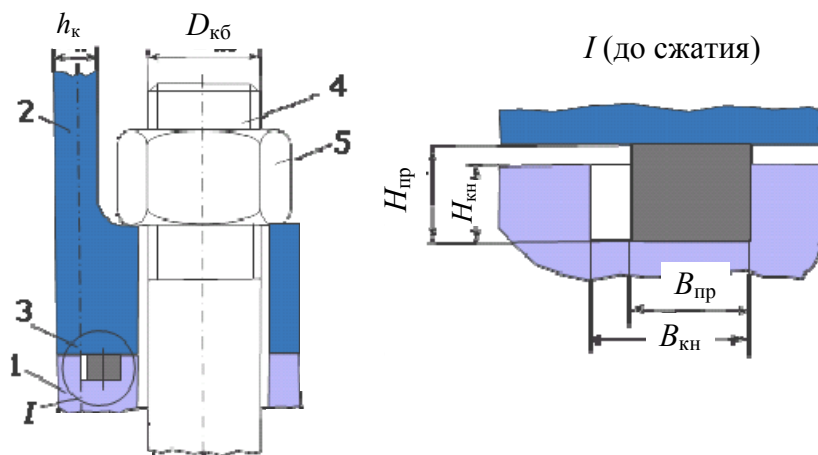


Рис. 10.3. Герметизация корпуса блоков с помощью уплотнительной прокладки: 1 – основание блока; 2 – корпус блока; 3 – уплотнительная прокладка; 4 – болт; 5 – гайка

Широко применяются *упругие уплотнительные прокладки*, устанавливаемые между крышкой и корпусом блока ([рис. 10.4](#)). При поджатии они уплотняют стык корпуса с крышкой. Утечка газа через уплотнение при сжатии прокладки на 25–30 % от ее первоначальной высоты происходит только за счет диффузии. Большие усилия при сжатии не рекомендуются, поскольку из-за интенсивного старения прокладка быстро выходит из строя. Форма по-



перечного сечения прокладки может быть различной. Прямоугольные прокладки просты в изготовлении, легки в использовании, способны обеспечить воздушную герметизацию габаритных изделий, но не защищают их от воздействий водяных паров. Давление между крышкой и корпусом получается низким, поскольку прокладка легко деформируется под воздействием стяжных винтов.

В качестве материала прокладок используют резину, обладающую высокой эластичностью, податливостью и способностью проникать в мельчайшие углубления и неровности. Большие крышки требуют высокой жесткости и большого числа стяжных винтов с мелкой резьбой и для надежной герметизации изготавливаются на токарных станках.

Размеры конструктивных элементов (см. [рис. 10.3](#)) выбираются в зависимости от герметизируемого объема и избыточного давления, создаваемого в нем.

Ширина фланца

$$B_{\phi} = 2h_{\kappa} + 2,6D_{\kappa.б},$$

где  $h_{\kappa}$  – толщина стенки корпуса (кожуха);  $D_{\kappa.б}$  – диаметр крепежного болта.

Высота фланца  $H_{\phi}$  должна быть максимально допустимой.

Материал болтов должен иметь предел текучести в 2 или 3 раза выше предела текучести материала фланца.

Размеры канавки и прокладки находятся в следующей зависимости:

$$B_{\kappa\kappa}H_{\kappa\kappa} \approx 1,15 B_{\text{пр}}H_{\text{пр}}, \quad (10.1)$$

где  $B_{\kappa\kappa}$  и  $H_{\kappa\kappa}$  – ширина и высота канавки;  $B_{\text{пр}}$  и  $H_{\text{пр}}$  – ширина и высота прокладки.

Длина плеча

$$L_{\text{пл}} = 1,5h_{\kappa} + 1,1D_{\kappa.б}. \quad (10.2)$$

Число болтов и шаг их установки определяются с учетом внутреннего избыточного давления в блоке и усилия, необходимого для деформации уплотнительного кольца для герметизации блока.

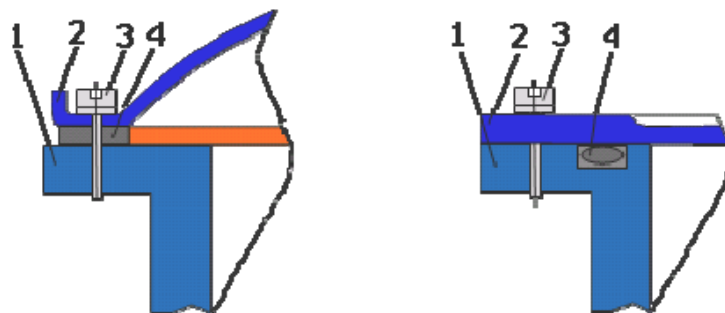


Рис. 10.4. Герметизация упругой (резиновой) прокладкой:  
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – винт; 4 – прокладка

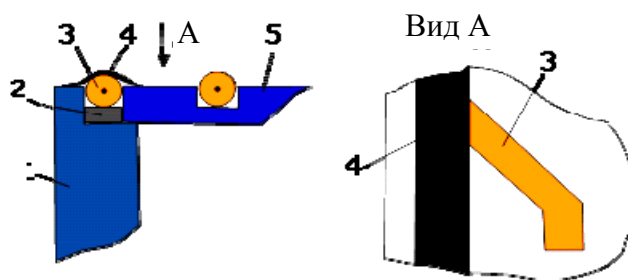


Рис. 10.5. Герметизация паяным швом и проволокой:  
1 – корпус; 2 – прокладки; 3 – проволока; 4 – припой; 5 – крышка

При эксплуатации аппаратуры в условиях сверхнизкого вакуума, больших давлений, высоких температур органические материалы применять запрещается, рекомендуется использовать металлы, керамику, стекло. При этом необходимо учитывать, что источниками влаги могут оказаться литые конструкции и конструкции, полученные экструзией, ввиду пористости их поверхности. В порах влага, грязь, жиры скапливаются и проникают в герметизируемые объемы. Чтобы этого не происходило, подобные конструкции в вакууме пропитывают эпоксидной смолой.

Если температура внутри герметизируемых изделий ниже температуры окружающей среды, то при высокой влажности внутри изделия влага будет конденсироваться, вызывая отказы. Вертикальной ориентацией плат и электрических соединителей обеспечиваются естественные пути отвода влаги в поддон изделия. Чтобы с конструкции легко скатывалась влага, поверхность ее должна быть гладкой. Избежать ловушек влаги, например, в углах несущих конструкций, где горизонтально ориентированные элементы конструкции сочленяются с вертикальными, можно выполнением отверстий диаметром 5–7 мм. Влага из поддона сливается либо испаряется.

Постоянства относительной влажности в определенных пределах внутри герметичного аппарата можно добиться введением внутрь изделия веществ, активно поглощающих влагу. Однако они впитывают влагу до определенного предела. Например, силикагель поглощает около 10 % влаги от своей сухой массы. При этом относительная влажность внутри аппаратуры не превышает 80 %.

В особых случаях в качестве материалов прокладок применяют медь и нержавеющую сталь с алюминиевым или индиевым покрытием. Такие прокладки чаще всего выполняются трубчатыми с внешним диаметром 2–3 мм при толщине стенок 0,1–0,15 мм. Усилие поджатия при герметизации металлическими прокладками составляет 20–30 кг на 1 см длины прокладки. Желобок в крышке и корпусе изделия в поперечном сечении должен быть в форме эллипса. При расчете герметизации определяется усилие поджатия прокладки, затем вычисляются усилия затягивания и количество стяжных винтов.

При герметизации внутренний объем герметизируемой аппаратуры заполняется инертным газом (аргоном или азотом) с небольшим избыточным давлением. Поскольку атмосфера земли в большинстве своем содержит азот, то при заполнении герметизируемого изделия сухим азотом свойства газа внутри изделия будут практически подобны свойствам воздуха. Закачка газа внутрь корпуса осуществляется через клапаны-трубки.

Входные и выходные клапаны-трубки следует размещать на противоположных сторонах корпуса. Продувка азотом обеспечивает очистку полости корпуса от водяных паров. На [рис. 10.6, а, б](#) представлены трубки-клапаны 1, которые сварным швом 3 привариваются к корпусу 2 или заливаются компаундом 4, затем защемляются. Защемленная часть трубки при разгерметизации изделия срезается и при необходимости повторно защемляется. Более удобна герметизация винтом 5 с острой кромкой, врезающейся при заворачивании в мягкий материал трубки-клапана 1 ([рис. 10.6, в](#)).

Элементы управления и индикации герметизируются резиновыми чехлами, мембранами, электрические соединители – установкой на прокладки ([рис. 10.7, а](#)), заливкой компаундами ([рис. 10.7, б](#)), выходы жгутов – резиновыми зажимными шайбами ([рис. 10.7, в](#)).

Выбор способа герметизации определяется условиями эксплуатации, применяемыми материалами и покрытиями, требованиями к электрическому монтажу.

Межблочная электрическая коммутация в герметичных блоках осуществляется с помощью герметичных соединителей типа РСГ или врубных соединителей типа РПС1 с обеспечением их герметизации. Однако номенклатура существующих электрических соединителей широкого применения не обеспечивает потребности разработчиков герметичной МЭА, поэтому они часто проектируют специальные электрические соединители с учетом типовых требований к металлостеклянным спаям.

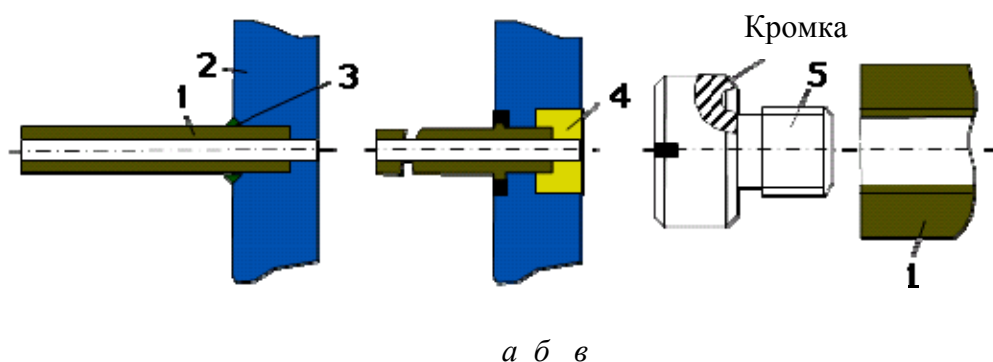


Рис. 10.6. Трубки-клапаны откачки воздуха: 1 – трубка-клапан; 2 – корпус; 3 – сварной шов; 4 – компаунд; 5 – винт

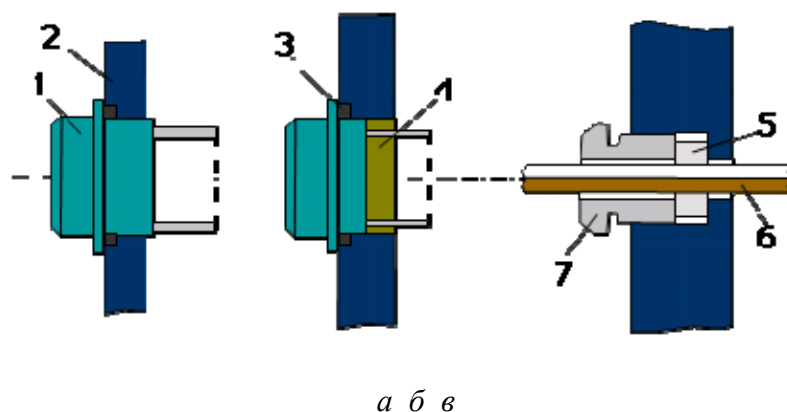


Рис. 10.7. Виды герметизации: а, б – соединителя; в – выхода жгута; 1 – соединитель; 2 – корпус; 3 – прокладка; 4 – компаунд; 5 – зажимная шайба; 6 – жгут; 7 – втулка

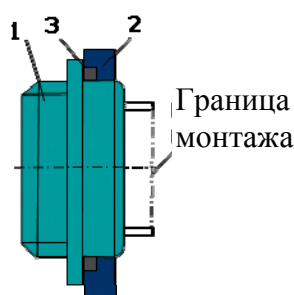


Рис. 10.8. Герметизация вилки соединителя РСГ с помощью уплотнительной прокладки: 1 – вилка разъема; 2 – корпус блока; 3 – уплотнительная прокладка

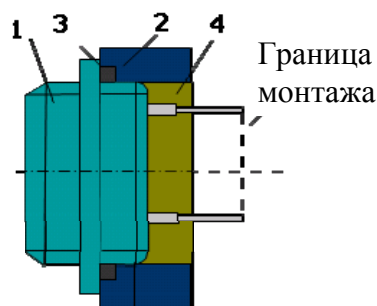


Рис. 10.9. Герметизация вилки разъема РСГ с помощью уплотнительной прокладки и компаунда: 1 – вилка разъема; 2 – корпус блока; 3 – уплотнительная прокладка; 4 – компаунд

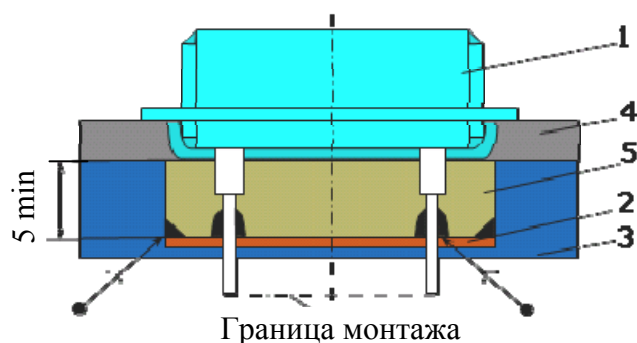


Рис. 10.10. Герметизация вилки разъема РСГ опайкой платы и заливкой компаундом: 1 – вилка разъема; 2 – монтажная плата; 3 – корпус блока; 4 – прокладка; 5 – компаунд

Способы герметизации электрических соединителей широкого применения в герметичных блоках иллюстрируют [рис. 10.8](#), [рис. 10.9](#), [рис.10.10](#).

Монтажная плата, используемая для герметизации, должна иметь металлизированную поверхность по всему периметру с двух сторон и по торцу.

При герметизации с использованием компаунда выводы электрических соединителей должны удлиняться путем припаивания жесткой проволоки.

Выбор способа герметизации электрических соединителей определяется требованиями, которые предъявляются к блокам в условиях эксплуатации, с учетом материалов и покрытий элементов конструкции корпусов блоков.

Герметизация и конструкции специальных электрических соединителей, герметизируемых с помощью металlostеклянных соединений, имеют ряд специфических особенностей, поэтому данный вопрос следует рассмотреть подробнее.

Металlostеклянные соединения, которые используются при проектировании микросхем, МСБ и герметичных блоков ЭС, можно подразделить на глазковые, дисковые, окошечные и плоские. *Глазковые соединения* применяются при изготовлении цоколей реле, оснований корпусов микросхем и МСБ, гермовводов, металлических ножек электровакуумных приборов, вилок штепсельных электрических соединителей и подобных изделий. *Дисковые соединения* применяются при изготовлении многоконтактных токовых вводов, вилок электрических соединителей, узлов электровакуумных приборов, оснований корпусов. *Окошечные соединения* применяются при изготовлении окон резонаторов, высокочастотных фильтров и смотровых окон приборов, необходимых для визуального контроля. *Плоские соединения* применяются при изготовлении оснований металlostеклянных корпусов микросхем и МСБ с прямоугольным сечением выводов.

Среди металlostеклянных соединений в зависимости от используемых материалов можно выделить согласованные и несогласованные (сжатые) спаи. Под согласованными спаями понимаются соединения, в которых коэффициенты температурного расширения (КТР) спаиваемых материалов (стекло – металл обоймы) равны или мало отличаются по значению. Под несогласованными спаями понимаются соединения, в которых КТР спаиваемых материалов (стекло – металл обоймы) резко отличаются в интервале температур от комнатной до температуры размягчения стекла. Поэтому при проектировании отдельных узлов ЭС необходимо большое внимание уделять выбору материалов и, соответственно, их взаимному сочетанию.

### 10.3. Классификация покрытий

При выборе материала для конструкции ЭС, наряду с такими факторами, как обрабатываемость, прочность и др., к числу наиболее значимых относится способность материала к нанесению на него покрытия.

В ряде случаев оказывается более выгодным не использовать специальные материалы, а применять покрытие, обеспечивающее соответствующее свойство. Кроме этого применение покрытий обязательно для большинства металлических (алюминий, сталь) и ряда неметаллических материалов.

В общем случае поверхность материала при нанесении покрытия может приобрести следующие свойства:

- повышенную твердость;
- повышенную износостойкость и устойчивость против трения;
- устойчивость против потускнения;
- кислотощелочестойкость;
- декоративность и внешнюю привлекательность;
- определенную отражательную способность;
- теплостойкость;
- повышенную долговечность;
- легкость полировки;
- лучшую способность к креплению;
- изменение электропроводности.

Взаимное соотношение свойств детали и покрытия представлено на [рис. 10.11](#).

|        |                                                                       |                                                  |          |
|--------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------|
| Деталь | Функциональное назначение                                             |                                                  | Покрытие |
|        | Условия эксплуатации                                                  |                                                  |          |
|        | Влияние последующих операций<br>(механическая, термическая обработка) |                                                  |          |
|        | Материал                                                              |                                                  |          |
|        | Состояние, структура,<br>способ изготовления                          | Физико-химические свойства                       |          |
|        | Габариты, форма                                                       | Характеристика покрываемости                     |          |
|        | Состояние поверхности,<br>шероховатость                               | Совместимость с материалом<br>сопрягаемой детали |          |
|        | Взаимное влияние детали и покрытия                                    |                                                  |          |
|        | Оборудование для покрытия                                             |                                                  |          |
|        | Экология                                                              |                                                  |          |
|        | Стоимость                                                             |                                                  |          |

Рис. 10.11. Взаимное соотношение свойств детали и покрытия

### Виды покрытий по назначению:

*защитные* предназначены для защиты основного материала от коррозии, старения, высыхания, гниения и других процессов, вызывающих выход аппаратуры из строя (Rz 40);

*защитно-декоративные* используются для защиты от вредного воздействия окружающей среды изделий, требующих красивой внешней отделки (Ra 2,5);

*специальные* придают поверхности детали особые свойства или защищают от влияния особых сред (Ra 1,25).

Даже в относительно несложных конструкциях ЭС используются различные материалы. Коррозия протекает более интенсивно при контактировании материалов с существенно различными электрохимическими потенциалами. Металл с отрицательным потенциалом гальванической пары будет разрушаться тем быстрее, чем больше разница их электрохимических потенциалов.

Таблица 10.1

### Электрохимические потенциалы металлов

| Металл   | Потенциал, мВ |              |
|----------|---------------|--------------|
|          | Пресная вода  | Морская вода |
| Серебро  | +194          | +149         |
| Медь     | +140          | +10          |
| Никель   | +118          | +46          |
| Алюминий | -169          | -667         |
| Олово    | -175          | -807         |
| Свинец   | -283          | -259         |
| Сталь    | -350          | -335         |
| Кадмий   | -574          | -519         |
| Цинк     | -823          | -284         |

Электрохимические потенциалы металлов в пресной и морской воде приведены в [табл. 10.1](#).

Если по тем или иным причинам невозможно заменить металлы с высокой разницей электрохимических потенциалов, то на них наносятся защитные покрытия.

**Виды защитных покрытий по материалу.** Различают следующие виды защитных покрытий:

- металлические;
- неметаллические неорганические;
- лакокрасочные.

*Металлические покрытия* образуют с основным материалом детали контактную пару. В зависимости от полярности потенциала различают покрытия анодные и катодные. Покрытия называют *анодными*, если электрохимический потенциал металла покрытия меньше электрохимического потенциала детали:  $\text{ЭХПп} < \text{ЭХПд}$ . *Катодные* покрытия имеют обратное соотношение:  $\text{ЭХПп} > \text{ЭХПд}$ .

При коррозии может разрушаться как основной металл детали, так и покрытие. Причиной разрушения является наличие в покрытиях пор, повреждений в виде сколов, царапин, трещин, возникающих в процессе эксплуатации. Разрушение будет тем интенсивнее, чем больше разница электрохимических потенциалов между основным металлом и покрытием. При анодном покрытии вследствие коррозии разрушается само покрытие, основной материал детали не подвергается разрушению. При катодном покрытии – наоборот.

В качестве материалов металлических покрытий наибольшее распространение получили *цинк, хром, никель, олово и серебро*. Толщина покрытия выбирается в зависимости от материала и способа нанесения покрытия. Для улучшения защитных и специальных (механические, улучшение способности к креплению и т. д.) свойств покрытий применяются многослойные покрытия из разных металлов.

*Неметаллические неорганические покрытия* – окисные пленки.

*Оксидирование* – получение окисной пленки на стали, меди и ее сплавах, алюминии и его сплавах. Такое покрытие имеет хороший внешний вид, антикоррозионные свойства, но непрочное и микропористо. Последнее свойство покрытия позволяет использовать его как грунт под окраску.

Окисные пленки могут быть получены химическим способом, анодированием и фосфатированием.

Полученное *химическим способом* покрытие менее прочно, чем покрытие металлическое. Образующаяся при этом защитная пленка химически пассивна, устойчива, имеет хороший декоративный вид. Толщина покрытия обычно составляет 1–15 мкм.

*Анодирование* – декоративное покрытие алюминия и его сплавов электрохимическим способом. Защитная пленка химически устойчива, обладает высокими электроизоляционными свойствами, надежно защищает от коррозии, пористо.



*Фосфатирование* – процесс образования на стали защитной пленки с высокими антикоррозионными и электроизоляционными свойствами, хорошей адгезией. Получаемое покрытие пористо и недостаточно прочно.

*Лакокрасочные покрытия* защищают детали от коррозии. Как недостаток следует отметить низкие механическую прочность и термостойкость таких покрытий. Этот вид покрытия применяется для окрашивания каркасов, кожухов, лицевых панелей приборов и т. п. Эстетичный внешний вид изделия обеспечивается многослойным окрашиванием. Толщина лакокрасочного покрытия колеблется от 20 до 200 мкм.

**Способы получения покрытий** (для металлических и неметаллических неорганических):

- гальванический;
- химический;
- анодизационный;
- горячий;
- диффузионный;
- напыление;
- металлизационный.

Гальванический способ нанесения покрытия, как наиболее распространенный, не указывается в КД.

К *преимуществам* процессов электрохимической металлизации (гальванический способ) по сравнению с химическими методами относятся большая скорость процесса (химическое меднение – 2–4 мкм/ч, гальваническое – 100–130 мкм/ч), более низкая себестоимость покрытия из-за пониженного расхода химикатов, значительно меньшие сбросы вредных веществ. При гальванической металлизации легче нанести покрытия с заданными свойствами, с нужными физико-механическими характеристиками.

К *недостаткам* гальванической металлизации по сравнению с химической относятся меньшая равномерность толщин покрытий, особенно на сложнопрофилированных деталях, необходимость установки в токопроводах.

**Виды покрытий по условиям эксплуатации.** Согласно ГОСТ 15150 имеется 8 групп покрытий в зависимости от климата и категории исполнения:

*группа 1:*

все исполнения категории 4.1, кроме У и Т;  
категории 4, 4.2 для УХЛ (ХЛ), ТС;  
категории 3, 3.1 для У, УХЛ (ХЛ), ТС;  
категория 2.1 для У, УХЛ (ХЛ);

*группа 2:*

категории 1.1, 2.3 для ТС;  
категория 2.1 для ТВ, Т, О;  
категории 3, 3.1 для ТВ, Т;  
категории 4, 4.2 для ТВ, О, М, ТМ, ОМ, В;

*группа 3:*

категории 1 для ТС;  
 категории 1, 1.1, 2.3 для У, УХЛ (ХЛ);  
*группа 4:*  
 категория 1.1 для ТВ, Т, О, М, ТМ, ОМ, В;  
*группа 5:*  
 категория 1 для У, УХЛ (ХЛ);  
 категории 1, 2 для ТВ, Т, О;  
 категория 3 для Т;  
*группа 6:*  
 категория 1, 2, 2.1, 3, 3.1 для М, ТМ, ОМ;  
*группа 7:*  
 категория 1 для ТВ, Т, О;  
 категории 5, 5.1 для всех исполнений;  
*группа 8:*  
 категории 1, 2 для М, ТМ, ОМ, В.

**Обозначение покрытий на чертежах** устанавливает ГОСТ 9.306.

1. *Способ обработки поверхности основного материала.* Этот параметр указывается при необходимости:

Мт – матирование;  
 Хп – химическая полировка;  
 Ж – обработка под жемчуг;  
 Хим. Пас. – химическое пассивирование.

2. *Способ получения* (Хим., Окс. и т.д.);

3. *Материал* (для металлических), тип пленки (для пленок):

Окс – оксидная;  
 Фос – фосфатная.

Условные обозначения материалов:

|              |                 |              |
|--------------|-----------------|--------------|
| Алюминий – А | Никель – Н      | Радий – Р    |
| Бронза – Бр  | Олово – О       | Свинец – С   |
| Золото – Зл  | Олово-свинец –  | Серебро – Ср |
|              | О-С (40)        |              |
| Кадмий – Кд  | Палладий – П    | Хром – Хр    |
| Латунь – Л   | Платина – Пл    | Цинк – Ц     |
| Медь – М     | Припой – ПОС-61 |              |

4. *Функциональные свойства:*

тв – твердое;  
 эиз – электроизоляционное;  
 э – электропроводное.

5. *Декоративные свойства:*

зк – зеркальное; м – матовое; мол. – молочное; б – блестящее; ч – черное;  
 ри – рисунчатое; пб – полублестящее.

6. *Толщина покрытия:*

для обычных металлов, полученных гальваническим, химическим способами и напылением, из ряда: 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 30, 36, 42, 48, 60. Толщины менее 1 мкм не указываются;

для драгоценных металлов, полученных теми же способами: 0,25, 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12;

для металлов, полученных горячим или металлизационным способами: 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 60;

для Хим.Окс, Ан.Окс, Гор., Хч, Нч не нормируется.

*7. Дополнительная обработка:*

хр. – хромирование;

фос. – фосфатирование;

прм. – пропитка маслом;

нв. – наполнение водой.

### 10.3.1. Свойства металлических покрытий

**Цинковое покрытие** имеет серебристо-белый цвет, применяется как защитное от коррозии в атмосферных условиях эксплуатации для сталей. Обладает средней твердостью, выдерживает изгибы и развальцовку, хорошо сохраняется при свинчивании.

На прочность стальных деталей влияет отрицательно из-за обезуглероживания поверхности. Стали с пределом прочности более 140 МПа цинком не покрывают. Не пригодно для деталей, работающих на трение и в вакууме. Способно растворяться в кислых и щелочных средах.

Рабочие температуры – от минус 70 до 250 °С. При температурах выше 250 °С становится хрупким. Не применяется для деталей толщиной менее 0,5 мм, так как они становятся хрупкими.

Не применяется для изделий с последующей сваркой.

Для получения светопоглощающих покрытий на стали, меди и ее сплавах применяют цинк черного цвета.

Для улучшения защитных свойств применяют дополнительную обработку – хромирование и фосфатирование.

*Хромирование* улучшает декоративность. Цвет такого покрытия радужный с зеленоватым, желтым или золотистым оттенком. Применяется для деталей, работающих во влажной атмосфере, для деталей, подвергающихся окраске.

*Фосфатирование* увеличивает стойкость к внешним воздействиям, но мало влияет на прочность.

Шероховатость поверхности – Ra 6.3.

**Кадмиевое покрытие** применяется для защиты деталей, эксплуатируемых в среде, насыщенной морскими испарениями, и в морской воде. Анодное по отношению к стали. Покрытие имеет серебристо-белый цвет, мягкое, эластичное. Хорошо паяется, допускает сварку. Хорошо сохраняется в резьбовых соединениях. Кадмиевые покрытия применяют для деталей из

стали, меди и ее сплавов, требующих плотной сборки, хорошей притираемости с одновременной защитой от коррозии.

Рабочие температуры – от минус 70 до 250 °С.

Покрытие нельзя применять для деталей, находящихся в среде, содержащей соединения серы, а также в присутствии проолифленных или пропитанных высыхающими маслами изделий в закрытых приборах, особенно герметичных.

Для увеличения коррозионной стойкости деталей покрытия оксидируют и фосфатируют, однако это снижает токопроводность.

Кадмиевое покрытие применяется в исключительных случаях, так как кадмий и продукты его коррозии токсичны.

Шероховатость поверхности – Ra 6.3.

**Никелевое покрытие** применяется как защитное, защитно-декоративное и специальное покрытие для стальных, медных и алюминиевых деталей, контактных пружин и токопроводящих деталей из меди и медных сплавов. Является катодным к стали, алюминию и цинку.

Имеет серебристо-белый цвет с желтоватым оттенком, легко полируется. По декоративным свойствам различают матовое, блестящее и черное.

Покрытие плотное, выдерживает изгибы, запрессовку, однако возможно отслаивание при расклепке и развальцовке. По твердости покрытие уступает хромовым и приближается к закаленным сталям.

Микротвердость блестящего покрытия 4400–4900 МПа, химического – до 11 000 МПа. Никель, осажденный химическим способом, более износостоек.

В атмосфере, загрязненной газами, покрытие тускнеет.

Шероховатость поверхности: для защитных покрытий – Ra 3.2, для защитно-декоративных – Ra 1.6.

**Хромовое покрытие** применяют для защитно-декоративной отделки деталей и повышения износостойкости. Катодное по отношению к стали, алюминию, цинку. Одно из самых твердых покрытий: микротвердость 7400–10800 МПа (твердое), 2900–3400 (молочное, твердое). Обладает низкой пластичностью и высоким внутренним напряжением растяжения. Легко разрушается под действием концентрированных ударных нагрузок. Хорошо выдерживает равномерно распределенную нагрузку.

При хромировании имеет место наводороживание стали, что снижает предел выносливости материала детали.

Покрытие износостойкое, антифрикционное. Отличается высокой коррозионной стойкостью в окислительной атмосфере, в том числе в среде серо-содержащих соединений. Неустойчиво в среде глৌдородных соединений.

Хром стоек в термическом отношении, не тускнеет при температурах 400–500 °С.

Обладает высокой декоративностью. Позволяет обеспечить для блестящих покрытий высокий стабильный коэффициент отражения ( $\approx 70\%$ ).

Черное покрытие обладает высокими светопоглощающими свойствами (96–97 %), стойкое в вакууме, однако плохо работает на трение.

Хромовое покрытие пористое. Это позволяет хорошо удерживать смазку в трущихся соединениях. Из-за пористости для повышения защитных свойств необходимо применять многослойные покрытия с более плотными подслоями, например медь – никель – хром.

Низкая рассеивающая способность электролита не позволяет гальванически покрывать сложнопрофилированные детали. При этом способность хрома отлагаться преимущественно на остриях в виде крупных кристаллов делает его чрезмерно хрупким и легко скалываемым. Для покрытия поверхностей сложной формы применяют только химические покрытия.

Покрытие не паяется (плохая смачиваемость припоями), не сваривается.

**Медное покрытие** применяют как специальное для улучшения электропроводности (электростатические немагнитные экраны), паяемости, в качестве подслоя под покрытие никелем, хромом, оловом. Обладает хорошей адгезией. Применяется как искрогасящее покрытие. Катодное по отношению к стали, алюминию, цинку, магнию.

Как правило, в качестве самостоятельного не применяется.

Пластично, имеет низкие внутренние напряжения.

Устойчиво к углероду и его соединениям при высоких температурах, поэтому используется для защиты от науглероживания при цементации сталей.

Неустойчиво в химическом отношении – к продуктам старения органических материалов. Склонно к потускнению на воздухе и быстрому окислению даже при незначительном нагревании.

Имеет высокий коэффициент диффузии в другие материалы, поэтому используется для снижения переходного сопротивления. С низкотемпературными оловянно-свинцовыми припоями может образовывать интерметаллиды, резко снижающие паяемость и качество паяных соединений.

В качестве подслоя под другие покрытия может приводить к негерметичности сварных соединений.

Как самостоятельное применяется покрытие медно-оловянным сплавом (40 % олова) – белой бронзой.

Покрытие применяется как защитно-декоративное и вместо серебрения элементов волноводной аппаратуры (волноводных трактов). Покрытие имеет серебристый цвет, не тускнеет под действием сернистых соединений.

Коррозионно-устойчиво, хорошо выдерживает действие щелочей и слабых органических кислот. Износоустойчиво, повышает контактную стойкость сталей. По твердости уступает хрому, но превосходит никель.

Термостойкость порядка 200 °С. Устойчиво в вакууме. Отражательная способность около 60 %.

Не выдерживает опрессовку в полимерные материалы.

**Оловянное покрытие** является катодным по отношению к стали в атмосферных условиях и анодным во многих органических средах. Обладает стойкостью к серосодержащим соединениям, пригодно под заформовку в любые пластмассы и резины.

Покрытие мягкое, связь с основным материалом хорошая, допустима пластическая деформация деталей.

Рабочая температура – до 200 °С.

**Оловянно-свинцовое покрытие** наносится гальваническим методом.

Характеризуется высокой коррозионной стойкостью в обычной и морской средах. Устойчиво в среднесернистых соединениях.

Обладает хорошим сцеплением с основным материалом, эластично, выдерживает изгибы, развальцовку, вытяжку, штамповку. Сохраняется на резьбе при свинчивании деталей. Обладает антифрикционными свойствами.

По паяемости превосходит все остальные покрытия, уступая припюю ПОС-61, наносимому горячим способом. Оплавленные покрытия имеют лучшие эксплуатационные характеристики, для сохранения паяемости рекомендуется консервация флюсами типа ФКЭт. Подслой никеля обеспечивает получение надежных паяных соединений.

**Припой ПОС-61** наносится горячим способом. По характеристикам аналогичен электрохимическому покрытию О-С (60), но обладает лучшей паяемостью.

**Серебряное покрытие.** Покрытия благородными металлами рекомендуются для снижения переходного сопротивления и повышения поверхностной электропроводности.

Серебряное покрытие применяется для токонесущих контактирующих деталей, работающих при трении (контактное давление 0,25–2,5 Н), для деталей СВЧ-устройств.

Лучшее покрытие по электропроводности и теплопроводности.

Покрытие имеет белый цвет и обладает высоким коэффициентом отражения (до 95 %).

Покрытие ограниченно стойко: с хлором, аммиаком, серой, фенольными соединениями взаимодействует, образуя неэлектропроводную и затрудняющую пайку пленку.

Твердость и износостойкость низкие (микротвердость покрытия 900–1300 МПа, со временем снижается до 560 МПа), связь с основой и пластичность высокие. Хорошо полируется.

**Золотое покрытие** отличается высокой коррозионной стойкостью во всех средах. Хорошо работает в герметичных объемах, в вакууме. Обеспечивает стабильное контактное сопротивление.

Выдерживает запрессовку в полимерные материалы.

Хорошо паяется, сваривается, но с оловянно-свинцовыми припоями образует хрупкие интерметаллические соединения, растворяясь в припое.

Имеет невысокие твердость и сопротивление износу в условиях сухого трения, низкий износ в вакууме и минимальный коэффициент трения.

**Палладиевое покрытие** применяется для контактных пар, работающих в режиме замыкания-размыкания, для придания поверхностной проводимости и износостойкости. Обеспечивает стабильное контактное сопротивление при температурах до 300 °С.

Микротвердость 1000–2500 МПа.

Покрытие стойко в атмосферных условиях и к сернистым соединениям, в контакте с органическими материалами не рекомендуется. В среде водорода применение недопустимо, так как способно поглощать большие объемы водорода, что приводит к охрупчиванию и отслоению покрытий.

Растворяется в оловянно-свинцовых припоях с образованием хрупких интерметаллических соединений. Снижает механические свойства тонкостенных деталей.

### 10.3.2. Свойства окисных покрытий

**Анодно-окисное покрытие** применяется как защитное, защитно-декоративное и специальное для алюминия, магния, титана и их сплавов. Пленка прочно сцепляется с основным материалом детали и может служить хорошим грунтовочным материалом.

Покрытия маслonaполненные гидрофобизированные имеют более высокую коррозионную стойкость.

Анодно-окисные покрытия имеют пористое строение и сравнительно высокую твердость, но на прочность детали влияют отрицательно, снижая последнюю на 5–10 %. Твердые покрытия износостойки. Микротвердость 2000–5000 МПа.

При анодировании деталей размеры увеличиваются приблизительно на половину толщины покрытия, шероховатость возрастает в 2–4 раза.

В декоративных целях производят окраску – наполнение анилиновыми красителями.

Покрытие по магниевым сплавам атмосферостойко, стойко в неагрессивных минеральных маслах, промасливание улучшает свойства.

Покрытие по титану существенно повышает износостойкость материала, устраняет налипание, обеспечивая свинчивание резьбовых соединений.

Покрытие типа «Аноцвет» износостойко, но хрупко, на гранях склонно к скалыванию. Микротвердость 1700–2000 МПа, рабочая температура до 499 °С. Цвет покрытия – белый, зеленый, серо-черный, в зависимости от применяемого электролита.

**Химическое окисное покрытие** представляет собой окисную пленку, полученную в растворах щелочей, кислот, солей. Применяется для стали, меди и алюминия.

Защитные свойства покрытия при промасливании улучшаются.

Поверхности с покрытиями не подвергаются пайке и сварке. Покрытие не наносится на изделия, имеющие паяные швы.

Покрытие имеет декоративное свойство – черный и сине-черный цвет (воронение).

Химическая окисная пленка применяется для получения токопроводящего покрытия на алюминии.

### 10.3.3. Свойства диффузионных покрытий

Данный вид покрытия связан с диффузией в поверхностный слой основного материала детали металлического или неметаллического диффузанта. К настоящему времени получены диффузионные покрытия на металлических, неорганических (графит, кварц, стекло, керамика) и органических (пластмассы, ткани и т. д.) материалах.

**Цементация** – насыщение поверхности стали углеродом. Содержание углерода в исходном металле до 0,3 %. После цементации обязательна закалка и низкий (200 °С) отпуск. При этом поверхностный слой (около 1 мкм) приобретает твердость, износостойкость закаленной стали, а сердцевина остается мягкой и вязкой.

Цементацию применяют для упрочнения стальных шестерен и других трущихся деталей.

**Азотирование** – насыщение азотом поверхности стали, легированной переходными металлами (хромом, алюминием, титаном, вольфрамом, молибденом), способными образовывать нитриды. Процесс протекает при 500–650 °С. Закалка не требуется. Получают твердый, износостойкий слой глубиной 0,1–0,3 мм, одновременно повышаются коррозионная стойкость и усталостная прочность изделий.

**Цианирование** – одновременное насыщение стали углеродом и азотом. В зависимости от режима обработки свойства поверхностного слоя приближаются к цементированным или азотированным.

Цианированные детали имеют красивую матовую поверхность, улучшающую товарный вид продукции.

**Сульфацианирование** – одновременное насыщение поверхности стали азотом, углеродом и серой. Придает поверхности хорошие антифрикционные свойства.

**Борирование** – насыщение металлической поверхности бором. Можно насыщать практически любые стали, чистое железо, никель и его сплавы. На поверхности образуется боридный слой высокой твердости и износостойкости.

**Хромирование** – насыщение поверхности стальных деталей хромом. Процесс производят при 1000–1050 °С.

Улучшает окалиностойкость деталей, а также коррозионную стойкость в пресной и морской воде, водяном паре, азотной кислоте.



Покрытие имеет высокую твердость, толщина покрытия 0,1–0,2 мм.

**Алитирование** – насыщение поверхности стали алюминием при 900–1050 °С.

Алитированные детали имеют повышенную окислительную стойкость до 850–900 °С и коррозионную стойкость в ряде агрессивных сред.

**Силицирование** – насыщение стальных деталей кремнием при 950–1100 °С.

Придает стали высокую коррозионную стойкость в морской воде, в азотной, серной и соляной кислотах.

Слой имеет низкую твердость, но после пропитки маслом приобретает высокую износостойкость.

## 10.4. Лакокрасочные покрытия

Основное назначение лакокрасочных покрытий – обеспечение защитных свойств в нормальных или специальных условиях эксплуатации. Дополнительные функции – нужное цветофактурное решение для деталей и сборочных единиц ЭС, а также нанесение маркировок.

### 10.4.1. Структура обозначения лакокрасочных покрытий

Структура обозначения лакокрасочного покрытия обычно состоит из семи групп буквенно-цифровых обозначений (ГОСТ 9.032):

[1].[2]-[3][4],[5],[6],[7]

Например: Эм. ПФ-115, черный, II, УХЛ 4.

1. Вид лакокрасочного покрытия. Применяются следующие виды лакокрасочных покрытий.

*Краска* (сокращение – Кр) – суспензия пигмента с наполнителями в олифе, масле, суспензии.

*Эмаль* (сокращение – Эм) – суспензия пигмента с наполнителями в лаке.

*Лак* – раствор пленкообразующего вещества в органическом растворителе или воде.

Для улучшения сцепления с материалом несущей конструкции и выравнивания поверхности применяют соответственно *грунтовку* (сокращение – Гр) и *шпатлевку* (сокращение – Шп).

2. *Материал лакокрасочного покрытия*. Сокращенное обозначение материала определяется, как правило, наименованием смол, применяемых как основа лакокрасочного материала.

3. *Группа покрытия* определяется условиями эксплуатации. Группы покрытий представлены в табл. 10.2.

Грунтовки обозначаются цифрой 0, шпатлевки – 00.

4. *Порядковый номер разработки* – одна-две цифры.

5. *Цвет покрытия*.

6. *Класс отделки поверхности*. Характеристика классов отделки поверхности приведена в [табл. 10.3](#).

Классы поверхности отличаются внешним видом и параметрами допустимых дефектов, таких как включения, шагреня, штрихи, риски, волнистость, разнооттеночность. Например, для класса I поверхность ровная, гладкая, однотонная. Не допускается дефектов поверхности, видимых невооруженным глазом. В классе VII количество и вид дефектов не нормируется.

Таблица 10.2

**Обозначение групп покрытий**

| Группа                                        | Обозначение |
|-----------------------------------------------|-------------|
| Атмосферостойкие                              | 1           |
| Ограниченно атмосферостойкие                  | 2           |
| Водостойкие:                                  | 4           |
| стойкие в пресной воде и ее парах             | 4/1         |
| стойкие в морской воде и ее парах             | 4/2         |
| Специальные воздействия:                      | 5           |
| стойкие к рентгеновскому излучению            | 5/1         |
| стойкие к глубокому холоду (ниже минус 60 °С) | 5/2         |
| стойкие к открытому пламени                   | 5/3         |
| стойкие к биологическим факторам              | 5/4         |
| Маслобензостойкие:                            | 6           |
| стойкие к минеральным маслам                  | 6/1         |
| стойкие к бензину (нефтепродуктам)            | 6/2         |
| стойкие к минеральным маслам и бензину        | 6/3         |
| Химически стойкие                             | 7           |
| Термостойкие                                  | 8           |
| Электроизоляционные                           | 9/1         |
| Электропроводящие                             | 9/2         |

Таблица 10.3

**Характеристика классов отделки поверхности**

| Класс покрытия | Характеристика поверхности изделия, подлежащей окрашиванию                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I              | Деревянные детали футляров в экспортном исполнении                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| II             | Деревянные детали футляров ЭС и лицевые поверхности приборов (кроме экспортного исполнения), детали панелей кожухов, корпусов, каркасов, обрамлений (без сварки, клепки и втулок) и других изделий, к внешнему виду которых предъявляются повышенные требования по декоративным свойствам                                                                   |
| III            | Детали футляров и корпусов ЭС из дерева и пластмасс; лицевые поверхности приборов, к внешнему виду которых не предъявляются повышенные требования по декоративным отделкам; детали пультов управления, панелей, обрамлений (со сваркой, расклепками и втулками), ручки, планки, наружные поверхности пультов управления. Сварные швы должны быть обработаны |
| IV             | Поверхности с обработанными паяными и сварными швами, обработанными поверхностями литых деталей, наружные поверхности литых изделий, корпусов, кожухов, станин, каркасов, кузовов                                                                                                                                                                           |
| V              | Внутренние поверхности приборов, установок, каркасов, кожухов, корпусов, кузовов                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| VI             | Поверхности антенно-мачтовых устройств, необработанных изделий, к внешнему виду которых предъявляются требования только по защитным свойствам, деревянная тара                                                                                                                                                                                              |
| VII            | Рамы, детали, шасси, внутренние поверхности изделий с необработанными швами, к которым предъявляются требования только по защитным свойствам                                                                                                                                                                                                                |

Таблица 10.4

**Условия эксплуатации покрытий**

| Категория исполнения | Условия эксплуатации покрытий |           |           |    |    |
|----------------------|-------------------------------|-----------|-----------|----|----|
|                      | Климат                        |           |           |    |    |
|                      | УХЛ                           | Т, ТВ, ТС | ОМ, М, ТМ | О  | В  |
| 1                    | УХЛ1                          | Т1        | ОМ1       | О1 | В1 |
| 2                    | УХЛ2                          | Т2        | ОМ2       | О2 | В2 |
| 3                    | УХЛ3                          | Т3        | ОМ3       | В3 | В3 |
| 4                    | УХЛ4                          | О4        | ОМ4       | О4 | В4 |
| 5                    | В5                            | В5        | В5        | В5 | В5 |

По внешнему виду покрытия бывают:

- гладкие однотонные (высокоглянцевые, глянцевые, полуглянцевые, матовые, глубокоматовые);
- гладкие рисунчатые (глянцевые, полуглянцевые);
- рельефные муаровые (полуматовые, матовые);
- рельефные шагреньевые (полуматовые, матовые).

Степень блеска для покрытий:

высокоглянцевых – более 60 %;

глянцевых – от 50 до 59 %;

полуглянцевых – от 37 до 49 %;  
полуматовых – от 20 до 36 %;  
матовых – от 4 до 19 %;  
глубокоматовых – до 3 %.

Требования к декоративным покрытиям для изделий различного назначения устанавливает ГОСТ 23852. В этом стандарте выделены шесть групп изделий. В группу 4 включены изделия, функционирующие в интерьерах помещений (включая производственные) в контакте с человеком (приборы, оборудование и т. д.). Для изделий этой группы установлены следующие требования к покрытиям.

Цвета красной, оранжевой, желтой, зеленой, синей зон и ахроматичные; сложные: светлые, средние, темные; малой и средней насыщенности. Число основных цветов в схеме цветового решения – не более трех – гармоничные цветовые сочетания. Сочетания цветов эквивалентные.

В общем случае класс отделки той или иной поверхности зависит от того, насколько она часто попадает в поле зрения оператора. Для основных поверхностей, определяющих внешний вид прибора, – классы II, III, IV, а для нерегулярно попадающих в поле зрения (например, задних) – IV, V.

7. *Группа условий эксплуатации* покрытия определяется климатом и категорией исполнения в соответствии с ГОСТ 15150 ([табл. 10.4](#)).

#### **10.4.2. Характеристика лакокрасочных покрытий**

##### **1. Пентофталевые (ПФ):**

ПФ-115-II-Б, Ж, Гол, Син, Кр, Черн и т.д.;

ПФ-163-II-Черн.

Не выше класса II отделки поверхности.

Глянцевые покрытия средней твердости, механически прочные. Хорошая адгезия к металлу, дереву, органическому стеклу. Наносятся любыми способами: кисть, окунание, пневмораспыление, электростатическое распыление.

##### **2. Глифталевые (ГФ):**

ГФ-245, серая, II.

Наносятся на дерево, металл с предварительной грунтовкой.

##### **3. Меламиноалкидные (МЛ):**

ЭМ МЛ-1280, под слоновую кость, I;

ЭМ МЛ-1221, зеленая, I;

ЭМ МЛ-1201, белая, I.

Глянцевые твердые, механически прочные, электроизоляционные, хорошая декоративность, хорошая адгезия к металлу.

ЭМ МЛ-1279, серо-голубая, I;

ЭМ МЛ-1290, красная, I;

ЭМ МЛ-1232, синяя, I.

Глянцевые, механически прочные, электроизоляционные, напряжение пробоя  $U_{\text{пробоя}} = 60$  кВ/мм. После 24 часов в воде  $U_{\text{пробоя}} = 30$  кВ/мм.

**3а. Молотковые (МЛ):**

ЭМ МЛ-165, полуглянцевая серо-голубая, II;

ЭМ МЛ-165М, полуматовая серо-голубая, II.

Хорошая адгезия к металлам. Наносятся электростатическим распылением, пневмораспылением.

**4. Фенольные (ФЛ):**

ЛАК ФЛ-593, светло-коричневый, III.

Глянцевые. Покрытие твердое, механическая прочность, хорошая адгезия к металлам, дереву, слоистым пластикам.

Стойкие к маслу, бензину, воде (от минус 60 до 100 °С).

Электроизоляционное  $U_{\text{пробоя}} = 60$  кВ/мм. После 24 часов в воде  $U_{\text{пробоя}} = 20$  кВ/мм. Наносятся распылением, окунанием, кистью.

**5. Эпоксидные (Э, ЭП):**

ЛАК Э-4100, бесцветный, IV;

ЭМ ЭП-51, серая, черная, II.

Высокая твердость, хорошая адгезия к металлам и слоистым пластикам, атмосферостойкие, водостойкие, R(OH)-стойкие. Температура до 200 °С. Наносятся распылением и кистью.

**6. Полиэфирные (ПЭ):**

ЛАК ПЭ-220, бесцветный, I.

Глянцевые, твердые, механически прочные, высокая адгезия к дереву. Применяются для отделки деревянных футляров.

**7. Полиуретановые (УР):**

ЛАК УР-231, бесцветный, II.

Высокая адгезия к металлам, слоистым пластикам, твердость. Наносятся распылением, окунанием, поливом и для ПП.

**8. Нитроцеллюлозные (НЦ):**

ЛАК НЦ-11-00, черный II;

ЭМ НЦ-25, разноцветная, II.

Глянцевые, механически прочные. Адгезия к металлам и силикатным стеклам, высокая декоративность. Наносятся распылением.

**9. Перхлорвиниловые (ХВ):**

ЭМ ХВ-518, защитного зеленого цвета, III.

Глянцевые, твердые, механически прочные, атмосферостойкие, химически стойкие, водостойкие, маслостойкие, устойчивы к температуре и морской воде.

Высокая адгезия к металлам и дереву. Наносятся распылением.

**10. Соплимеры хлоридные (ХС):**

ЭМ ХС-77, разноцветные, II;

ХСЛ, бесцветный, III.

Глубоко матовые, прочные, средней твердости. Высокая адгезия к металлу и дереву. Черного цвета применяется для тепловых экранов. Наносятся распылением и кистью.

## 11. Полиакриловые (АК):

ЛАК АК-113 бесцветный, II (применяется для алюминия и его сплавов);

ЛАК АК-113ф, бесцветный, II (применяется для алюминия, меди, бронзы, стали).

Средней твердости, маслбензостойкие. Наносятся распылением, кистью.

Примеры записи покрытий приведены в [табл. 10.5](#).

Таблица 10.5

### Примеры записи покрытий по ГОСТ 9.032

| Обозначение покрытия                                                  | Характеристики покрытия                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Эмаль Эп-140, серая, III, У2                                          | Покрытие серой эмалью ЭП-140 по III классу, эксплуатирующееся под навесом в условиях умеренного микроклиматического района                                                                                                                                                               |
| Эмаль ХВ-785, белая.<br>Лак ХВ-784, IV, 7/2                           | Покрытие белой эмалью ХВ-785 и лаком ХВ-784 по IV классу, эксплуатирующееся при воздействии растворов кислот                                                                                                                                                                             |
| Эмаль МЛ-158, без рисунка, серо-бежевая, II, У2                       | Покрытие серо-бежевой эмалью МЛ-158 по II классу без проявления рисунка, эксплуатирующееся под навесом в условиях умеренного микроклиматического района                                                                                                                                  |
| Эмаль МЛ-158 «Шагрень», черная, III, У2                               | Покрытие черной эмалью МЛ-158 «Шагрень» по III классу, эксплуатирующееся под навесом в условиях умеренного микроклиматического района                                                                                                                                                    |
| Ц9.хр/МЛ-12, серая, III, У2                                           | Покрытие цинковое толщиной 9 мкм, хромированное с последующим покрытием серой эмалью (МЛ-12) по III классу, эксплуатирующееся на открытом воздухе в условиях холодного микроклиматического района                                                                                        |
| Грунтовка АК-070, желтая. Эмаль ПФ-218 ГС, зеленовато-желтая, III, У2 | Покрытие зеленовато-желтой эмалью ПФ-218 ГС по III классу, эксплуатирующееся под навесом в условиях умеренного микроклиматического района                                                                                                                                                |
| Лак УР-231 с 0,3 % красителя жирорастворимого красного Ж, Т2          | Покрытие четырехслойное лаком ЭП-730, эксплуатирующееся под навесом в условиях сухого тропического микроклиматического района.<br>Покрытие лаком УР-0,3 % красителя жирорастворимого красного Ж, эксплуатирующееся под навесом в условиях сухого тропического микроклиматического района |
| Эмаль ХС-744, защитная, V. ХЛП-7/1                                    | Покрытие защитное эмалью ХС-744 по V классу, эксплуатирующееся на открытом воздухе, загрязненном газами химическими и газами других производств, в условиях холодного микроклиматического района                                                                                         |

Запись лакокрасочных покрытий в технических требованиях чертежа следует производить в соответствии с ГОСТ 2.310. Запись указаний о маркировании изделий в технических требованиях чертежа производится по ГОСТ 2.314.

### Примеры

«Покрытие Кдб  
Эмаль ВЛ - 515, красно - коричневая, III, 6/2. ТУ 6 – 10 – 1052 – 75».

«Покрытие лак ЭП-730, Т2.4. ГОСТ 20824–81».

«Покрытие эмаль ПФ-115, темно-серая 896, III, У1. ГОСТ 6465–76» – для покрытий, в обозначении цвета которых приводится номер эталона.

## Контрольные вопросы

1. Характеристика видов защиты РЭС.
2. Основные виды герметизации.
3. Свойства, приобретаемые поверхностью материала при нанесении покрытия?
4. Какие бывают покрытия?
5. Чем отличаются лакокрасочные покрытия от металлических?

## 11. ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ОТ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

[11.1. Характеристика видов теплопередачи.](#)

[11.2. Конвективный теплообмен.](#)

[11.3. Лучистый теплообмен](#)

[11.4. Теплопроводность:](#)

[11.5. Системы охлаждения электронных средств.](#)

[11.6. Радиаторы.](#)

[11.7. Тепловые трубы.](#)

[Контрольные вопросы.](#)

Л и т е р а т у р а: [9, 23, 54].

### 11.1. Характеристика видов теплопередачи

*Тепломассообмен* – раздел физики, в котором рассматриваются процессы переноса теплоты (энергии) и массы (вещества).

Явления теплообмена связаны с необратимым переносом энергии из одной части пространства в другую и вызваны разностью температур, а явления массообмена обусловлены перемещением вещества из одной части пространства в другую и вызваны разностью концентраций.

Если теплообмен и массообмен сопутствуют друг другу и их приходится рассматривать во взаимосвязи, то имеет место тепломассообмен. Когда явления теплообмена и массообмена мало влияют друг на друга, их можно рассматривать порознь; иногда имеет место только какое-нибудь одно явление. Соответствующие процессы в этих случаях называют процессами тепло- и массообмена, теплообмена, массообмена.

Различают три вида переноса энергии в виде теплоты: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

*Теплопроводность* – молекулярный перенос теплоты в сплошной среде, вызванный разностью температур.

*Конвекция* – процесс переноса теплоты при перемещении макроскопических объемов жидкости или газа из области с одной температурой в область с другой температурой; при этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом вещества. Процессы конвекции сопровождаются теплопроводностью, и этот совместный процесс называется *конвективным теплообменом*.

*Тепловое излучение* – процесс переноса теплоты, обусловленный превращением внутренней энергии вещества в энергию излучения, переносом ее в виде электромагнитных волн и поглощением веществом.

Перенос вещества происходит с помощью диффузии и конвективного массообмена.

*Диффузия* – молекулярный перенос вещества в среде, вызванный разностью концентраций (концентрационная диффузия), температур (термодиффузия) или давлений (бародиффузия).



*Конвективный массообмен* – перенос вещества, вызванный совместным действием конвективного переноса вещества и молекулярной диффузии.

Приведем примеры, связанные с переносом теплоты и массы в природе:

теплообмен человека со средой;

перенос теплоты из жилища в окружающую среду (через окна, двери, стены) и, наоборот, из среды в жилище;

перенос энергии от Солнца к Земле;

различные способы переработки вещества и продуктов.

Все эти процессы связаны с переносом энергии и вещества в пространстве (тепломассообмен).

Такие процессы, как испарение, сушка, образование облаков, представляют собой целый комплекс явлений теплообмена, сопровождающихся фазовыми превращениями.

Для своих нужд люди используют в некоторых случаях лишь какое-нибудь одно явление, например процесс диффузии примесей в полупроводниках при производстве транзисторов, интегральных схем; в других случаях это может быть целый комплекс явлений, настолько сложный, что трудно выделить одно из них в качестве основного. Например, при взаимодействии мощных потоков лазерного излучения с веществом происходит нагревание последнего до температуры плавления, и даже испарения, затем испарившееся вещество выбрасывается в окружающее пространство, дальнейшее поступление энергии приводит к ионизации паров, образованию плазмы и т. д.

Ввиду сложности процессов теплообмена целесообразно отдельно изучить явления, с ним связанные, – теплопроводность, конвекцию, излучение, диффузию, конвективный массообмен.

## 11.2. Конвективный теплообмен

**Конвекция** – процесс переноса теплоты при перемещении макрочастиц жидкости или газа из области с одной температурой в область с другой температурой.

Прежде условимся, что под термином «жидкость» будем понимать как капельную жидкость, так и газ. Причем жидкость может быть сжижаемой (газ) и несжижаемой (капельная жидкость).

Теплообмен между потоками жидкости и поверхностью соприкасающегося с ним тела называется *конвективным теплообменом* (конвективной теплоотдачей). Этот процесс изучался еще в XVII в. И. Ньютоном и в XVIII в. русским академиком Г. В. Рихманом, которые независимо друг от друга установили следующую закономерность (**закон Ньютона – Рихмана**): **тепловой поток  $d\Phi$  от жидкости к элементу поверхности  $dA$  (или в обратном направлении) пропорционален площади элемента поверхности и разности температур  $\Delta t = t_c - t$  или  $\Delta t = t - t_c$  между температурами поверхности тела  $t$  и среды  $t_c$ :**

$$d\Phi = d\Phi_{\alpha} \cdot t d\Phi, \quad (11.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup> · К.

Согласно (11.1)

$$\alpha = \frac{d\Phi}{(dA \Delta t)} = \frac{q}{\Delta t}. \quad (11.2)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  численно характеризует плотность теплового потока, которая рассеивается или воспринимается поверхностью твердого тела при разности температур между твердым телом и средой в 1 К.

Если параметры не изменяются от точки к точке поверхности, то закон Ньютона – Рихмана записывается в интегральной форме:

$$\Phi = \alpha \Delta t A.$$

Вся сложность процесса конвективного теплообмена концентрируется в одной величине – коэффициенте теплоотдачи  $\alpha$ , который представляет собой функцию большого числа параметров, существенно влияющих на процесс теплообмена. Прежде всего конвективный теплообмен оказывается связанным с движением самой жидкости, т. е. с гидродинамическим процессом. Тепловые и аэрогидромеханические явления взаимосвязаны, поэтому изучение каждого из них не может проводиться изолированно.

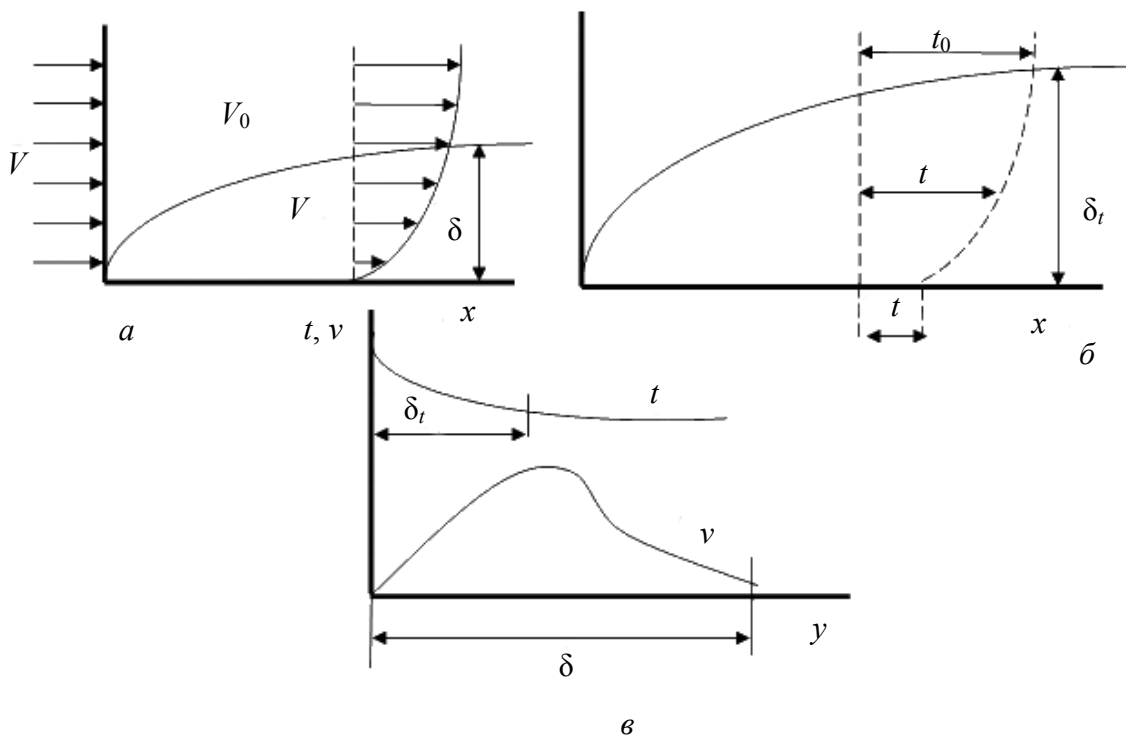


Рис. 11.1. Гидродинамический (а) и тепловой (б) пограничные слои при вынужденном обтекании пластины потоком жидкости. Поле скоростей и температур при свободной конвекции жидкости у вертикальной стенки (в)

Решение многих практически важных задач аэрогидродинамики и теплообмена основано на модели пограничного слоя. При соприкосновении частиц жидкости с поверхностью тела они адсорбируются телом, как бы при-

липают к его поверхности. В результате около поверхности вследствие вязкостных свойств образуется тонкий слой медленно движущейся жидкости – *пограничный слой*. Различают гидродинамический и тепловой пограничные слои. На [рис. 11.1, а, б](#) представлены схемы изменения скоростей и температур в гидродинамическом и тепловом пограничных слоях на передней кромке пластины при вынужденном движении жидкости на некотором расстоянии от кромки. *Гидродинамическим пограничным слоем* называют пристенный слой жидкости толщиной  $\delta$ , в котором происходит изменение скорости движения жидкости от нулевой (на поверхности тела) до значения  $v_0$  – скорости основного потока жидкости.

Пристенный слой жидкости толщиной  $\delta_t$ , в котором происходит изменение температуры от ее значения  $t_w$  на поверхности тела до температуры  $t_0$  основного потока жидкости, называют *тепловым пограничным слоем*.

Понятие «толщина пограничного слоя»  $\delta$  весьма условно, так как резкого перехода от пограничного слоя к течению вне слоя нет. Поэтому под  $\delta$  подразумевают такое расстояние от стенки, на котором скорость потока  $v$  будет отличаться от скорости  $v_0$  набегающего потока, например, на 1 %. В общем случае величины  $\delta$  и  $\delta_t$  не совпадают.

Разница в структуре теплового и гидродинамического пограничных слоев особенно заметна, например, при свободном движении жидкости около нагретой вертикальной стенки ([рис. 11.1, в](#)): скорость вдали от стенки равна нулю, поэтому распределение скоростей имеет иной характер, чем для вынужденной конвекции.

В 1883 г. английский ученый Осборн Рейнольдс показал, что существуют два основных режима движения жидкости: *ламинарный* и *турбулентный*. При ламинарном движении отдельные струи потока располагаются параллельно друг другу, при турбулентном движении эти отдельные струи потока хаотически переплетены друг с другом.

Это было установлено Рейнольдсом следующими экспериментами. В протекающую по трубе воду вводилась тоненькая струйка окрашенной жидкости. При скоростях течений, не превышающих некоторой критической скорости  $v_{кр}$ , отдельные части окрашенной струйки двигались только по направлению всего потока. При  $v > v_{кр}$  окрашенная струйка на большом расстоянии от входа в трубу растворялась и окрашивала всю воду. Это объясняется тем, что продольное движение частиц уступает место движению, в котором частицы приобретают также значительные радиальные составляющие скорости. При переходе ламинарного режима в турбулентный сопротивление движению жидкости в трубе резко возрастает.

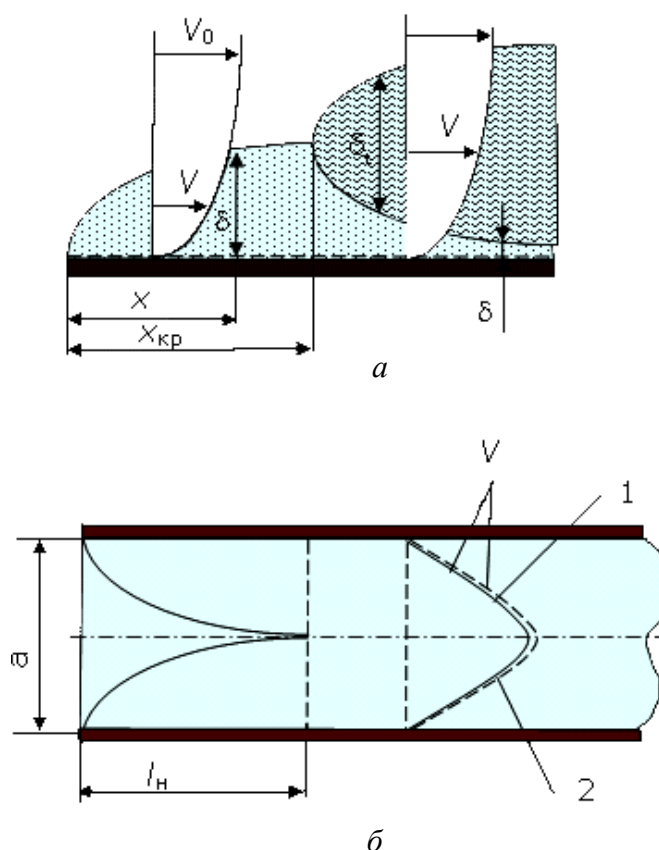


Рис. 11.2. Структура пограничного слоя: *a* – обтекание пластины потоком жидкости; *б* – течение жидкости в трубе

Кроме того, существует еще весьма неустойчивый переходный режим движения жидкости.

Характер режима течения зависит от нескольких параметров – вязкости  $\mu$ , плотности  $\rho$ , скорости  $v$  течения и размеров тела.

Между частицами или слоями реальной жидкости, движущимися с различными скоростями, вследствие вязкости всегда возникает сила внутреннего трения (касательные напряжения), противодействующая движению. Согласно закону Ньютона эта сила  $F$ , отнесенная к единице поверхности, пропорциональна градиенту  $dv/dn$ , а именно:

$$F = \mu dv/dn .$$

Коэффициент  $\mu$  в этом уравнении называют *динамической вязкостью* (коэффициентом внутреннего трения); в СИ он выражается в паскалях в секунду.

Положим  $dv/dn = 1$ , тогда коэффициент динамической вязкости  $\mu$  равен силе трения, приходящейся на единицу площади соприкосновения скользящих друг по другу слоев. В уравнение теплообмена часто входит отношение динамической вязкости жидкости к ее плотности  $\nu = \mu/\rho$ , которое называют *кинематической вязкостью*.

Значения динамической вязкости в зависимости от изменения температуры

| Среда  | Изменение $t$ , °C     | Динамическая вязкость, $\mu$ , Па · с |
|--------|------------------------|---------------------------------------|
| Воздух | $-50 \leq t \leq 1000$ | $(15-50) \cdot 10^{-6}$               |
| Вода   | $0 \leq t \leq 370$    | $(1800-60) \cdot 10^{-6}$             |
| Масло  | $10 \leq t \leq 150$   | $(35000-50) \cdot 10^{-4}$            |

В [табл. 11.1](#) приведены значения динамической вязкости в зависимости от изменения температуры.

Переход из турбулентного течения в ламинарное и обратно количественно характеризуется так называемым числом Рейнольдса –  $Re$ . Например, при обтекании пластины при значении числа Рейнольдса  $Re = vL/\nu > 5 \cdot 10^5$  возникает турбулентность. Зарождение турбулентности зависит от возмущений в потоке, которые могут существовать на подходе к передней кромке пластины и в области самой кромки.

Типичные модели конвективного теплообмена – это движение жидкости вдоль пластины, свободная конвекция у вертикальной пластины, течение жидкости в канале.

На [рис. 11.2, а](#) схематически показана модель движения жидкости вдоль пластины, включающая два режима течения – ламинарный и турбулентный. На переднем участке пластины, где  $x < x_{кр}$ , образуется ламинарный гидродинамический пограничный слой толщиной  $\delta_l(x)$ . Как только  $x$  становится больше критической ( $x \geq x_{кр}$ ), движение в слое становится неупорядоченным, вихревым: образуются турбулентный пограничный слой толщиной  $\delta_t$  и ламинарный подслой толщиной  $\delta_n$ .

Рассмотрим процесс свободной конвекции около нагретой, вертикально ориентированной стенки, температура которой выше температуры омывающей жидкости (см. [рис. 11.1, е](#)). Соприкасающийся со стенкой объем жидкости получает от нее энергию благодаря столкновению молекул газа со стенкой, молекулы жидкости начинают двигаться с большей скоростью, первоначальный объем увеличивается, соответственно снижается плотность жидкости, что по закону Архимеда приводит к движению этого объема вверх.

По-другому ведет себя жидкость при вынужденном движении в канале или трубе. У внутренней поверхности трубы также образуется пограничный слой, толщина которого у входного края трубы равна нулю, а затем постепенно возрастает, как это показано на [рис. 11.2, б](#). Предположим, что условия входа таковы, что движение частиц в трубе происходит без возмущения. На расстоянии  $x > l_n$  от входа пограничный слой утолщается настолько, что заполняет все сечение, – начинается область стабилизированного течения. Кривая распределения скорости потока по сечению канала имеет форму параболы 1 (ламинарное движение) либо более сложной выпуклой кривой 2

(турбулентное движение). Для стабилизированного потока, как будет показано ниже, при  $Re = vd/\nu > 2300$  ламинарное течение переходит в турбулентное.

Помимо свободного и вынужденного обтекания тел жидкостью явление конвективного теплообмена наблюдается также при кипении и конденсации жидкости.

### 11.3. Лучистый теплообмен

Тепловое излучение определяется только температурой и оптическими свойствами излучающего тела. Известно, что энергия излучения переносится со скоростью света, которую для вакуума обозначим  $c_0$ , а для вещества –  $c$ . Скорости  $c$  и  $c_0$  связаны через показатель преломления  $n$  вещества зависимостью

$$c = \frac{c_0}{n}.$$

Энергия фотона  $Q_\phi$  пропорциональна частоте электромагнитных колебаний:

$$Q_\phi = h\nu,$$

где  $h$  – постоянная Планка.

По спектру различают монохроматическое и сложное излучения. Если излучение происходит в узком интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ , то оно называется *монохроматическим* и у параметров, характеризующих монохроматическое излучение, ставится индекс  $\lambda$  или  $\nu$ . *Сложным* (интегральным) называется излучение во всем диапазоне длин волн  $0 \leq \lambda \leq \infty$ . Таким образом, в отличие от других механизмов теплообмена лучистая энергия имеет не только количественную, но и качественную (спектральную) характеристику.

Если на пути теплового излучения встречается тело, то тепловая энергия частично поглощается им, частично отражается и частично проходит сквозь него. Обозначим количество падающей на тело энергии  $Q$ , поглощен-

ной –  $Q_a$ , отраженной –  $Q_r$  и прошедшей через вещество –  $Q_d$ . Тогда на основании закона сохранения энергии

$$Q = Q_a + Q_r + Q_d. \quad (11.3)$$

Разделим обе части равенства (11.3) на  $Q$ :

$$\frac{Q_a}{Q} + \frac{Q_r}{Q} + \frac{Q_d}{Q} = 1. \quad (11.4)$$

Первый член равенства (11.4) называется *коэффициентом поглощения* и обозначается  $f$ , второй – *коэффициентом отражения* и обозначается  $r$ , третий – *коэффициентом пропускания* и обозначается  $d$ . Следовательно,

$$a + r + d = 1. \quad (11.5)$$

Каждая из величин  $a$ ,  $r$ ,  $d$  для различных веществ может принимать значения от 0 до 1. Различают три крайних случая:

1)  $a = 1$ ,  $r = 0$ ,  $d = 0$ , т. е. падающая лучистая энергия полностью поглощается телом. Такие тела называются *черными*;

2)  $r = 1$ ,  $a = d = 0$ , т. е. падающая лучистая энергия полностью отражается. В случае когда поверхность шероховатая, лучи отражаются рассеянно (диффузное отражение) и тело называется *белым*; когда поверхность тела гладкая, то отражение происходит по законам геометрической оптики и поверхность тела называется *зеркальной*;

3)  $d = 1$ ,  $a = r = 0$ , т. е. падающая энергия полностью проходит через тело. Такие тела называются *прозрачными* (диатермичными).

В природе такие крайние случаи не встречаются, т. е. величины  $a$ ,  $r$ ,  $d$  не принимают значений, равных нулю или единице. Однако анализ этих случаев позволил найти путь для установления законов излучения реальных тел.

При изучении теплового излучения важную роль играют понятия «лучистый поток», «излучательная способность», «спектральная излучательная способность реальных и черных тел» (все параметры, относящиеся к черному телу, далее будут обозначаться с индексом 0).

*Потоком излучения*, или *лучистым потоком*,  $\Phi$  называют отношение лучистой энергии  $Q$  к времени излучения  $\tau$ :

$$\Phi = Q / \tau,$$

или

$$\Phi = dQ / d\tau.$$

Отношение потока излучения  $\Phi$  к площади поверхности  $A$  излучающего тела называется *излучательной способностью*  $M$ :

$$M = \Phi / A,$$

или

$$M = d\Phi / dA.$$

Поверхностную плотность лучистого потока монохроматического излучения в диапазоне длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$  называют *спектральной излучательной способностью* и обозначают  $M_\lambda = dM / d\lambda$ . Единица измерения  $M_\lambda$  – ватт на метр кубический.

Таблица 11.2

### Физические постоянные излучения

| Наименование                   | Обозначение | Значение                                                   |
|--------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------|
| Постоянная Планка              | $h$         | $6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с                                |
| Скорость света в вакууме       | $c_0$       | $2,998 \cdot 10^8$ м/с                                     |
| Постоянная Стефана – Больцмана | $\sigma_0$  | $5,668 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> ) |
| Первая постоянная Планка       | $C_1$       | $3,740 \cdot 10^{-16}$ Вт·м <sup>2</sup>                   |
| Вторая постоянная Планка       | $C_2$       | $1,4387 \cdot 10^{-2}$ м·К                                 |

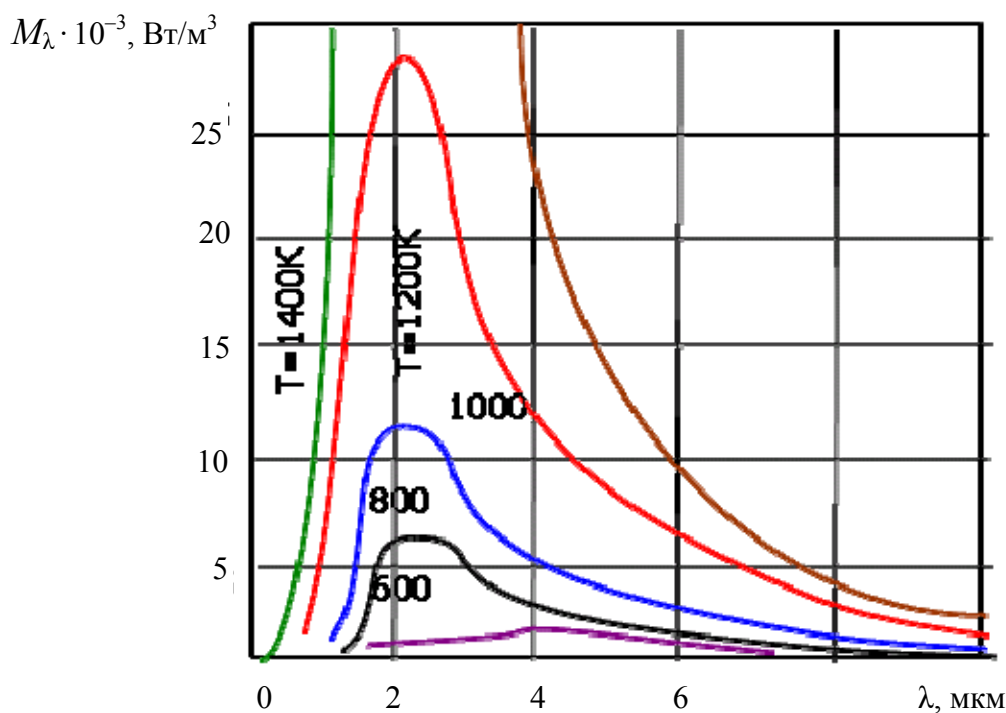


Рис. 11.3. Графическое представление закона Планка

Немецкий физик Макс Планк в 1900 г. теоретически установил закон, выражающий зависимость спектральной излучательной способности черного тела от длины волны и температуры  $T$  (закон Планка):

$$M_{0\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5} n^{-2}}{\exp\left(\frac{C_2}{n\lambda T}\right) - 1}, \quad (11.6)$$



где  $n$  – показатель преломления среды, окружающей черное тело;  $C_1, C_2$  – физические постоянные, значения которых приведены в [табл. 11.2](#).

На [рис. 11.3](#) дано графическое представление формулы (11.6) для случая  $n = 0$ , т. е. когда черное тело излучает в вакуум.

Из [рис. 11.3](#) следует, что черное тело излучает при любой температуре  $T > 0$  К лучи всех длин волн, т. е. имеет сплошной спектр излучения.

Из формулы (11.6) запишем выражение для излучательной способности черного тела:

$$dM_0 = M_{0\lambda} d\lambda = \frac{C_1 \lambda^{-5} n^{-2} d\lambda}{\exp\left(\frac{C_2}{n\lambda T}\right) - 1}. \quad (11.7)$$

Интегрируя его в пределах изменения длины волны от 0 до  $\infty$ , получим

$$M_0 = \int_0^{\infty} M_{0\lambda} d\lambda = n^2 \sigma_0 T^4. \quad (11.8)$$

Это известный закон Стефана – Больцмана: излучательная способность черного тела пропорциональна его абсолютной температуре в четвертой степени.

## 11.4. Теплопроводность

Совокупность тел с различными теплофизическими параметрами и явно выраженными границами раздела называют *системой тел* или *неоднородным телом*. Каждая часть такой системы будет однородным телом. Однородные тела могут быть изотропными и анизотропными: в *изотропном теле* теплофизические параметры одинаковы во всех направлениях, в *анизотропном* – различны в разных направлениях, но могут быть постоянными в выбранном направлении.

Тепловое состояние тела или системы тел количественно характеризуется его *температурным полем* – совокупностью числовых значений температуры в различных точках системы в данный момент времени. В случае когда температура во всех точках системы не изменяется с течением времени, поле температур называется *стационарным*; если же температура в теле с течением времени изменяется, то это *нестационарное поле*.

Если температуры всех точек некоторого объема равны между собой в любой момент времени, то это поле температур называют *равномерным*. Температурное поле в частном случае может зависеть только от одной координаты, тогда его называют *одномерным*; аналогичный смысл имеют термины «двухмерное поле» и «трехмерное поле» температур.

Если тела находятся при различных температурах, то возникает поток теплоты, направленный от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой. Для количественного описания этого процесса вводят два основных понятия – «изотермическая поверхность» и «градиент температур».

*Изотермической поверхностью* называют геометрическое место точек, имеющих одинаковую температуру. По определению через каждую точку внутри тела можно провести в данный момент времени только одну изотермическую поверхность. На [рис. 11.4](#) линиями  $S_1, S_2$  на плоскости чертежа изображены следы различных изотермических поверхностей в фиксированный момент времени, называемые *изотермами*. В любом другом направлении, не совпадающем с изотермой, температура меняется. Причем в направлении нормали к изотермической поверхности наблюдается наиболее резкое изменение температуры. Возрастание температуры в направлении нормали к изотермической поверхности характеризуется отношением изменения температуры  $\Delta t$  между выбранными изотермами к расстоянию между ними по нормали  $\Delta n$ . Предел этого отношения при  $\Delta n \rightarrow 0$  называется *градиентом температуры* ( $\text{grad } t$ ). Иными словами, **градиент температуры есть вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры**, т. е.

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \vec{n}_0 \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t, \quad (11.9)$$

где  $n_0$  – единичный вектор, направленный по нормали в сторону возрастания температуры;  $\frac{\partial t}{\partial n}$  – производная температуры по направлению нормали.

За положительное направление градиента температуры принимают направление, в котором температура возрастает. Линии, перпендикулярные изотермическим поверхностям, называют *линиями теплового потока* или *линиями тока* ([рис. 11.4](#)).

Изменение количества теплоты  $dQ$  за время  $dt$  называют *тепловым потоком* (тепловой мощностью). Тепловой поток, отнесенный к элементу площади  $dA$ , называют *плотностью теплового потока*:

$$q = \frac{dQ}{dA d\tau}. \quad (11.10)$$

Количественную связь между тепловым потоком и градиентом температур устанавливает закон Ж. Фурье, положенный в основу аналитической теории теплопроводности: **плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры**, т. е.

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad } t = -\lambda \nabla t = -\lambda \vec{n}_0 \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (11.11)$$

где  $\lambda$  – коэффициент пропорциональности, называемый *теплопроводностью*; grad,  $\nabla$  – математические символы, обозначающие градиент.

Градиент температуры можно представить в виде векторной суммы составляющих по осям декартовых координат:

$$\text{grad } t = \vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z}, \quad (11.12)$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – ортогональные между собой единичные векторы, направленные по координатным осям.

Рассмотрим стационарное одномерное поле температур, изменяющееся лишь в одном направлении. Математическая формулировка этих условий имеет вид  $\partial t / \partial x \neq 0$ ;  $\partial t / \partial y = \partial t / \partial z = 0$ ;  $\partial t / \partial \tau = 0$ .

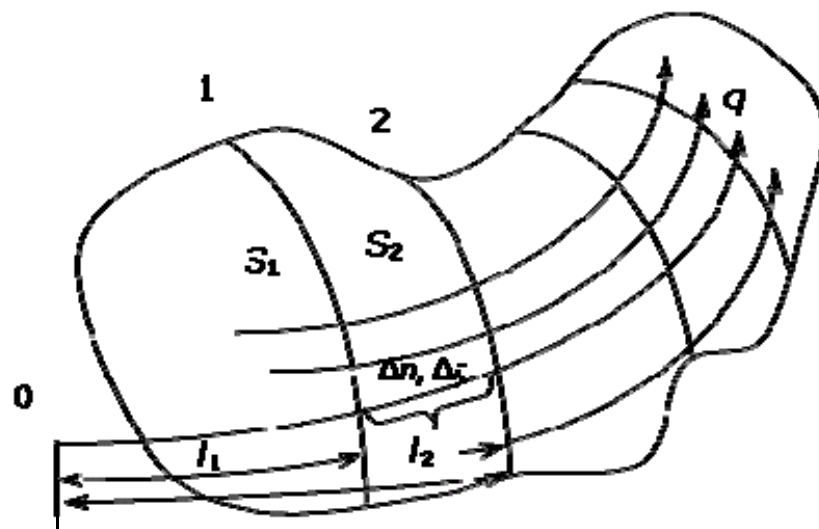


Рис. 11.4. Изотермические поверхности  $S$  и линии теплового потока  $q$  в теле

Пусть кроме этого градиент температур  $\partial t / \partial x$  будет постоянным, т. е. температура изменяется с координатой  $x$  линейно. Тогда

$$\partial t / \partial x = (t_2 - t_1) / (x_2 - x_1) = \text{const}, \quad (11.13)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – значения температур на поверхностях  $x_1$  и  $x_2$ , причем  $t_1 > t_2$ ,  $x_2 > x_1$ .

## 11.5. Системы охлаждения электронных средств

**Система охлаждения ЭС** – это совокупность устройств и конструктивных элементов, применяемых для обеспечения нормального теплового и влажностного режимов ЭС. Выделяют следующие виды систем охлаждения (СО): воздушные ([рис. 11.5, а–д](#)), жидкостные ([рис. 11.5, е–з](#)), испарительные ([рис. 11.5, и, к](#)), кондуктивные, радиационные, специальные и комбинированные.

**Воздушные системы охлаждения.** В воздушных СО в качестве теплоносителя используется воздух. При этом различают свободное воздушное охлаждение, внутреннее перемешивание воздуха в корпусе аппарата, свободную и принудительную вентиляцию.

На [рис. 11.5, а](#) схематически представлено свободное воздушное охлаждение, на [рис. 11.5, б](#) – свободная вентиляция. На [рис. 11.5, в](#) приведена возможная схема реализации внутреннего перемешивания воздуха в ЭС, на [рис. 11.5, г, д](#) – принудительная вентиляция, которая может быть приточно-вытяжной, приточной или вытяжной.

Приточная вентиляция осуществляется нагнетанием в корпус ЭС охлажденного и очищенного воздуха, вытяжная – вытягиванием из ЭС нагретого воздуха. В первом случае вентилятор работает в более холодном и, следовательно, более плотном воздухе, поэтому приточная вентиляция эффективнее вытяжной. В приточно-вытяжной вентиляции нагнетание холодного и вытяжка нагретого воздуха осуществляются двумя вентиляторами.

**Жидкостная и испарительная системы охлаждения.** На [рис. 11.5, е, ж, и](#), изображены ЭС, внутренний объем корпуса которых заполнен жидкостью, омывающей поверхность плат, шасси, деталей и т. п. Теплообмен между этими элементами и жидкостью может происходить как в обычных условиях (свободная и вынужденная конвекция), так и при кипении жидкости. Отвод теплоты от нагретой жидкости может быть осуществлен с помощью погруженного в жидкость змеевика с теплоносителем или теплообменников, установленных на корпусе аппарата.

На [рис. 11.5, з, к](#) схематически изображены системы жидкостного и испарительного охлаждения, в которых теплообмен между источниками теплоты  $P$  и жидкостью происходит в условиях вынужденной конвекции в замкну-

том контуре. Отвод теплоты от контура осуществляется с помощью теплообменника  $T$ , а движение жидкости – с помощью нагнетателя  $H$ .

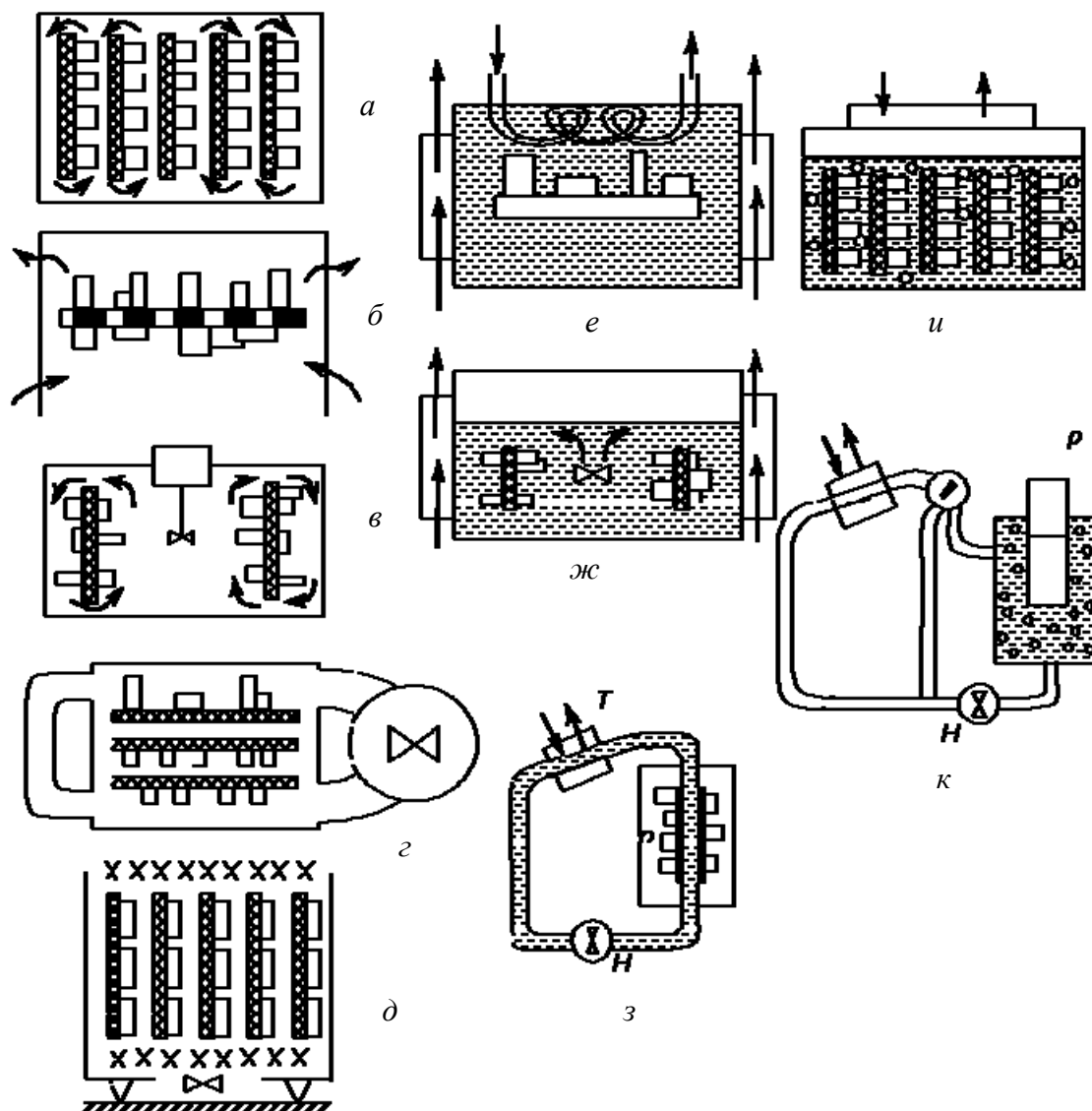


Рис. 11.5. Классификация систем охлаждения

**Кондуктивное охлаждение.** В кондуктивных системах охлаждения явление теплопроводности используется как основной механизм переноса тепловой энергии от источников к теплоприемникам, расположенным на периферии прибора.

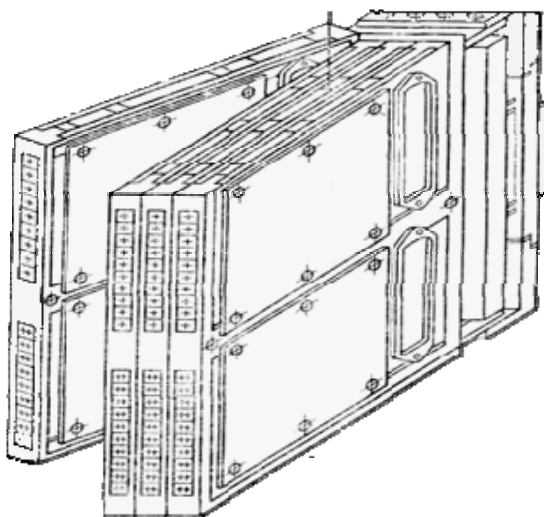


Рис. 11.6. Блок книжной конструкции с кондуктивным охлаждением

Кондуктивное охлаждение наиболее часто применяется в блоках с высокой плотностью монтажа. Один из возможных вариантов такой конструкции представлен на [рис. 11.6](#).

**Радиационные и специальные системы охлаждения.** В радиационных системах отвод теплоты осуществляется благодаря излучению. Обычно такие системы применяют в космических аппаратах или вакуумированных приборах.

К специальным системам охлаждения относят термоэлектрические устройства, вихревые и тепловые трубы, расширительные газовые машины.

При кратковременном режиме работы ЭС используются различного типа тепловые аккумуляторы – масса металлических конструкций (платы, радиаторы, корпус и т. п.), части конструкции, предназначенные для других целей (корпус космического корабля, топливо в баках самолета). Иногда применяют предварительное захлаживание таких аккумуляторов с помощью наземных охлаждающих устройств. В некоторых случаях для аккумуляции тепловой энергии применяются специальные вещества, поглощающие тепловую энергию в процессе фазовых превращений или химических реакций.

Способ охлаждения во многом определяет конструкцию ЭС, поэтому даже на ранней стадии проектирования, т. е. на стадии технического предложения или эскизного проекта, необходимо выбрать систему охлаждения ЭС. Неудачное решение этой задачи может обнаружиться только на более поздних этапах конструирования (детальная проработка конструкции, испытание опытного образца и т. п.) и свести на нет работу большого коллектива, а значит, существенно увеличить сроки создания ЭС.

## 11.6. Радиаторы

Для системы воздушного охлаждения широкое применение получили радиаторы, которые различаются по виду, развитой площади поверхности, а именно: пластинчатые ([рис. 11.7, а](#)), ребристые ([рис. 11.7, б](#)), игольчато-

штыревые (рис. 11.7, в), типа «краб» (рис. 11.7, з), жалюзийные (рис. 11.7, д), петельно-проволочные (рис. 11.7, е).

На рис. 11.7, а–з приведены геометрические параметры, существенно влияющие на рассеиваемый радиатором тепловой поток: размеры основания  $L_1$ ,  $L_2$  (при прямоугольном основании или диаметр  $D$  при круглом основании), толщина основания ( $h_1 - h_2$ ), высота  $h_1$  (или  $h_2$ ), толщина ребра  $\delta$  или штыря  $d$  и шаг  $S_1$  между ними.

Для петельно-проволочных радиаторов характерными геометрическими параметрами являются высоты  $h_2$  витка, диаметр  $d$  проволоки, шаг навивки  $S_2$ , шаг укладки  $S_i$  и коэффициент заполнения канала, равный отношению площади поперечного сечения спиралей к площади сечения канала. Значения указанных параметров для выпускаемых промышленностью радиаторов можно найти в нормативной документации.

Исследования теплообмена радиаторов различного типа позволили построить приближенную зависимость среднего перегрева  $\theta_S$  основания площадью  $A$  от удельной нагрузки  $q = \Phi/A$  (где  $A = L_1 L_2$  – для прямолинейного основания,  $A = \frac{\pi D^2}{4}$  – для круглого) при свободной и вынужденной вентиляции. График на рис. 11.8 и формулы (11.14) позволяют остановиться на том или ином типе радиатора, если заданы поверхностная плотность теплового потока  $q$  и допустимый средний перегрев  $\theta_S$  основания.

Для характеристики теплообменных свойств радиатора используют следующие параметры: эффективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{эфф}}$ , тепловую проводимость  $\sigma_\Sigma$ , тепловое сопротивление  $R_\Sigma$ . Эти параметры связаны со средним перегревом  $\theta_S$  основания, рассеиваемым потоком  $\Phi$  зависимостями

$$\alpha_{\text{эфф}} A = \theta_\Sigma = R_\Sigma^{-1},$$

$$A = L_1 L_2, \quad A = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (11.14)$$

$$\Phi = \sigma_\Sigma \theta_S = R_\Sigma^{-1} \theta_S = \alpha_{\text{эфф}} \theta_S A,$$

где  $L_1$ ,  $L_2$  – размеры основания прямоугольного радиатора;  $D$  – диаметр круглого основания.



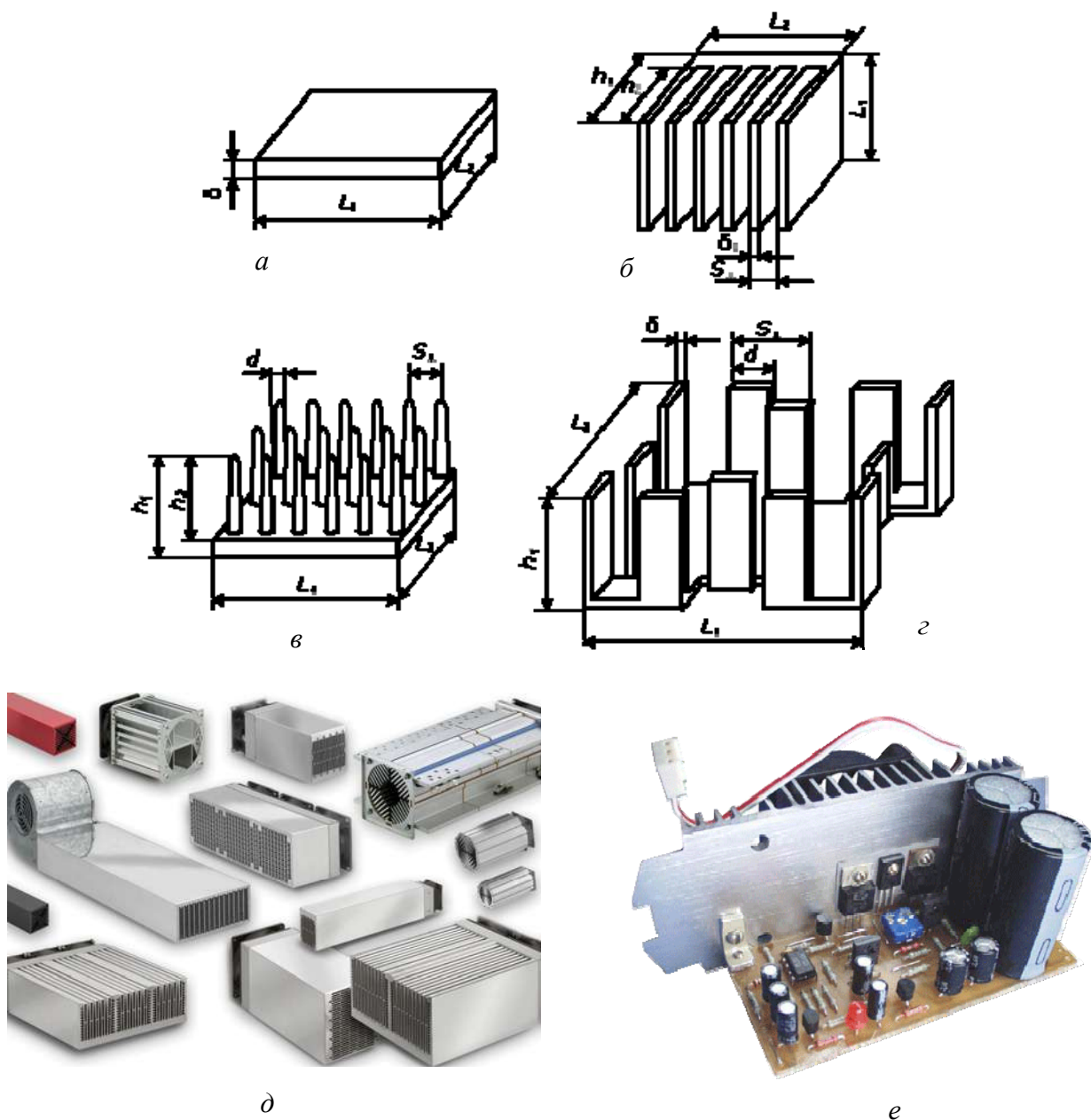


Рис. 11.7. Радиаторы воздушного охлаждения: а–г – схематичное изображение радиаторов; д, е – представленный внешний вид

Формула (11.14) справедлива для радиатора любого из рассмотренных выше типов. Вся сложность процессов переноса теплоты и конструктивные особенности радиатора характеризуются одной величиной – эффективным коэффициентом теплоотдачи. Последний может быть определен экспериментально или расчетным путем. В первом случае в основу положена зависимость (11.14), позволяющая по найденным из опыта значениям  $\Phi$  и  $\vartheta_s$  определить  $\alpha_{\text{эфф}}$ .

Рассмотрим теперь на примере пластинчатых, ребристых и игольчатостыревых конструкций радиаторов расчетный метод определения параметров  $\alpha_{\text{эфф}}$ ,  $\sigma_{\Sigma}$  или  $R_{\Sigma}$ . Необходимость анализа процесса теплообмена радиато-



ров связана с непрерывным изменением выпускаемых промышленностью типоразмеров радиаторов.

Представим тепловую модель одиночного ребра или штыря в виде стержня произвольного сечения  $f$  с периметром  $U$  и длиной  $h$ , находящегося в среде с температурой  $t_c$  и коэффициентом теплоотдачи с боковой поверхности  $a$ . Перегрев  $\theta_i$  торца стержня  $i$ , в который входит поток  $\Phi_i$ :

$$\theta_i = \left[ \frac{\Phi_i}{\lambda f b} \right] \operatorname{ctg} bh';$$

$$b^2 = \frac{\alpha U}{\lambda f}, \quad (11.15)$$

$$h' = h + \frac{f}{U}.$$

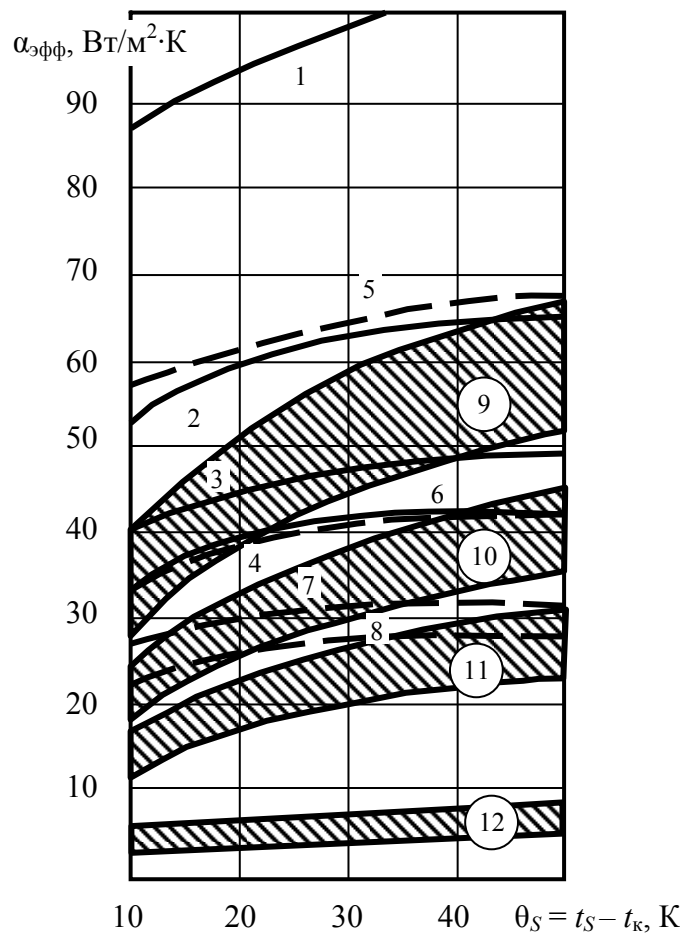


Рис. 11.8. Эффективный коэффициент теплопередачи

Тепловое сопротивление  $R_i$  одиночного стержня на основании этой зависимости и формулы (11.14)

$$R_i = \sigma_i^{-1} = \frac{\theta_i}{\Phi_i} = \frac{\operatorname{ctg} bh'}{\lambda fb}. \quad (11.16)$$

Общая проводимость  $\sigma_{\Sigma p}$  оребренной части радиатора равна сумме проводимостей  $\sigma_i$  всех  $N$  ребер:

$$\sigma_{\Sigma p} = \sum_{i=1}^N \sigma_i.$$

Если проводимость от неоребренной части радиатора равна  $\sigma_{н.р.}$ , то общая проводимость радиатора

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{н.р.} + N\lambda fbthh'. \quad (11.17)$$

Параметр  $b$  содержит коэффициент теплоотдачи от боковой поверхности ребра или штыря, который определяется из соответствующих критериальных уравнений. В частности, для вынужденной конвекции воздушной среды может быть рекомендована формула

$$\operatorname{Nu} = \frac{\alpha L}{\lambda_{\text{в}}} = 0,21 \operatorname{Re}^{0,8}, \quad \operatorname{Re} = \frac{v_p L}{\nu_{\text{в}}}, \quad (11.18)$$

где  $\operatorname{Nu}$  – число Нуссельта, безразмерная величина, характеризующая интенсивность конвективного теплообмена между поверхностью тела и потоком жидкости;  $L$  – определяющий размер для данного вида оребрения;  $\lambda_{\text{в}}$ ,  $\nu_{\text{в}}$  – теплопроводность и кинематическая вязкость воздуха при средних значениях температур;  $v_p$  – расчетная скорость движения воздуха для данного вида оребрения.

Особенности теплообмена радиатора должны учитываться при выборе параметров  $L$  и  $v_p$ : для ребристых поверхностей  $v_p = 1,25v$ ,  $L = L_1$ ; для игольчато-штыревых радиаторов  $L = d$ ,

$$v_p = vS_1/(S_1 - d),$$

где  $v$  – средняя скорость движения воздуха;  $S_1$  – шаг оребрения;  $d$  – диаметр штыря.

**Выбор радиатора.** На рис. 11.9 схематически изображен радиатор 1 с закрепленным на нем прибором 2, внутри которого имеются источники мощ-

ностью  $\Phi$ , разогревающие рабочую область прибора (например, область  $p$ – $n$ -перехода) и его корпус до температур  $t_p$  и  $t_k$ ; в месте крепления прибора к радиатору температура  $t_{и}$ , а средняя температура основания радиатора –  $t_s$ .

Приведем перечень исходной информации, которая должна быть известна при проектировании или выборе радиатора:

предельно допустимая температура рабочей области прибора  $(t_p)_{\text{доп}}$  или его корпуса  $(t_k)_{\text{доп}}$ ;

рассеиваемая прибором мощность  $\Phi$ ;

температура  $t_c$  окружающей среды или набегающего потока;

внутреннее тепловое сопротивление  $R_{\text{вн}}$  прибора между рабочей областью и корпусом;

способ крепления прибора к радиатору, который характеризуется тепловым сопротивлением  $R_k$  контакта.

Проектируемый радиатор должен удовлетворять некоторым дополнительным требованиям: иметь малую массу и габариты, выполнять свои функции при наименьшем расходе воздуха, если требуется принудительное охлаждение, и т. п.

На [рис. 11.9](#) представлена схема соединения тепловых сопротивлений между рабочей областью и окружающей средой, из которой следует:

$$t_p - t_c = (t_p - t_k) + (t_k - t_{и}) + (t_{и} - t_c),$$

$$t_{и} - t_c = (t_p - t_c) - \Phi(R_{\text{вн}} - R_k).$$
(11.19)

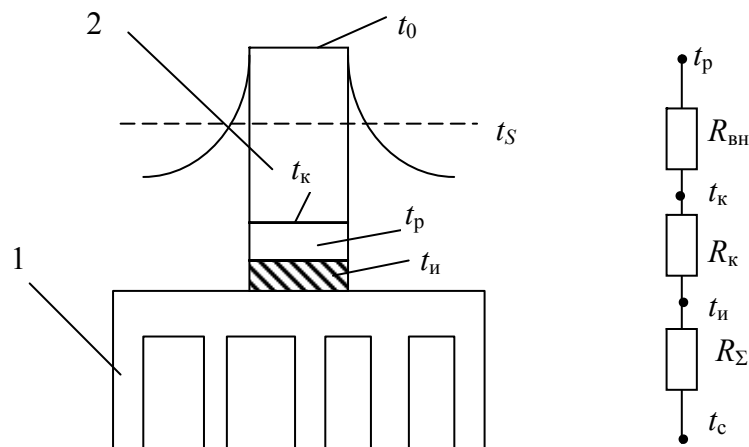


Рис. 11.9. Температурное поле радиатора и прибора

Введем безразмерную величину  $\beta$ , связывающую среднюю температуру  $t_s$  основания радиатора и температуру  $t_{и}$  в месте крепления прибора к радиатору:

$$\beta = (t_{\text{и}} - t_{\text{с}})/(t_{\text{с}} - t_{\text{с}}) = f(B, \sqrt{A_{\text{и}}/A_{\text{р}}}). \quad (11.20)$$

Из формул (11.19) и (11.20) получаем

$$t_{\text{с}} - t_{\text{с}} = \left[ (t_{\text{р}} - t_{\text{с}}) - \Phi(R_{\text{вн}} + R_{\text{к}}) \right] / \beta. \quad (11.21)$$

Все параметры, входящие в квадратные скобки формулы (11.21), заданы, а параметры  $(t_{\text{с}} - t_{\text{с}})$  и  $\beta$  неизвестны. Дальнейший подбор радиатора может быть осуществлен с помощью формул (11.14), (11.21) на основе метода последовательных приближений. В первом приближении задают значение  $\beta^{\text{I}} = 1,2$  и по формуле (11.21) определяют  $(t_{\text{с}}^{\text{I}} - t_{\text{с}})$ , затем в первом приближении задают площадь  $A_{\text{с}}^{\text{I}}$  основания радиатора. Зная  $\Phi$ ,  $A_{\text{с}}^{\text{I}}$  и  $(t_{\text{с}}^{\text{I}} - t_{\text{с}})$ , по формуле (11.14) находят в первом приближении эффективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{эфф}}$ .

Далее переходят ко второму приближению расчетов: находят безразмерные числа  $\beta = \alpha_{\text{эфф}} A_{\text{р}} / (\lambda \delta)$ ,  $A_{\text{и}}/A_{\text{р}}$  и уточняют по формуле (11.19) значение  $(t_{\text{с}} - t_{\text{с}})$ . Затем примерно по предыдущей схеме уточняют геометрические параметры радиатора, причем стремятся уменьшить его массу, габариты и т. п.

## 11.7. Тепловые трубы

**Принцип действия и основные характеристики тепловых труб.** *Тепловая труба* (ТТ) – устройство, передающее большие тепловые мощности при малых перепадах температуры (за счет использования скрытой теплоты фазового превращения теплоносителя, помещенного внутри герметичного объема).

На [рис. 11.10](#) представлено схематическое изображение ТТ в форме круглого полого цилиндра  $l$  с большим отношением длины  $L$  к диаметру  $d$ . Внутренняя поверхность трубы выложена капиллярно-пористой структурой 2, последняя насыщена смачивающей жидкостью и граничит с паровым объемом  $z$  – центральной частью трубы радиуса  $r_{\text{п}}$ . Капиллярно-пористая структура может представлять собой металлическую сетку, спеченные шарики, металловолокна, стеклоткани и даже систему канавок на внутренней поверхности корпуса  $l$ . Смачивающая жидкость является теплоносителем. В зависимости от уровня температуры в зоне  $a$  источника в качестве теплоносителя выбираются жидкие металлы, ртуть, аммиак, вода, ацетон, спирты, фреоны и т. п.: при температурах свыше 750 К используются жидкие металлы; для диапазона  $550 \leq T \leq 750 \text{ К}$  – ртуть (высокотемпературные ТТ); в области среднего диапазона температур  $200 \leq T \leq 550 \text{ К}$  в качестве теплоносителя используются органические жидкости, вода (низкотемпературные ТТ); при температурах ниже 200 К – сжиженные газы (криогенные ТТ). При подводе теплового потока  $\Phi_{\text{п}}$  к испарительной зоне  $a$  теплоноситель в этой части капиллярно-

пористой системы начинает испаряться и пары, пройдя транспортную зону  $b$ , поступают в противоположный конец трубы  $e$  – в конденсационную зону, где отводится теплота. Здесь пар конденсируется и жидкость под действием капиллярных сил снова поступает по фитилю в зону испарения.

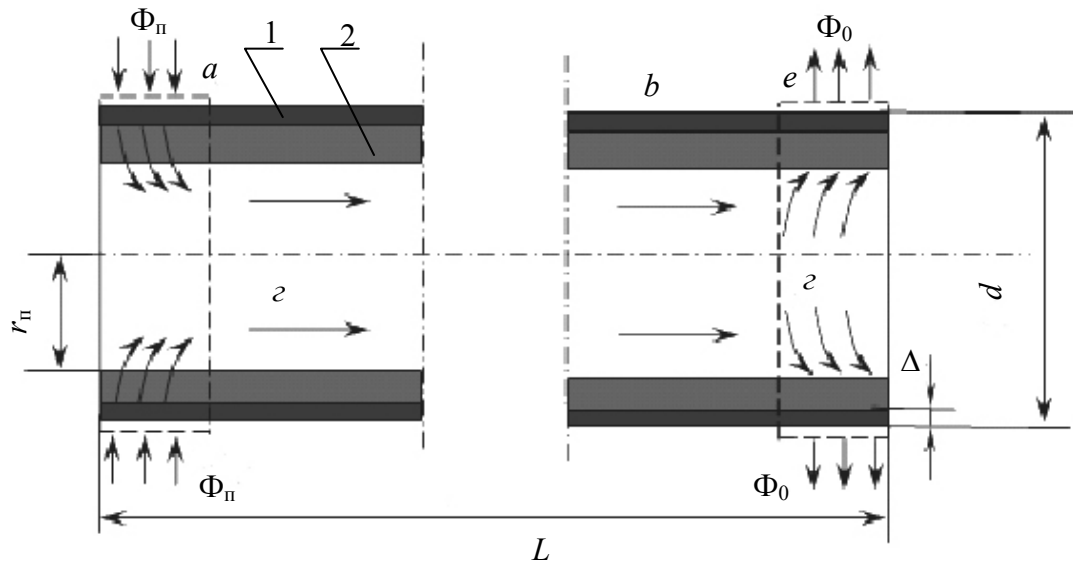


Рис.11.10. Схема тепловой трубы

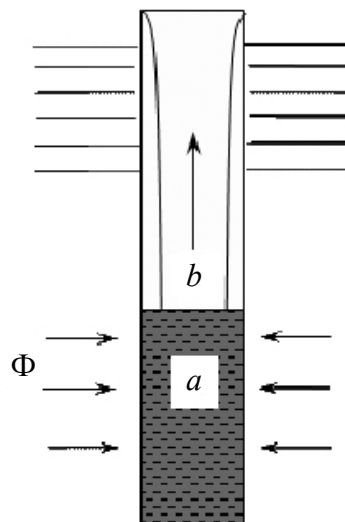


Рис. 11.11. Схема термосифона:  $a$  – зона испарения (в которой находится жидкость);  
 $b$  – зона конденсации (происходит испарение пара и возврат жидкости)

При конденсации пара выделяется поток  $\Phi_0$ , который отводится в теплообменник. Между зонами испарения и конденсации возникают небольшие температурные градиенты, а боковая поверхность цилиндра  $l$  в транспортной зоне  $b$  практически не меняет температуру, поэтому можно считать, что через зону  $b$  переносится весь поток  $\Phi$ , т. е.  $\Phi = \Phi_{\text{п}} = \Phi_0$ .

На [рис. 11.11](#) представлена схема гравитационного термосифона, в котором в отличие от тепловых труб возврат конденсата происходит под действием сил гравитации. Необходимым условием работы термосифонов является наличие гравитационных сил и расположение зоны конденсации  $b$  над испари-

тельной зоной  $a$ . Тепловые трубы могут иметь различные формы и конфигурации, обычно они стандартизованы по типоразмерам и функциональному назначению или специально изготовлены для охлаждения конкретного объекта.

Физические процессы и особенности конструкций ТТ придают им ряд особых качеств. Прежде всего в ТТ возможно транспортировать тепловые потоки порядка  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  Вт/м<sup>2</sup>, а также разветвлять тепловой поток по нескольким каналам. Низкое тепловое сопротивление транспортной зоны приводит к большой эффективной теплопроводности ТТ, которая в несколько раз превышает теплопроводность меди и серебра. Тепловая труба способна работать в любом положении вне зависимости от ориентации в пространстве и гравитации. Кроме того, при циркуляции теплоносителя внутри ТТ отсутствуют движущиеся детали, насос, а само устройство автономно.

Тепловые трубы принято характеризовать тремя группами параметров: теплофизических, конструктивных и стыковочных.

*К теплофизическим параметрам* относятся тепловой поток, передаваемый с помощью ТТ от источника теплоты в теплообменник при заданных условиях эксплуатации; уровень рабочих температур; термическое сопротивление  $R$  тепловой трубы, равное отношению разности среднеповерхностных температур стенок зоны испарения  $t_{\text{исп}}$  и конденсации  $t_{\text{кон}}$  к переносимому тепловому потоку.

*Конструктивные параметры* определяют внешние и внутренние особенности конструкции ТТ, а именно: конфигурацию и наружные размеры корпуса, испарительной, конденсационной и транспортной зон, толщину и материал стенок корпуса, устройство фитиля.

*Стыковочные параметры* характеризуют условия эксплуатации аппаратуры и способы сочетания последней с ТТ, например способ передачи теплоты от источника к ТТ, конструктивное оформление областей контакта в испарительной и конденсационной зонах, термическое сопротивление контакта.

**Примеры применения тепловых труб в ЭС.** В электронных средствах тепловые трубы могут выполнять ряд функций: с их помощью теплоотдающая поверхность может быть вынесена за пределы основных функциональных блоков и узлов; тепловые трубы позволяют создавать внутри приборов области сравнительно равномерного температурного поля и тем самым снижать механические напряжения, решать задачи термостабилизации и др.

В настоящее время известны примеры использования ТТ для охлаждения как отдельных теплонагруженных элементов и узлов, так и целых радиоэлектронных блоков и устройств. Рассмотрим некоторые примеры.

Пусть весь прибор охлаждается благодаря свободной вентиляции, но при этом возникает необходимость размещения внутри прибора теплонагруженного элемента или блока, требующего для нормальной работы принудительной вентиляции ([рис. 11.12, а](#)), а место для размещения вентилятора отсутствует. В этом случае с помощью ТТ тепловой поток может быть отведен на часть обремененного корпуса прибора ([рис. 11.12, б](#)).

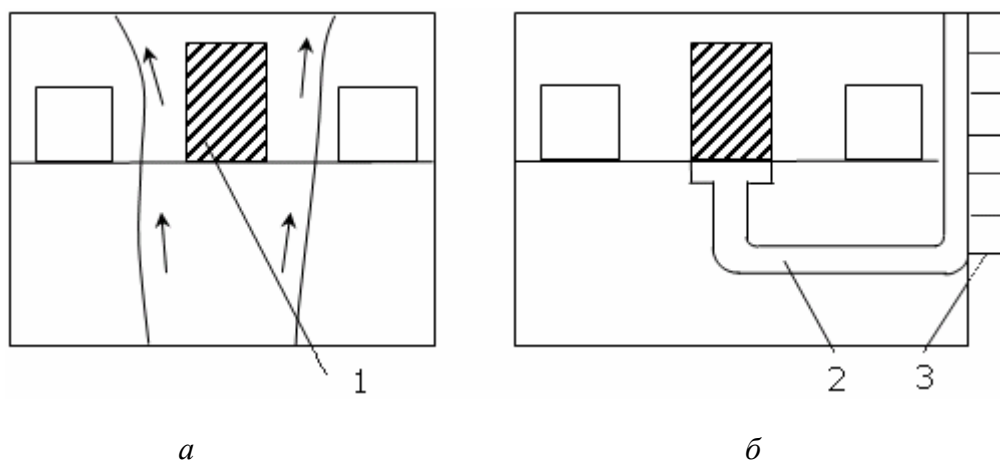


Рис. 11.12. Охлаждение отдельного теплонагруженного блока или элемента:  
*а* – в условиях свободной вентиляции; *б* – с помощью ТТ;  
*1* – теплонагруженный элемент; *2* – тепловая труба; *3* – наружное оребрение корпуса

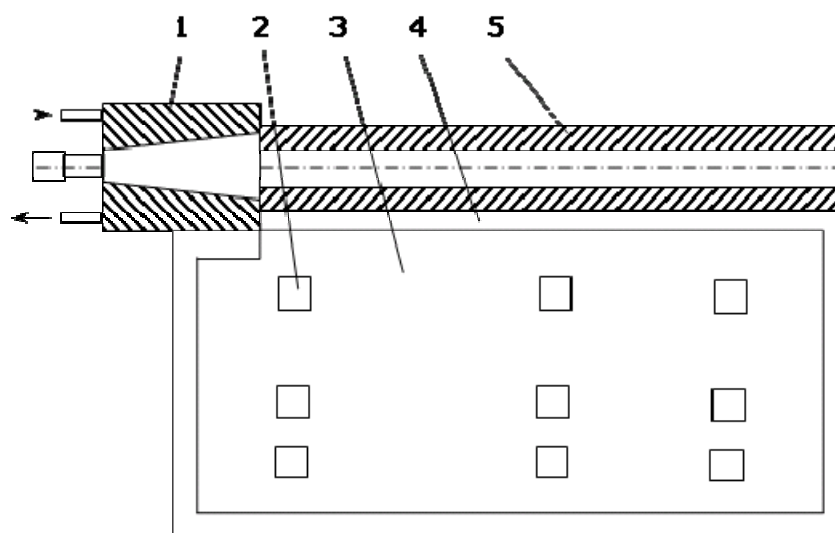


Рис. 11.13. Охлаждение платы с микросхемами при помощи ТТ

На [рис. 11.13](#) показано одно из возможных решений отвода теплоты от платы с микросхемами: от микросхем *2* тепловой поток через монтажную плату *3* передается к металлической рамке *4*, в часть которой встроена тепловая труба *5*; зона конденсации выполнена в виде конуса, плотно вставленного в конусное отверстие теплообменника *1*. Такое решение позволяет избежать непосредственного омывания жидкостью конструкций ЭС.

Тепловые трубы используются также для охлаждения целых радиоэлектронных блоков, в аппаратуре с упорядоченной структурой элементов, во вторичных источниках питания. Применение ТТ в таких системах позволяет эффективно использовать корпус прибора как внешнюю поверхность теплообмена, увеличить компактность прибора, исключить контакт охлаждающей среды с элементами.

## Контрольные вопросы

1. Какими способами осуществляется перенос тепла?
2. Что такое кондукция?
3. Что такое конвекция?
4. Что такое градиент?
5. Сформулируйте закон Планка.
6. Сформулируйте закон Ньютона – Рихмана.
7. Что такое диффузия?
8. Перечислите разновидности систем охлаждения.
9. Как выбирается система охлаждения для ЭС?
10. Перечислите виды радиаторов.



## **12. ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

[12.1. Характеристика механических воздействий.](#)

[12.2. Виды и источники эксплуатационных механических воздействий.](#)

[12.3. Динамические характеристики, виды отказов и нарушения функционирования электронных средств при механических воздействиях.](#)

[12.4. Классификация и эффективность существующих методов защиты от механических воздействий.](#)

[Контрольные вопросы.](#)

[Л и т е р а т у р а: \[11, 14, 15\].](#)

### **12.1. Характеристика механических воздействий**

**Механическое воздействие (МВ) – это передаваемое на конструкцию аппаратуры и ее элементы некоторое количество механической энергии определенного спектрального состава за счет действия на конструкцию внешних или внутренних сил, приводящее к изменению исходного состояния конструкции.**

Анализируя данное определение, можно выделить два момента:

- МВ только тогда считается воздействием, когда оно приводит к изменению исходного состояния конструкции аппаратуры, т. е. состояние механического покоя – в состояние возбуждения;
- МВ, приводя механическую силу конструкции в состояние возбуждения, передает ей некоторое количество механической энергии определенного спектрального состава, причем количество переданной энергии и ее спектральный состав определяют уровень и характер возбуждения конструкции аппаратуры. Допустимые уровни механического возбуждения конструкции определяются ее прочностью, стойкостью и устойчивостью к МВ.

### **12.2. Виды и источники эксплуатационных механических воздействий**

В зависимости от временной функции, описывающей МВ, и среды, через которую они передаются, различают следующие виды механических воздействий: вибрацию, удар, линейные ускорения, акустические шумы, давление, комбинированные воздействия.

Указанные воздействия обычно относят к эксплуатационным (или транспортным), поскольку их действию конструкция аппаратуры подвергается в процессе эксплуатации на объекте установки.

**Вибрация** является наиболее распространенным видом МВ. Практически при любом транспортировании аппаратура подвергается воздействию вибрации.

На объекте установки аппаратуры вибрация обычно возникает за счет работы различных двигателей и механизмов, в которых имеются вращающиеся элементы или элементы знакопеременного движения, несбалансированные относительно своего центра масс. К ним могут относиться, например, турбины, электромоторы, вентиляторы, кулисные, рычажные, кулачковые и другие механизмы ([рис. 12.1](#)).

На аппаратуру могут действовать мощные знакопеременные электромагнитные поля, вызывающие локальную вибрацию ее отдельных частей или элементов за счет электромагнитных взаимодействий ([рис. 12.2](#)). Знакопеременные электромагнитные поля могут создавать электромоторы, трансформаторы, умформеры, электромашинные усилители и др.

Указанные источники вибрации относятся к внутренним источникам, поскольку они присущи данному объекту установки аппаратуры. Проявление их действия на аппаратуру желательно выявить и прогнозировать еще на этапе проектирования.

В отличие от внутренних внешние источники вибрации зависят от параметров среды, в которой происходит транспортирование объекта установки аппаратуры, скорости транспортирования и взаимодействия среды с объектом установки. Например, при движении транспортного средства по поверхности грунта транспортируемая аппаратура будет испытывать действие вибрации. Характер вибрации, ее амплитуда и частота зависят от многих факторов, в частности от характера неровностей грунта, скорости перемещения, жесткости рессор транспортного средства, жесткости системы виброизоляции самой аппаратуры, наличия ветра и других факторов ([рис. 12.3](#)).

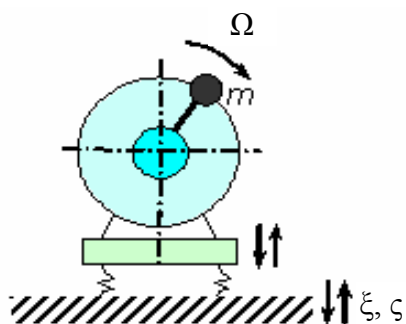


Рис. 12.1. Возбуждение вибрации за счет вращения несбалансированной массы

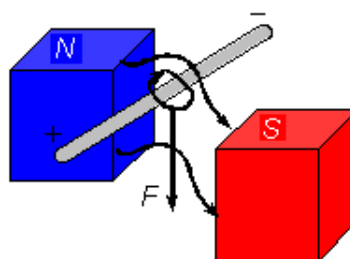


Рис. 12.2. Возбуждение вибрации за счет электромагнитных взаимодействий

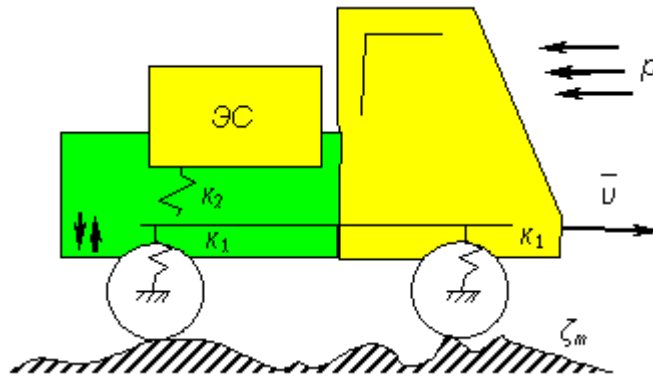


Рис. 12.3. Вибрация, возникающая при движении транспортного средства по поверхности грунта:  $\vec{V}$  – вектор скорости движения;  $p$  – давление ветра;  $\zeta$  – амплитуда неровностей грунта;  $k_1$  – жесткость рессор;  $k_2$  – жесткость системы виброизоляции аппаратуры

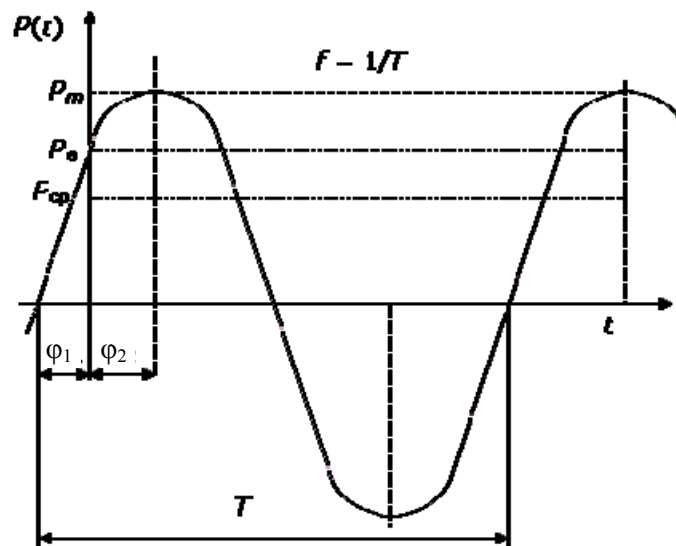


Рис. 12.4. Параметры гармонического вибрационного процесса

В соответствии с ГОСТ 24346 *вибрацией* называют движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин. Обычно при колебательном движении рассматриваемые точки материальных тел или среды перемещаются последовательно в одну и другую сторону от некоторого среднего положения.

Перемещение как параметр МВ представляет интерес в тех случаях, когда необходимо знать относительное смещение элемента конструкции или его деформацию ([рис. 12.4](#)). Если следует определить величину импульса  $\bar{P}(t)$  тела или передаваемую на конструкцию кинетическую энергию  $E_k$ , то используют скорость вибрации  $\vec{v}(t)$ . Основным измеряемым параметром чаще является виброускорение  $\vec{w}(t)$ , так как оно позволяет непосредственно оценить величину силы  $F(f)$ , прикладываемой к элементу конструкции.

**Удар** обычно проявляется в однократном движении элементов конструкции, которое характеризуется одним моментом его возникновения и одним моментом окончания. Действие механического удара конструкция может испытывать по-разному. В одном случае действие удара может происходить при ударных взаимодействиях какого-либо тела с поверхностью конструкции (локальное действие удара), и тогда ударное механическое движение будет передаваться от частей, непосредственно воспринявших удар, к другим частям конструкции. В другом случае аппаратура может испытывать состояние резкого разгона или торможения, тогда все элементы конструкции ускоряются и тормозятся одинаково. Но действие удара будет зависеть от инерционных и упругих свойств различных элементов конструкции.

Источники ударного МВ могут находиться непосредственно на объекте установки аппаратуры или быть внешними по отношению к нему. К внутренним источникам можно отнести устройства и механизмы ударного действия, электромеханические контактные устройства, пневматические и гидравлические устройства, устройства разгона и торможения, пиротехнические устройства взрывного действия и др. Действие внешних источников обусловлено взаимодействием объекта установки аппаратуры с внешней средой: удары волн, порывы ветра, действие взрыва, перемещения со сверхзвуковыми скоростями, падения аппаратуры на грунт или воду и др. Среди внешних источников удара можно выделить и такие, действие которых проявляется в результате преобразования одного вида энергии в энергию МВ. К ним можно отнести тепловой удар при резком скачке температуры или действие электромагнитных излучений (ЭМИ).

Интенсивность ударного воздействия зависит от формы, амплитуды и длительности ударного импульса ([рис. 12.5](#)).

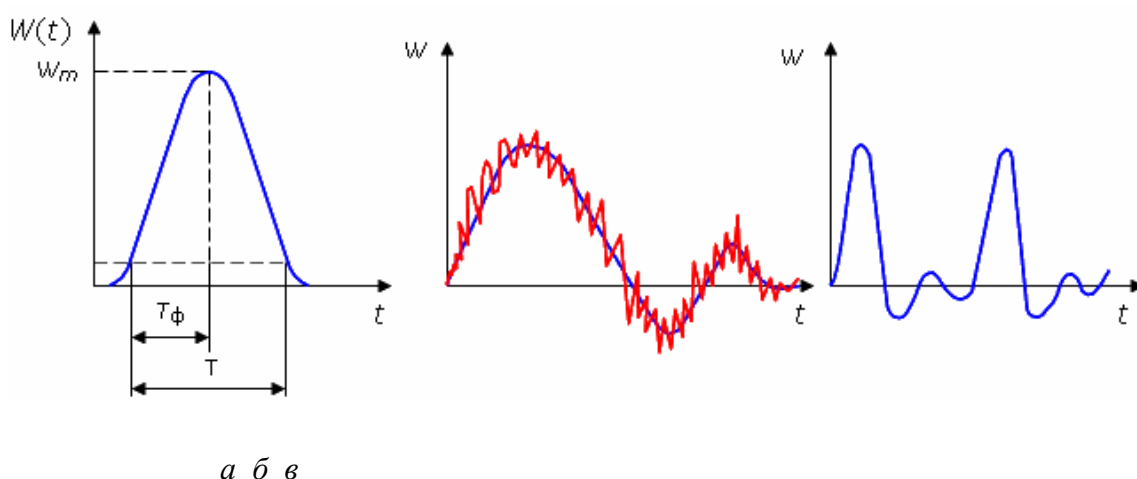


Рис. 12.5. Временные зависимости ударных процессов:

- а – ударный импульс простой формы;
- б – ударный импульс с наложенными колебаниями;
- в – последовательность ударных импульсов

*Формой ударного импульса* называется зависимость ударного ускорения (ударной скорости, ударного перемещения, ударной деформации) от времени.

**Линейные ускорения** – вид механических воздействий, характерных для всех объектов, движущихся с переменной скоростью (например, при разгоне или торможении). Влияние линейных ускорений на элементы конструкции и ЭРЭ обусловлено инерционными силами, которые могут достигать и во много раз превышать силы тяготения.

Особенность действия линейных ускорений заключается в том, что возникающие инерционные силы являются всегда распределенными по объему конструкции.

**Акустические шумы** можно характеризовать как вибрационный волновой процесс, распространяющийся в газообразных, жидких и твердых средах и имеющий практически непрерывный частотный спектр.

Источником акустического шума чаще всего бывает вибрирующее твердое тело, механические колебания которого вызывают возбуждение звуковых волн в окружающей среде. Однако интенсивные акустические шумы могут генерироваться и непосредственно в газообразных и жидких средах вследствие различных физических явлений, происходящих в них. Примерами интенсивных акустических шумов природного происхождения являются грозовые разряды, во время которых генерируются также интенсивные ЭМИ.

Значительные акустические шумы возникают при работе реактивных двигателей, взрывах, стрельбе, движении транспортного средства со сверхзвуковыми скоростями и т. п. Однако конструктор ЭС должен иметь в виду, что действие акустических шумов может проявляться и в стационарной аппаратуре, например при работе электродинамических громкоговорителей. При этом может возникнуть так называемая *акустическая обратная связь*, приводящая к нарушению нормального функционирования аппаратуры.

Формой существования и распространения акустических шумов является, как было указано выше, *звуковая волна* – процесс распространения деформаций сжатия или разрежения в сплошной среде, происходящий с конечной скоростью (скоростью звука). Скорость звука зависит от параметров среды, в которой распространяется звуковая волна.

Звуковая волна может возникать и распространяться только в такой среде, которая обладает определенной упругостью (сжимаемостью) и инерционностью (плотностью). Реальная среда, кроме того, характеризуется еще и диссипативными свойствами, приводящими к потерям энергии волнового движения. Область среды, в которой возбуждены звуковые волны, называется *звуковым полем*.

**Давление** на конструкцию возникает, когда, например, внутри герметического корпуса аппаратуры имеет место разрежение или, напротив, повышение давления газовой среды.

Нормальное статическое давление атмосферы, под которым находится конструкция ЭС, составляет  $P_a = 1,013 \cdot 10^5$  Па. При работе ЭС в верхних слоях атмосферы или под водой конструкция аппаратуры будет испытывать статическое механическое воздействие, связанное с изменением внешнего давления на корпус ЭС. Величина давления может быть определена как  $P = F/S$ , где  $F$  – сила, перпендикулярная к поверхности и равномерно распределенная по площади  $S$  корпуса ЭС. При заданной величине давления можно определить распределенную силу, а по ней – и уровень деформации, который будет испытывать корпус ЭС.

Уровни пониженного атмосферного давления, задаваемые на бортовых ЭС, лежат в пределах  $(0-101) \cdot 10^3$  Па.

При погружении ЭС под воду на глубину 1 м дополнительный к атмосферному уровень давления на корпус составит  $\Delta P = 9,81 \cdot 10^3$  Па.

**Комбинированные, или комплексные, воздействия** представляют собой одновременное действие МВ с большим или меньшим преобладанием какого-либо их вида.

Характеристики такого МВ определяются путем векторного суммирования амплитуд единичных механических факторов при их одновременном действии на конструкцию.

Векторное суммирование единичных МВ в простых случаях может происходить вдоль одной координаты или в одной плоскости. В более сложных случаях векторное суммирование единичных МВ наблюдается по всем трем пространственным координатам.

По своему результату комбинированное МВ может оказаться более жесткой нагрузкой для аппаратуры, чем поочередное действие каждого единичного фактора. Одним из примеров комбинированного МВ является виброудар, представляющий собой ударный импульс с высокочастотным вибрационным заполнением.

### **12.3. Динамические характеристики, виды отказов и нарушения функционирования электронных средств при механических воздействиях**

Под действием собственного веса или веса установленных ЭРЭ некоторые элементы конструкции аппаратуры прогибаются. В них при определенных технологических операциях могут накапливаться остаточные механические напряжения. В этих случаях физическое состояние конструкции и ее элементов определяется статическими характеристиками: жесткостью, прочностью, уровнями статических деформаций (прогибов) и др.

В отличие от статических характеристик динамические характеристики конструкции и ее элементов проявляются только в процессе МВ. К динамическим

ческим характеристикам конструкции обычно относят: собственную частоту элементов конструкции, их механическую добротность, амплитуды перемещений, скорости и ускорения отдельных частей и элементов конструкции, амплитуды знакопеременных механических напряжений, поля распределения таких напряжений и другие характеристики, изменяющиеся в результате МВ.

Механические нагрузки различного характера (вибрационные, ударные и др.) могут приводить к взаимным перемещениям элементов аппаратуры за счет возникающих инерционных сил, что, в свою очередь, вызывает деформирование крепежных, несущих и других элементов аппаратуры ([рис. 12.6](#)).

Вид реакции аппаратуры и ее элементов на механические нагрузки определяется уровнем возникающих деформаций. При малых уровнях механических воздействий в элементах аппаратуры могут возникать упругие деформации. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к остаточным деформациям и механическим напряжениям. Увеличение нагрузки может привести к разрушению конструктивного элемента, которое наступает через определенное число циклов изменения нагрузки, зависящее от величины возникающего знакопеременного механического напряжения, или при достижении предельного уровня статического нагружения.

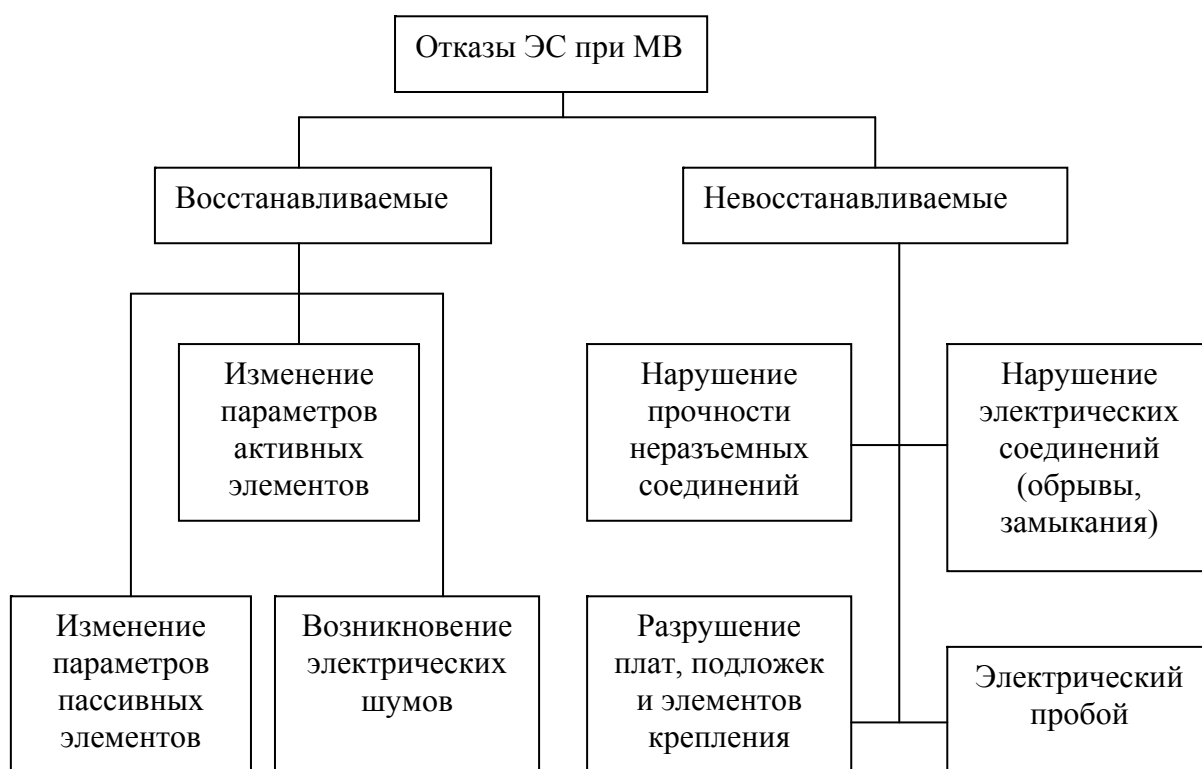


Рис. 12.6. Виды отказов аппаратуры при механических воздействиях

К причинам возникновения отказов и нарушений функционирования аппаратуры из-за механических воздействий можно отнести: обрывы проводников в платах; обрывы связей между слоями многослойных печатных плат; нарушение паяных, сварных и клеевых соединений; отрывы элементов и т. п.



Кроме чисто механических проявлений воздействия вибраций, ударов и акустических шумов в аппаратуре могут возникать электрические шумы за счет физических эффектов, вызванных преобразованием механической энергии, например, в электрическую или связанных с изменением параметров элементов. К подобным эффектам относят: тензоемкостный, тензорезистивный, пьезоэлектрический, электромагнитный и др.

## **12.4. Классификация и эффективность существующих методов защиты от механических воздействий**

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.

При проектировании ЭС прежде всего следует выяснить, нужны ли 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 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 более просты в исполнении и не требуют для выполнения своих функций затрат дополнительной энергии.

**Пассивные способы виброзащиты.** К таковым относят:

- увеличение жесткости;
- демпфирование;
- использование виброизоляторов.

Такая классификация позволяет более четко уяснить физическую сущность каждого способа виброзащиты и оценить его эффективность с помощью амплитудно-частотной характеристики. Так, виброзащита за счет увеличения жесткости конструктивных элементов блоков, которое можно обеспечить применением ребер жесткости, отбортовок, оптимизацией геометрических размеров и другими способами, может быть пояснена с помощью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), представленной на [рис. 12.7](#). Из АЧХ 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 значения



их собственных частот из диапазона частот воздействий, обеспечив выполнение соотношения  $f_0 \geq 2f_B$ .

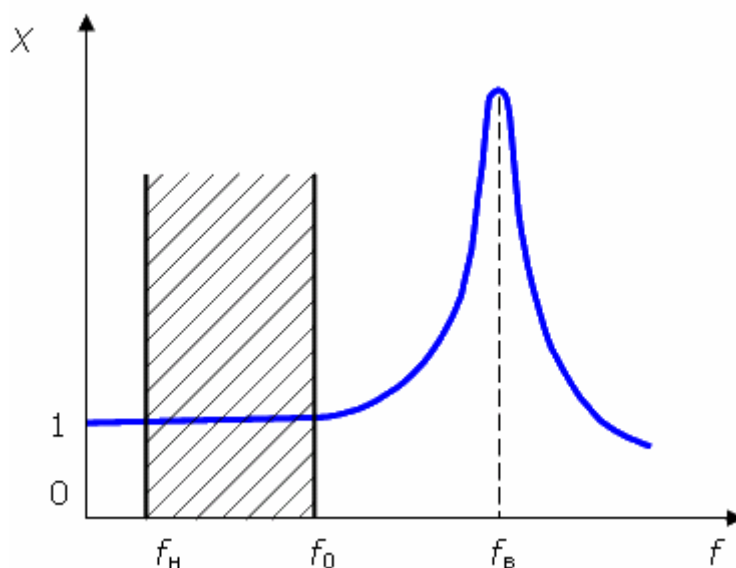


Рис. 12.7. Амплитудно-частотная характеристика при увеличении жесткости конструктивных элементов

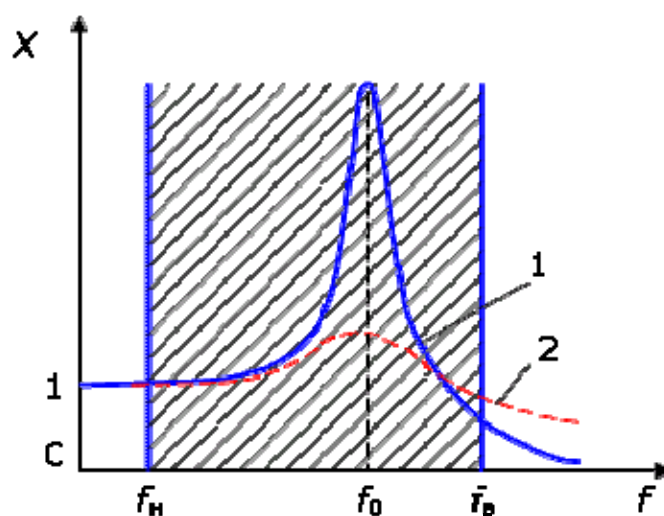


Рис. 12.8. Амплитудно-частотные характеристики при увеличении степени демпфирования конструктивного элемента: 1 – слабое демпфирование; 2 – увеличенное демпфирование

В качестве критерия оценки эффективности виброзащиты часто служит значение коэффициента динамического усиления защищаемого объекта в диапазоне частот воздействующих вибраций. Используя этот критерий, можно констатировать, что рассматриваемый способ виброзащиты обеспечивает значение коэффициента динамического усиления  $k \approx 1$ .

Практика проектирования печатных плат показывает, что без применения демпфирующих покрытий значения их собственных частот должны обычно находиться в пределах 500–800 Гц. В этих же пределах или выше их

должны быть значения собственных частот стенок корпусов аппаратуры, в которых монтируются платы. В наибольшей степени этим требованиям отвечают литые корпуса с ребрами жесткости.

Использование демпфирующих покрытий и слоистых конструкций пояснено амплитудно-частотной характеристикой, представленной на [рис. 12.8](#). 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  $k > 1$ , 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, 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.

Эффективность использования виброизоляторов пояснена амплитудно-частотной характеристикой, изображенной на [рис. 12.9](#). Данный способ виброзащиты наиболее эффективный из всех рассмотренных, так как только он обеспечивает получение значения коэффициента динамического усиления  $k < 1$ .

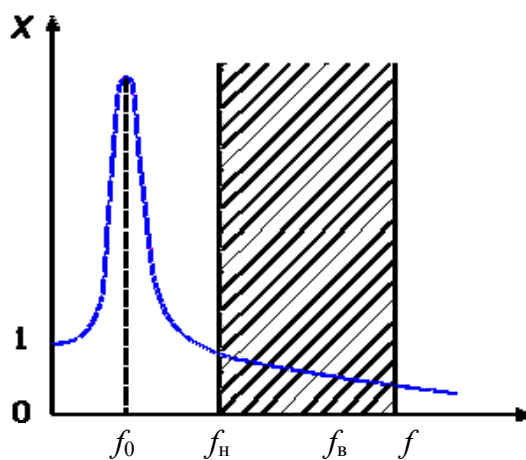


Рис. 12.9. Амплитудно-частотная характеристика виброизолированного объекта

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 динамического усиления; применение виброустойчивых и вибропрочных ЭРЭ, транзисторов и ИС, элементов компенсации виброшумов, гибких печатных плат и др. Все эти способы виброзащиты также относят к пассивным.

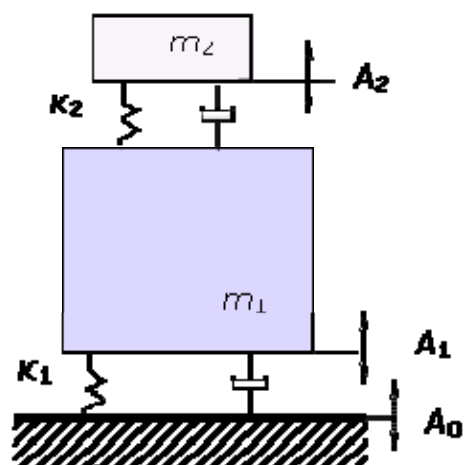


Рис. 12.10. Динамический виброгаситель

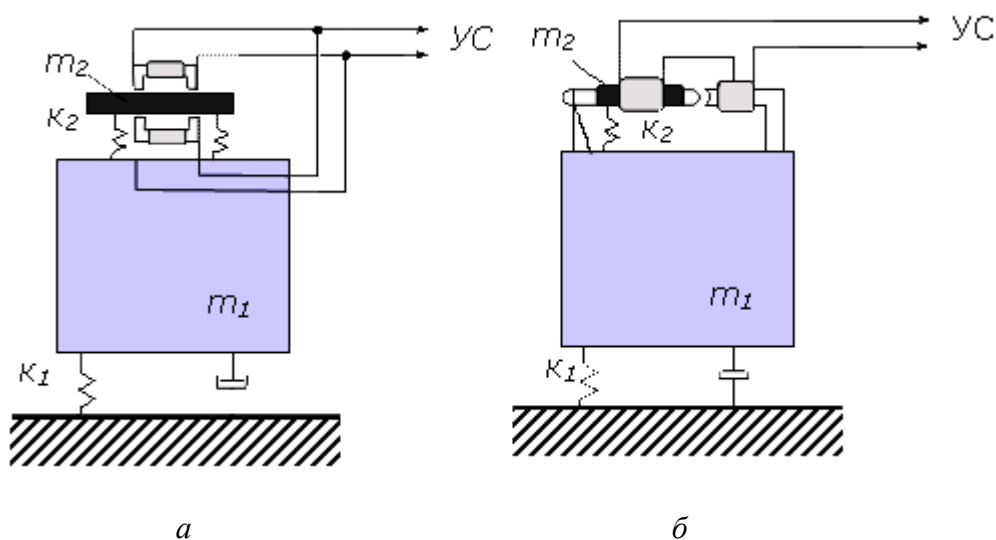


Рис. 12.11. Варианты электрических исполнительных устройств активной виброзащиты:  
*а* – с поступательными движениями динамического гасителя колебаний;  
*б* – с поворотным якорем

В последние годы большое внимание уделяется и так называемым активным способам виброзащиты. Активная система виброзащиты строится, как правило, на основе динамического гасителя колебаний с регулированием величины его упругой связи. 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.

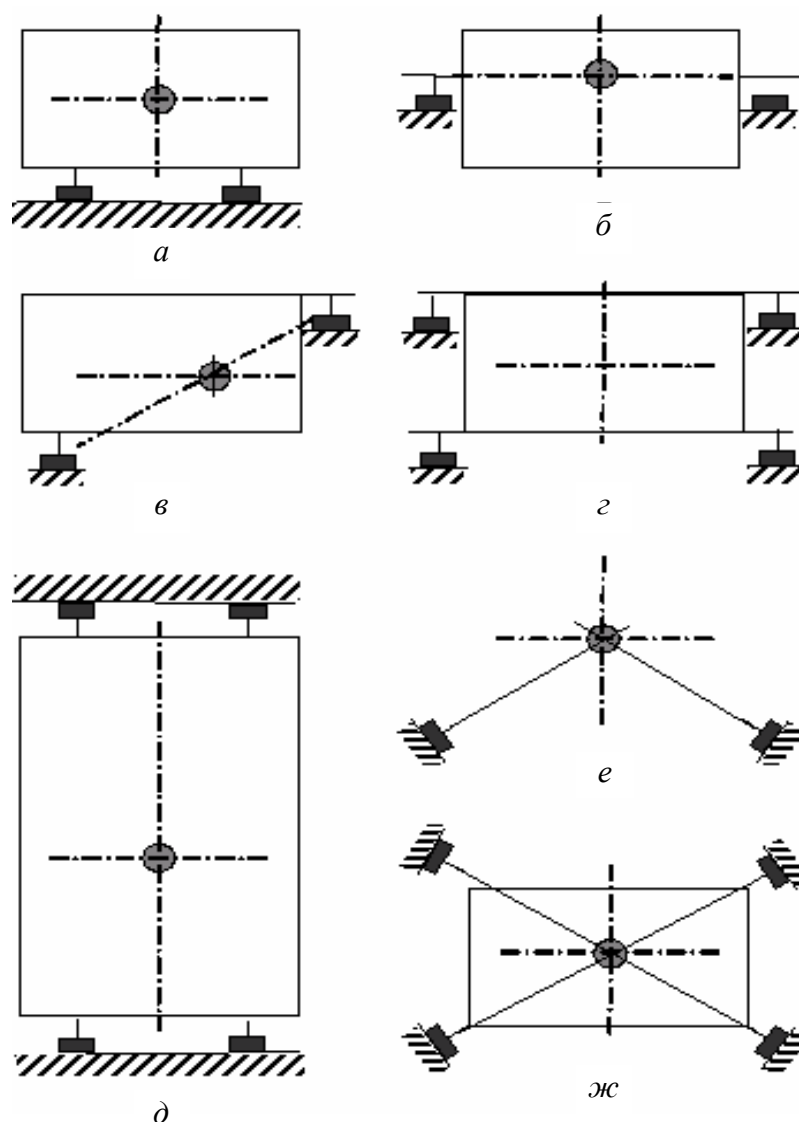


Рис. 12.12. Схемы монтажа виброизоляторов: *а* – нижний монтаж; *б* – монтаж в плоскости центра тяжести; *в* – монтаж в диагональной плоскости, проходящей через центр тяжести; *г* – монтаж в двух горизонтальных плоскостях; *д* – двусторонний монтаж; *е* – монтаж под углом односторонний; *ж* – монтаж под углом двусторонний

Динамический виброгаситель в простейшем случае представляет собой массу  $m_2$ , закрепленную с помощью пружины жесткостью  $k_2$  к объекту защиты (рис. 12.10). Подбором величины массы  $m_2$  и величины жесткости пружины  $k_2$  обеспечивается такой режим колебаний, при котором амплитуда колебаний объекта  $A_1$  минимальна на частоте возмущающих колебаний с амплитудой  $A_0$ .

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 тем динамические виброгасители стали основой для построения систем активной виброзащиты, включающих системы 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. 12.11](#).

Применение виброизоляторов позволяет обеспечить наиболее эффективную защиту ЭС от вибраций и ударов. Установка радиоэлектронных блоков с виброизоляторами может быть осуществлена по различным схемам ([рис. 12.12](#)). Выбор схемы монтажа виброизоляторов определяется параметрами воздействующих вибрационных или ударных нагрузок, соотношением габаритных размеров защищаемого объекта, требованиями по обеспечению минимизации объема на объекте установки и т. д.

В настоящее время используют следующие разновидности виброизоляторов ([рис. 12.13](#)):

- резинометаллические;
- пружинные с воздушным демпфированием;
- пружинные с фрикционным демпфированием;
- цельнометаллические;
- специальные, например, с регулируемыми параметрами.

Расчет системы виброизоляции производят в такой последовательности:

- 1) выбирают тип виброизоляторов с учетом допустимых нагрузок и условий эксплуатации;
- 2) выбирают схему монтажа виброизоляторов с учетом особенностей расположения радиоэлектронного блока на объекте и условий динамического воздействия;
- 3) производят статический расчет системы виброизоляции;
- 4) выбирают конкретный типоразмер виброизоляторов с учетом результатов статического расчета;
- 5) производят динамический расчет системы виброизоляции.

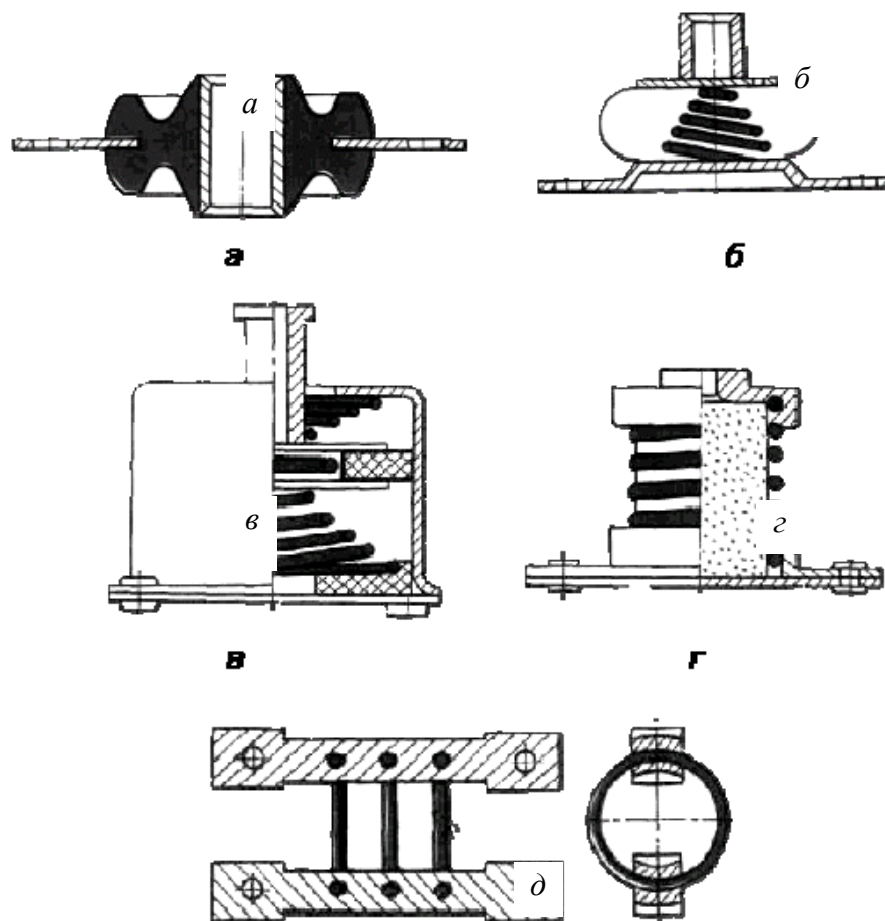


Рис. 2.13. Разновидности виброизоляторов: *а* – резинометаллический; *б* – пружинный с воздушным демпфированием; *в* – пружинный с фрикционным демпфированием; *г* – цельнометаллический; *д* – тросовый

Для выполнения расчета системы виброизоляции необходимо иметь следующие основные исходные данные: параметры внешних механических воздействий; условия эксплуатации аппаратуры; массу и основные габаритные и присоединительные размеры блока; допустимые уровни механических воздействий для защищаемого блока; характеристики используемых виброизоляторов.

## Контрольные вопросы

1. Характеристика механических воздействий.
2. Расскажите о видах механических воздействий.
3. Что относят к динамическим характеристикам механических воздействий?
4. Перечислите виды отказов аппаратуры при механических воздействиях.
5. Классификация и эффективность существующих методов защиты.
6. Для чего применяют виброизоляторы?
7. Перечислите схемы монтажа виброизоляторов.
8. Перечислите виды применяемых виброизоляторов.

## **13. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ОТ ПОМЕХ**

[13.1. Понятие «электромагнитная совместимость».](#)

[13.2. Источники и приемники наводок.](#)

[13.3. Защита от электрических полей.](#)

[13.4. Магнитостатическое экранирование.](#)

[13.5. Экранирование электромагнитного поля излучения.](#)

[13.6. Фильтрация.](#)

[Контрольные вопросы.](#)

Л и т е р а т у р а: [[3](#), [14](#), [15](#)].

### **13.1. Понятие «электромагнитная совместимость»**

Под *электромагнитной совместимостью радиоэлектронных средств* (ГОСТ 23611–79) понимают способность этих средств одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных помех и не создавать недопустимых радиопомех другим радиоэлектронным средствам. При этом непреднамеренной считают любую радиопомеху, создаваемую источником искусственного происхождения, не предназначенную для нарушения функционирования ЭС.

С каждым годом возрастает актуальность вопросов электромагнитной совместимости разрабатываемой и эксплуатируемой ЭС. Это связано с несколькими причинами:

- 1) увеличивается быстроедействие полупроводниковых приборов и электронных схем;
- 2) увеличивается количество и насыщенность используемых рабочих диапазонов радиоволн;
- 3) увеличивается количество электро- и радиоуправляемых объектов (непрерывное возрастание общего числа ЭС);
- 4) увеличивается чувствительность радиоприемных устройств;
- 5) внедрение энергоресурсосберегающих технологий с применением возможностей микросхемотехники приводит к увеличению количества устройств, работающих в режиме микротоков и пониженных напряжений питания (менее 3 В);
- 6) с развитием технологий конструкторско-производственных реализаций более просто решается вопрос создания источников электромагнитного излучения высокой мощности (передатчики в настоящее время могут генерировать излучение мощностью в единицы мегаватт).

Проблема электромагнитной совместимости ЭС стала настолько актуальной, что в рамках согласования национальных норм были разработаны европейские стандарты на электромагнитную совместимость, оформленные 9 ноября 1992 г. в Закон об электромагнитной совместимости (ЭМС).



Закон об ЭМС гласит, что не только радиотехнические установки, но и все электрические и электронные приборы, установки и системы должны быть сертифицированы специальными и имеющими разрешение организациями. Целью испытаний, проводимых этими организациями, является получение сертификационного знака СЕ, являющегося разрешением на эксплуатацию соответствующего прибора на территории государств, где данный закон принят как национальный.

### 13.2. Источники и приемники наводок

Для анализа паразитных электромагнитных воздействий необходимо определить следующие моменты:

- характер проявления помехи;
- пути распространения помехи;
- причину наводок.

*Помеха* может проявляться следующим образом:

- нестабильность источника питания;
- импульсная помеха по питанию;
- провалы по напряжению питания;
- «перенапряжения» по цепям питания;
- нарушения в цепях управления и синхронизации;
- помехи по цепям связи;
- искажения сигнала в цепях связи.

*К путям распространения* можно отнести:

- физические линии связи (провода, кабели, волноводы);
- эфир как среда распространения.

*Причины наводок:*

- источники высоких напряжений;
- источники больших токов;
- источники электромагнитного поля;
- несогласованность линий связи по входному и выходному импедансу (особенно для ВЧ- и СВЧ-трактов);
- неидеальность линий связи (наличие потерь и их зависимость от частоты);
- термоЭДС.

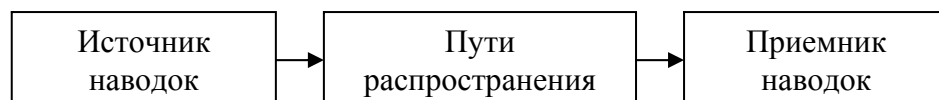


Рис. 13.1. Структура анализа паразитных электромагнитных воздействий



Для решения поставленной задачи обычно определяется и рассматривается следующая структура ([рис. 13.1](#)).

*Источниками наводок* являются:

- генераторы высокого напряжения;
- генераторы большого тока;
- генераторы электромагнитного поля;
- электрические машины (особенно коллекторные);
- выходные каскады усилителей;
- нагрузка на общее сопротивление источника и приемника наводок;
- «длинные» линии;
- термопары.

Электромагнитные помехи, создаваемые устройствами, не предназначенными для излучения электромагнитной энергии (источники электрической энергии, системы зажигания двигателей, электродвигатели, аппаратура промышленного и широкого потребления и т. д.), называются *индустриальными помехами*.

*Приемниками наводок* являются:

- радиовещательные приемники (особенно широкополосные);
- входные каскады усилителей;
- каскады с большим входным сопротивлением.

*Пути распространения:*

- электрическое поле (емкостная связь);
- магнитное поле (индуктивная связь);
- электромагнитное поле;
- проводники (гальваническая связь).

Высокоомные (электрические) поля можно представить как генераторы с высокоомным выходом, например: отключенная от нагрузки линия, штыревые антенны и открыто лежащие ненагруженные линии.

Низкоомные (магнитные) поля вызываются генераторами с низкоомной нагрузкой. Это характерно для нагруженных генераторов, пусковых токов электрических установок, а также дросселей и трансформаторов.

В дальней зоне отношение электрического поля к магнитному соответствует волновому сопротивлению свободного пространства и равно 377 Ом.

На конструкторско-технологическом этапе разработки ЭС основным способом обеспечения ЭМС является помехозащита с помощью:

- экранирования;
- фильтрации помех;
- заземления;
- корректного выполнения связей.

Любая цепь переменного тока характеризуется вектором электрического поля, связанным с потенциалом, и вектором магнитного поля, связанным с током. Эти составляющие поля могут воздействовать на близлежащие цепи, которые следует экранировать.

Когда поле изменяется во времени, его электрическая и магнитная составляющие существуют одновременно, хотя одна из них может быть больше другой. Если больше электрическая составляющая, то поле считают электрическим; если больше магнитная составляющая, то поле считают магнитным.

Обычно поле имеет ярко выраженный характер (электрическое или магнитное) вблизи своего источника на расстоянии порядка длины волны.

На расстоянии примерно 6 длин волн от источника излучения простого типа поле может распространиться в виде плоской волны, в которой энергия разделена на равные части между электрической и магнитной составляющими. Экран, эффективный при электрических и магнитных полях, обычно эффективен и для случая плоской волны.

### 13.3. Защита от электрических полей

По принципу экранирования различают электростатическое, магнито-статическое и электромагнитное экранирование.

Электростатическое экранирование состоит в замыкании электрического поля на поверхности металлической массы экрана и передаче электрических зарядов на корпус устройства (рис. 13.2, б). Если, например, между элементом конструкции  $A$ , создающим электрическое поле, и элементом  $B$ , для которого влияние этого поля оказывается вредным, поместить экран, соединенный с корпусом устройства (землей), то он будет перехватывать электрические силовые линии, защищая тем самым элемент  $B$  от вредного влияния элемента  $A$ .

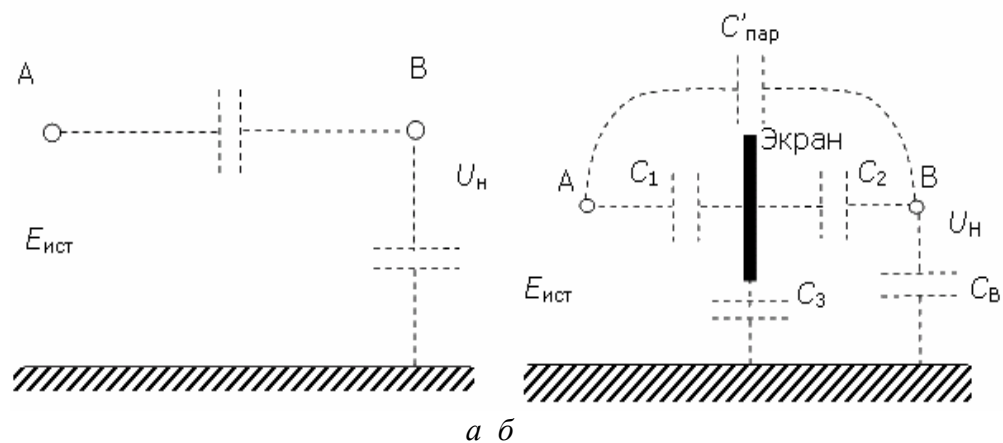


Рис. 13.2. Действие экрана, не соединенного с корпусом прибора

Напряжение, наведенное на приемник без экрана, определяется по формуле

$$U_{\text{н}} = E_{\text{ист}} \frac{C_{\text{пар}}}{C_{\text{в}} + C_{\text{пар}}}. \quad (13.1)$$

Наличие экранирующего листа разделяет емкость  $C_{\text{пар}}$  на две последовательно соединенные емкости  $C_1$  и  $C_2$ , к которым параллельно присоединена небольшая остаточная емкость  $C'_{\text{пар}}$ . Для определения напряжения  $U_{\text{н}}$  можно,

пренебрегая емкостью  $C'_{\text{пар}}$ , считать, что напряжение в точке  $B$  определяется напряжением на экране  $U_3$ , который заменяет в этом случае точку  $A$  на [рис. 13.2, а](#). Тогда

$$U_{\text{н}} = U_3 \frac{C_2}{C_{\text{в}} + C_2}. \quad (13.2)$$

Напряжение на экране, с учетом тех же соображений и емкости  $C_3$  между экраном и корпусом, будет

$$U_3 = E_{\text{ист}} \frac{C_1}{C_1 + C_3}. \quad (13.3)$$

Тогда окончательно напряжение в точке  $B$  после установки экрана

$$U_{\text{н}} = E_{\text{ист}} \frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_3)(C_{\text{в}} + C_2)}. \quad (13.4)$$

Это напряжение после установки экрана может оказаться как выше, так и ниже, чем до его установки. Действительно, сравнивая приведенные выражения для  $U_{\text{н}}$  до и после установки экрана, можно получить разные результаты.

1. Если экран установлен так, что его емкость относительно точки  $A$  велика, а относительно корпуса мала, т. е. если  $C_1$  значительно больше  $C_3$ , то напряжение на экране будет примерно равно напряжению в точке  $A$ . В результате, так как емкость  $C_2$  всегда больше емкости  $C_{\text{пар}}$ , напряжение  $U_{\text{н}}$  после установки экрана будет выше, чем до установки, и экран оказывается не полезным, а вредным.

2. Если экран установлен так, что его емкость  $C_3$  относительно корпуса прибора велика, то напряжение при наличии экрана будет меньше, чем без него. Таким образом, с увеличением  $C_3$  экранирование становится более эффективным.

Увеличение  $C_3$  до  $\infty$  равносильно короткому замыканию между экраном и корпусом ([рис. 13.3](#)).

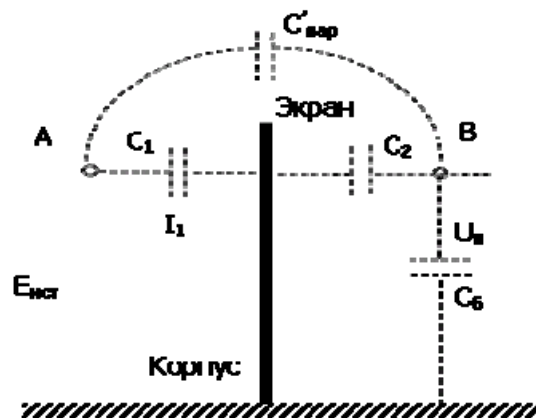


Рис. 13.3. Действие экрана, соединенного с корпусом прибора

Если при этом не учитывать остаточной паразитной емкости  $C'_{\text{пар}}$  между точками  $A$  и  $B$ , то напряжение  $U_{\text{н}}$  окажется равным нулю и показанная на [рис. 13.3](#) конструкция экрана даст идеальный экранирующий эффект. В действительности напряжение  $U_{\text{н}}$  не будет равно нулю, но его величина, определяемая из соотношения

$$U'_{\text{н}} = E_{\text{ист}} \frac{C'_{\text{пар}}}{C'_{\text{пар}} + C_2 + C_{\text{в}}} \approx E_{\text{н}} \frac{C'_{\text{пар}}}{C_2 + C_{\text{в}}}, \quad (13.5)$$

оказывается значительно меньше величины  $U_{\text{н}}$  до установки экрана, так как  $C'_{\text{пар}}$  значительно меньше  $C_{\text{пар}}$ . На основании изложенного можно считать, что физический смысл экранирующего эффекта, получаемого от металлического листа, соединенного с корпусом прибора, заключается в создании короткого замыкания на корпус для большей части паразитной емкости, имеющейся между экранируемыми друг от друга точками.

### 13.4. Магнитостатическое экранирование

Магнитостатическое экранирование основано на замыкании магнитного поля в толще экрана, происходящем вследствие его повышенной магнитопроводности. В данном случае материал экрана должен обладать большой магнитной проницаемостью.

Принцип действия магнитостатического экрана показан на [рис. 13.4](#). Магнитный поток, создаваемый элементом конструкции (в данном случае проводом), замыкается в стенках магнитного экрана вследствие их малого магнитного сопротивления.

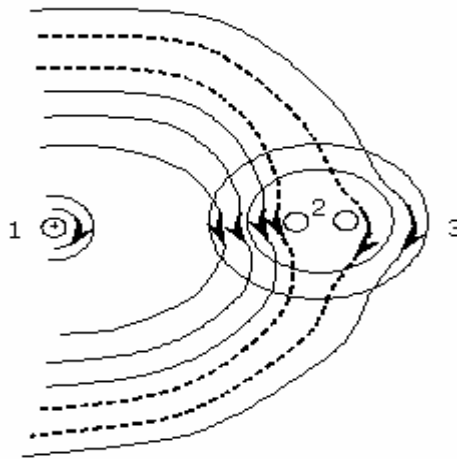


Рис. 13.4. Принцип действия магнитостатического экрана:  
1 – влияющая цепь; 2 – цепь; 3 – экран

Эффективность такого экрана тем больше, чем больше его магнитная проницаемость и толщина. С увеличением размеров экрана его эффективность падает. Магнитостатический экран целесообразно использовать только при постоянном поле и в диапазоне низких частот.

### 13.5. Экранирование электромагнитного поля излучения

Если на пути распространяющейся в воздухе электромагнитной волны поставить экранирующий металлический лист толщиной  $d$ , то его действие определится двумя факторами: отражением волны от металлической поверхности экрана и затуханием преломленной волны в теле экрана.

Пусть (рис. 13.5) на металлический экран падает плоская волна  $P_{\text{пад}}$  с векторами электрического  $E_{\text{пад}}$  и магнитного  $H_{\text{пад}}$  полей, параллельными плоскости экрана. В точке 1, находящейся на границе сред «воздух – металл», произойдет частичное отражение падающей волны, в результате которого появится обратная волна  $P_1$ , и частичное преломление, в результате которого в тело экрана проникнет волна  $P_{1м}$ . Распространяясь в металлической среде, преломленная волна  $P_{1м}$  будет затухать по экспоненциальному закону, и в точке 2, расположенной на границе сред «металл – воздух», напряженности обоих полей будут в  $e^{d/\delta}$  раз меньше, чем в точке 1. В точке 2 снова произойдет преломление и отражение. Преломленная волна  $P_2$  выйдет в экранируемое пространство, а отраженная волна  $P_{2м}$  будет затухать в металле, и в точке 3 напряженности полей окажутся в  $e^{2d/\delta}$  раз меньше, чем в точке 1. Затем будут происходить отражения и преломления в точках 3, 4, 5, ... до полного затухания волны в металле.

В экранируемое пространство будут проникать волны  $P_2, P_4, P_6, \dots$ , преломленные в точках 2, 4, 6, ... Суммарное их воздействие определяет напряженности полей  $E$  и  $H$  за экраном. Напряженности полей волны  $P_4$  будут в  $e^{2d/\delta}$  раз меньше, чем волны  $P_2$ ; волны  $P_6$  – в  $e^{4d/\delta}$  раз меньше, чем волны  $P_2$ , и т. д. Учтем, что экранирование электромагнитного поля излучения может

представлять интерес только на частотах не ниже  $10^7$  Гц, на которых, при толщине любых применяемых металлов  $d > 0,1$  мм, эквивалентная глубина проникновения  $\delta > 0,5d$ . Взяв минимальное соотношение  $d = 2\delta$ , получим, что напряженности полей волны  $P_4$  будут в 55 раз ( $e^4 = 55$ ) меньше напряженностей полей волны  $P_2$ . Это позволяет упростить расчет, пренебрегая всеми волнами, поступающими в экранируемое пространство, кроме  $P_2$ . Ошибка при таком допущении не превышает 2 %.

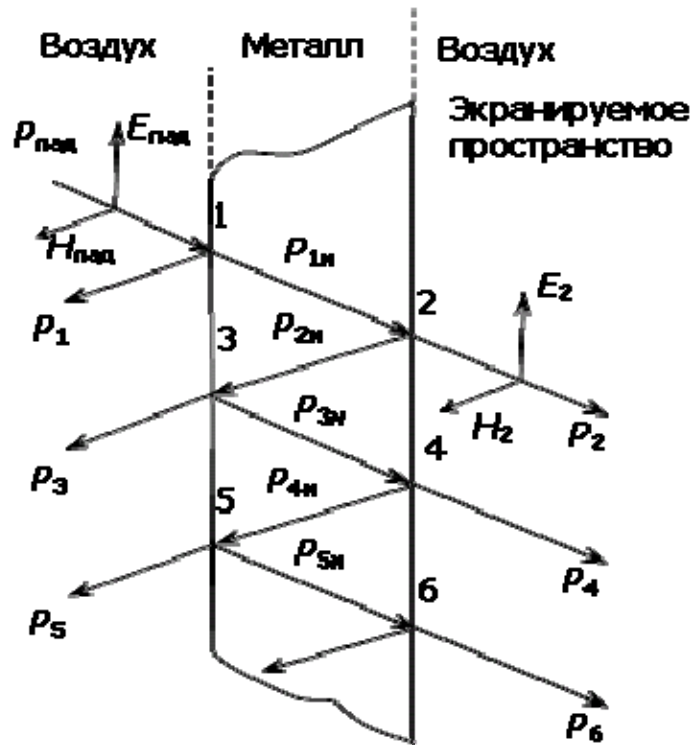


Рис. 13.5. Действие экрана на пути электромагнитной волны

Для расчета напряженности полей  $E_2$  и  $H_2$  в экранируемом пространстве рассмотрим процессы отражения и преломления электромагнитной энергии от границ сред «воздух – металл» и «металл – воздух». Они определяются соотношением между волновым сопротивлением воздуха  $Z_{с.возд} = 377$  Ом, которое чисто активно, и модулем волнового сопротивления металла

$$Z_{с.мет} = \sqrt{\omega\mu/\sigma}, \quad (13.6)$$

который в сотни и тысячи раз меньше волнового сопротивления воздуха. При отражении происходит поворот на  $180^\circ$  фазы одного из векторов, составляющих падающую волну  $E$  или  $H$ , так как только в этом случае направление движения волны изменится на обратное. Отражение волны, распространяющейся в воздухе, от металлической поверхности сопровождается поворотом вектора  $E$ , а отражение волны, распространяющейся в металле, от поверхности раздела «металл – воздух» сопровождается поворотом на  $180^\circ$  вектора  $H$ .

Физически это объясняется тем, что экран имеет большую проводимость и на нем могут получаться только небольшие падения напряжения, даже при протекании больших токов.

Поверхность экрана почти эквипотенциальна, параллельный ей вектор электрического поля должен быть очень мал, что и обеспечивается появлением отраженной волны  $P_{от}$  (рис. 13.6, а) с вектором  $E_{от}$  обратного знака. В проникающей в металл волне электрическое поле  $H_{пр}$  близко к нулю и энергия волны, распространяющейся в металле, почти целиком сосредоточена в магнитном поле  $H_{пр}$ . Соотношение между полями в металле  $E_{пр}/H_{пр} = Z_{с.мет}$  соответствует малой величине волнового сопротивления металла. При переходе волны из металла в воздух отражающей поверхностью является воздух (рис. 13.6, б) и получающееся в нем магнитное поле определяется только малыми токами смещения. Уменьшение магнитного поля  $H_{пр}$  по сравнению с полем в металле  $H_{пад}$  обеспечивается поворотом на  $180^\circ$  отраженного вектора  $H_{от}$ . В результате в вышедшей за пределы экрана волне восстанавливается соотношение между векторами  $E_{пр}$  и  $H_{пр}$ , соответствующее величине  $Z_{с.возд} = 377 \text{ Ом}$ .

Рассмотренное выше подобно отражению электромагнитной волны, движущейся вдоль несогласованной длинной линии. Если она на конце закорочена, то отраженная волна напряжения противоположна по фазе падающей волне и результирующее напряжение равно нулю, как и должно быть при коротком замыкании. Волна тока отражается без изменения фазы, и результирующий ток короткого замыкания в два раза больше тока, протекающего через согласованную нагрузку. При разомкнутой линии волна тока отражается со сдвигом фазы на  $180^\circ$  по отношению к падающей волне. Результирующий ток равен нулю, как и должно быть в разомкнутой цепи. Волна напряжения отражается без изменения фазы, и результирующее напряжение в два раза больше напряжения на конце согласованной линии.

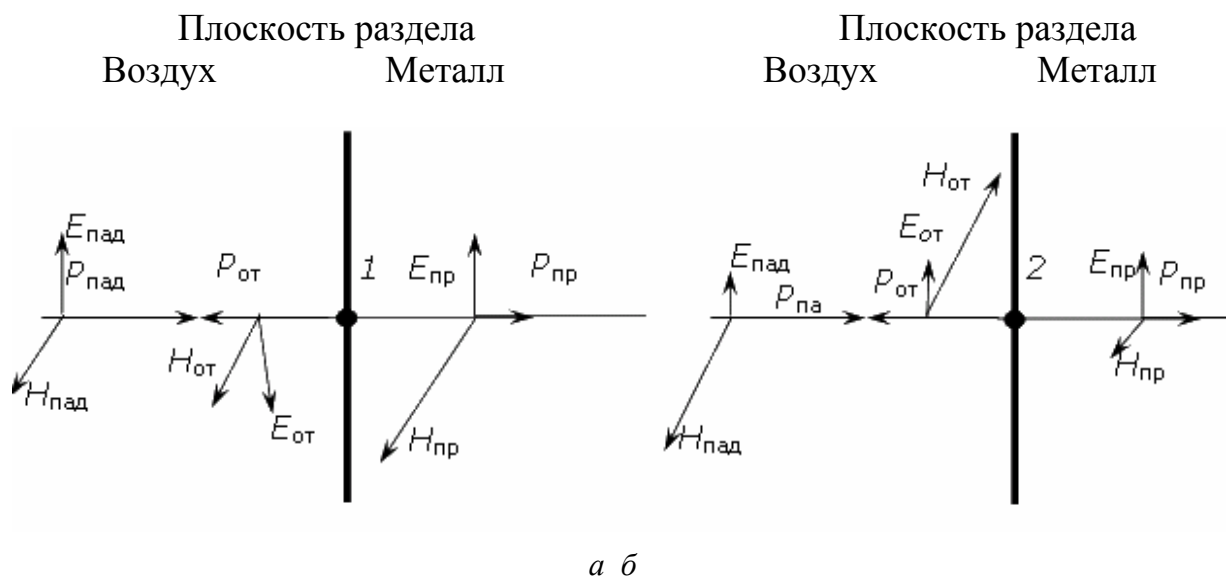


Рис. 13.6. Отражение и преломление электромагнитной волны

Определим коэффициенты преломления электрической и магнитной волн для плоскостей раздела сред «воздух – металл» и «металл – воздух». Напряженности электрического и магнитного полей в обеих средах плоскости раздела должны иметь одинаковые значения. Поэтому, в соответствии с [рис. 13.6, а](#), для плоскости раздела «воздух – металл» можно записать

$$E_{\text{пад}} + E_{\text{от}} = E_{\text{пр}}, \quad (13.7)$$

$$H_{\text{пад}} - H_{\text{от}} = H_{\text{пр}}. \quad (13.8)$$

Учитывая, что

$$E_{\text{пад}}/H_{\text{пад}} = E_{\text{от}}/H_{\text{от}} = Z_{\text{с.возд}},$$

$$E_{\text{пр}}/H_{\text{пр}} = Z_{\text{с.мет}},$$

в уравнении (13.7) можно сделать замену:

$$E_{\text{пад}}/Z_{\text{с.возд}} + E_{\text{от}}/Z_{\text{с.возд}} = E_{\text{пр}}/Z_{\text{с.возд}}. \quad (13.9)$$

Решая совместно (13.7) и (13.9), после преобразований получим величину коэффициента преломления волны  $E$  при переходе из воздуха в металл:

$$K_{\text{прел}}^E = \frac{E_{\text{пр}}}{E_{\text{пад}}} = \frac{2Z_{\text{с.мет}}}{Z_{\text{с.возд}} + Z_{\text{с.мет}}}. \quad (13.10)$$

Произведя замену в (13.8), получаем уравнение

$$H_{\text{пр}} = H_{\text{пад}} Z_{\text{с.возд}} - H_{\text{от}} Z_{\text{с.мет}}, \quad (13.11)$$

решая которое, после преобразований получим величину коэффициента преломления волны  $H$  при переходе из воздуха в металл:

$$K_{\text{прел}}^H = \frac{H_{\text{пр}}}{H_{\text{пад}}} = \frac{2Z_{\text{с.возд}}}{Z_{\text{с.возд}} + Z_{\text{с.мет}}}. \quad (13.12)$$

Аналогично, на основании [рис. 13.6, б](#), составляются уравнения

$$E_{\text{пад}} + E_{\text{от}} = E_{\text{пр}},$$

$$H_{\text{пад}} - H_{\text{от}} = H_{\text{пр}},$$

в которые вводятся значения волновых сопротивлений сред



$$Z_{\text{с.мет}} = E_{\text{пад}}/Z_{\text{пад}} = E_{\text{от}}/H_{\text{от}},$$

$$Z_{\text{с.возд}} = E_{\text{пр}}/H_{\text{пр}},$$

а после совместных решений и преобразований получаются величины коэффициентов преломления волн  $E$  и  $H$  при переходе из металла в воздух:

$$K_{\text{прел}}^E = \frac{2Z_{\text{с.возд}}}{Z_{\text{с.возд}} + Z_{\text{с.мет}}}, \quad (13.13)$$

$$K_{\text{прел}}^H = \frac{2Z_{\text{с.мет}}}{Z_{\text{с.возд}} + Z_{\text{с.мет}}}. \quad (13.14)$$

Сравнивая полученные значения коэффициентов преломления для рассмотренных четырех случаев, можно установить, что они имеют две разные, резко отличные величины.

Большой коэффициент преломления

$$K_{\text{прел}}^H = K_{\text{прел}}^E = \frac{2Z_{\text{с.возд}}}{Z_{\text{с.возд}} + Z_{\text{с.мет}}} \quad (13.15)$$

получается в тех случаях, когда отражающая поверхность имеет большую проводимость для поля  $H$  (почти короткое замыкание) или малую проводимость для поля  $E$  (почти холостой ход). При уменьшении  $Z_{\text{с.мет}}$  эти коэффициенты растут медленно, и, когда  $Z_{\text{с.мет}} \rightarrow 0$ ,  $K_{\text{прел}}^H = K_{\text{прел}}^E \rightarrow 2$ , что соответствует приведенной выше аналогии с длинной линией.

Малый коэффициент преломления

$$K_{\text{прел}}^H = K_{\text{прел}}^E = \frac{2Z_{\text{с.мет}}}{Z_{\text{с.возд}} + Z_{\text{с.мет}}} \quad (13.16)$$

получается, когда отражающая поверхность имеет большую проводимость для поля  $E$  или малую проводимость для поля  $H$ . При  $Z_{\text{с.мет}} \rightarrow 0$   $K_{\text{прел}}^H = K_{\text{прел}}^E \rightarrow 0$ , что также соответствует аналогии с длинной линией.

Возвращаясь к [рис. 13.5](#), определим напряженности полей  $E$  и  $H$  в точках 1 и 2. Преломленная волна  $P_{1\text{м}}$  будет иметь в точке 1 напряженности  $E_{\text{пад}}$  и  $H_{1\text{м}} = K_{\text{прел}}^H + H_{\text{пад}}$ . Распространяясь в металлической среде, эта волна будет затухать по экспоненциальному закону, и в точке 2 ее напряженности уменьшатся до

$$E'_{1\text{м}} = K_{\text{прел}}^E = e^{-d/\delta} E_{\text{пад}},$$

и

$$H'_{1м} = K_{\text{прел}}^H = e^{-d/\delta} H_{\text{пад}}.$$

После преломления в точке 2 волна  $P_2$ , вышедшая в экранируемое пространство, будет иметь напряженности

$$E_2 = K_{\text{прел}}^E E'_{1м} = K_{\text{прел}}^E K_{\text{прел}}^E e^{-d/\delta} E_{\text{пад}},$$

$$H_2 = K_{\text{прел}}^H H'_{1м} = K_{\text{прел}}^H K_{\text{прел}}^H e^{-d/\delta} H_{\text{пад}}.$$

На основании (13.15) и (13.16) установим, что входящие в последние две формулы произведения коэффициентов преломления для полей  $E$  и  $H$  имеют одну величину

$$K_{\text{прел}}^E K_{\text{прел}}^E = K_{\text{прел}}^H K_{\text{прел}}^H = \frac{4Z_{\text{с.мет}} Z_{\text{с.возд}}}{(Z_{\text{с.возд}} + Z_{\text{с.мет}})^2}. \quad (13.17)$$

Отсюда следует, что эффективность экранирования электромагнитного поля излучения, одинаковая для полей  $E$  и  $H$ , составляющих волну, будет

$$\Theta = \frac{E_{\text{пад}}}{E_2} \frac{H_{\text{пад}}}{H_2} e^{d/\delta} \frac{(Z_{\text{с.возд}} + Z_{\text{с.мет}})}{4Z_{\text{с.мет}} + Z_{\text{с.возд}}} \gg \frac{e^{d/\delta} Z_{\text{с.возд}}}{4Z_{\text{с.мет}}}. \quad (13.18)$$

## 13.6. Фильтрация

Когда элементы электрической цепи требуется освободить от взаимного влияния, используют так называемые *развязывающие фильтры*. Действие подобных фильтров состоит в ослаблении влияния переменного напряжения источника нежелательного сигнала, находящегося в одной части цепи, на часть цепи, в которой величина этого сигнала должна быть по возможности минимальной.

Принципиальная схема одного из возможных вариантов электрической цепи с развязывающими фильтрами показана на рис. 13.7. Здесь  $U$  – напряжение источника нежелательного сигнала;  $U_1, U_2, \dots, U_n$  – напряжение в различных участках цепи;  $z_1, z_2, \dots, z_n$  – сопротивление участков цепи.

Из схемы рис. 13.7 нетрудно определить напряжения в ее различных точках (полагая  $z_1 \gg z_2, z_3 \gg z_4, \dots, z_{n-1} \gg z_n$ , что часто имеет место на практике):

$$U_1 = U \frac{z_1}{z_1 + z_2} \approx U \frac{z_2}{z_1};$$

$$U_1 = U \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3}; \quad (13.19)$$

$$U_1 = U \frac{z_1 z_3 z_5 \dots z_{n-1}}{z_2 z_4 z_6 \dots z_n}.$$

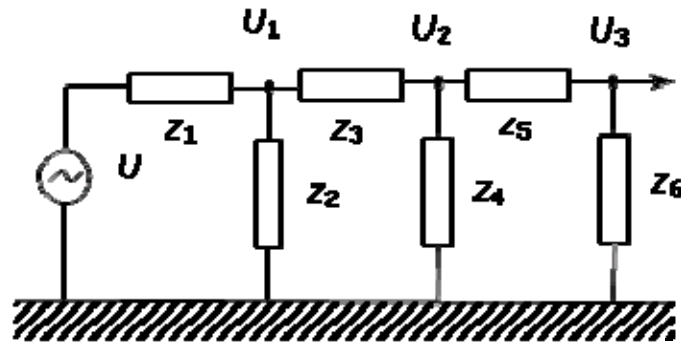


Рис. 13.7. Принципиальная схема цепи с развязывающими фильтрами

Ослабление, даваемое всей схемой:

$$\beta = \frac{U}{U_n} \frac{z_1 z_3 z_5 \dots z_{n-1}}{z_2 z_4 z_6 \dots z_n}. \quad (13.20)$$

На [рис. 13.7](#) показана цепь, состоящая из последовательного ряда Г-образных фильтров. Это самый распространенный вид фильтров.

Из уравнения ([13.20](#)) следует, что величина  $\beta$  теоретически может быть любой. Однако на практике  $\beta$  всегда выражается конечным и часто не очень большим числом. Объясняется это рядом причин. Так, если в качестве последовательных сопротивлений используются резисторы, то очевидно, что не всегда допустима их большая суммарная величина.

При использовании в качестве сопротивлений  $z_1, z_2, \dots, z_n$  конденсаторов ограничивающим фактором будет их емкость, а для сравнительно высоких частот – и их индуктивность.

Если в качестве последовательных сопротивлений применяются индуктивности, то и в этом случае получить большую величину ослабления не удастся. Это обуславливается тем, что выполнить катушку индуктивности с большой величиной собственной частоты (т. е. при большой индуктивности иметь малую паразитную емкость) крайне трудно. Поэтому полное сопротивление такой катушки обычно не превышает  $10^4$ – $10^5$  Ом. Причем большая величина относится к сравнительно небольшим частотам (менее  $10^6$  Гц) и к довольно большим габаритам катушек.

## Контрольные вопросы

1. С чем связан рост актуальности вопросов электромагнитной совместимости разрабатываемых и эксплуатируемых ЭС?
2. Какие моменты необходимо определить для анализа паразитных электромагнитных воздействий?
3. За счет чего осуществляется электростатическое экранирование?
4. В чем сущность магнитостатического экранирования?
5. Какие типы фильтров вы знаете?

## 14. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

[14.1. Классификация опасных факторов.](#)

[14.2. Область применения требований по безопасности.](#)

[14.3. Классы аппаратуры по электробезопасности.](#)

[14.4. Маркировка ЭС.](#)

[14.5. Обеспечение защиты от поражения электрическим током.](#)

[14.6. Обеспечение механической прочности, теплостойкости и огнестойкости.](#)

[Контрольные вопросы.](#)

Л и т е р а т у р а: [[13](#), [28](#), [40](#)].

Цель требований, предъявляемых к безопасной аппаратуре, – обеспечение защиты людей и окружающей среды.

Термин «защита окружающей среды» включает также понятие «защита естественной окружающей среды», в которой находится аппаратура, предназначенная для использования, т. е., если говорить о жизненном цикле аппаратуры, это будет: производство, использование, обслуживание, размещение и возможное повторное использование частей аппаратуры в конце жизненного цикла.

Особое внимание к требованиям безопасности уделяется при проектировании бытовых и аналогичных ЭС, поскольку с ними работает неподготовленный пользователь. Поэтому рассматриваемый далее материал изложен главным образом применительно к указанным ЭС. Требования по обеспечению безопасности других устройств оговариваются особо.

### 14.1. Классификация опасных факторов

Возникновение травм или повреждений при работе с аппаратурой может произойти из-за опасных факторов, приведенных на [рис. 14.1](#) (ГОСТ Р МЭК 60065).

**Поражение электрическим током** возникает в результате прохождения электрического тока через тело человека. Токи порядка миллиампера могут вызвать определенную физиологическую реакцию у здоровых людей и вторичные опасности вследствие непроизвольной реакции. Токи более высоких значений могут оказывать более разрушительное действие на организм человека.

В [табл. 14.1](#) приведены примеры причин возникновения поражения электрическим током и способы их предотвращения.

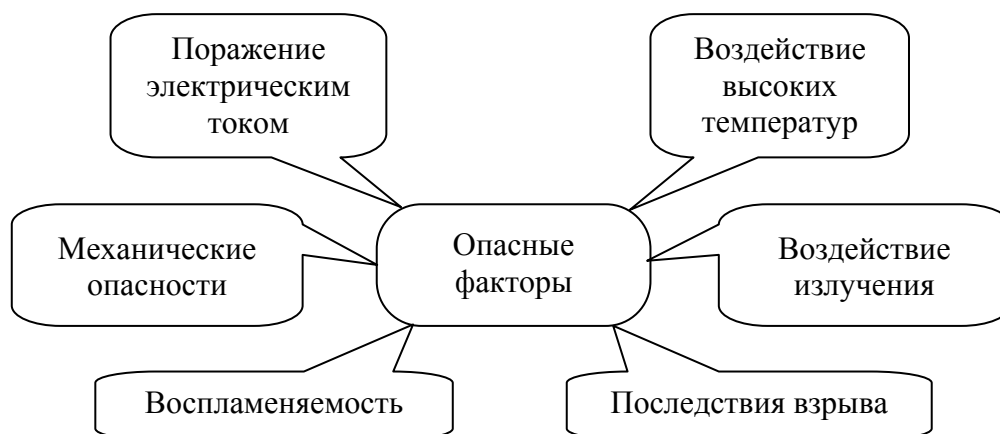


Рис. 14.1. Опасные факторы при работе с ЭС

Таблица 14.1

**Причины возникновения поражения электрическим током  
и способы их предотвращения**

| Причина                                                                                                                                                                                  | Способ предотвращения                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Контакты с частями, обычно находящимися под опасным напряжением                                                                                                                          | Предотвратить доступ к частям с опасным напряжением применением постоянно закрепленных или запертых кожухов                                                                                                                                                                                           |
| Пробой изоляции между частями, обычно находящимися под опасным напряжением, и доступными частями                                                                                         | Применить двойную либо усиленную изоляцию между частями, обычно находящимися под опасным напряжением, и доступными частями так, чтобы пробой не мог произойти, или соединить доступные части с защитным заземлением, чтобы напряжение, которое может появиться, было снижено до безопасного значения. |
| Пробой изоляции между частями, находящимися под опасным напряжением, и цепями с неопасным напряжением, вследствие чего доступные части и соединители оказываются под опасным напряжением | Разделить части, находящиеся под опасным напряжением, и доступные части двойной или усиленной изоляцией так, чтобы пробой не мог произойти, или соединить доступные части с защитным заземлением, чтобы напряжение, которое может появиться, было снижено до безопасного значения                     |
| Воздействие тока от прикосновения к частям, находящимся под опасным напряжением, через тело человека                                                                                     | Ограничить ток от прикосновения до безопасного значения либо обеспечить соединение доступных частей с защитным заземлением                                                                                                                                                                            |

Для того чтобы обеспечить защиту от возможных опасностей более высоких напряжений, появляющихся на частях, к которым можно прикоснуться, или частях ручного управления, необходимо их заземлить или соответствующим образом изолировать.

Части, к которым возможно прикосновение, обычно обеспечиваются двумя уровнями защиты от поражения электрическим током из-за неисправ-

ности. Тогда одна неисправность или любые последующие неисправности не будут создавать опасности.

Такие защитные меры, как дополнительная изоляция или защитное заземление, должны рассматриваться только как дополнительные. Их применение не является *заменой* или *освобождением* от необходимости использования основной изоляции, спроектированной должным образом.

**Воздействие высоких температур.** Травмы от воздействия высоких температур возможны:

- при контакте с доступными частями при повреждении изоляции от воздействия высоких внутренних температур;
- из-за механической неустойчивости, вызываемой возникновением высоких температур внутри аппаратуры.

**Механические опасности.** Для предотвращения травм от этого вида опасностей аппаратура и ее части должны:

- иметь надежную механическую прочность и устойчивость;
- не иметь острых кромок;
- иметь охрану или блокировку опасных движущихся частей.

**Последствия взрыва.** Травмы от этого вида опасных факторов являются в основном последствиями взрыва кинескопов.

**Воспламеняемость** может произойти в результате:

- перегрузок;
- неисправности компонента;
- пробоя изоляции;
- плохих соединений;
- дугового пробоя.

Рекомендуется применение следующих предупредительных мер:

- использование подходящих компонентов и сборочных узлов;
- предотвращение высоких температур, которые могут вызвать воспламенение при нормальных режимах работы или при неисправностях;
- исключение применения возможных источников воспламенения, таких как не отвечающих требованиям контактов, плохих соединений, обрывов;
- ограничение количества используемых горючих материалов;
- проверка расположения горючих материалов относительно возможных источников воспламенения;
- применение материалов с высокой сопротивляемостью к воспламенению около потенциальных источников возгорания;
- применение герметизации или перегородок для ограничения распространения пламени внутри аппаратуры;
- использование материалов с достаточной огнестойкостью для изготовления кожуха.

**Воздействие излучения.** Применение в ЭС лазеров создает опасность получения травм от высоких энергетических уровней лазерного излучения. Для предотвращения травм ограничивают либо доступ к источникам излучения, либо мощность излучения до безопасных значений.

Другим источником опасности для человека могут являться устройства отображения информации, например электронно-лучевые трубки. К ним в первую очередь предъявляются требования к качеству изображения.

Качество изображения считается допустимым, если соблюдаются следующие условия:

- размер изображения по горизонтали составляет не менее 70 % используемой ширины экрана;
- минимальная яркость синхронизированного изображения белого поля не менее 50 кд/м<sup>2</sup>;
- разрешающая способность по горизонтали в центре не менее 1,5 МГц при аналогичном ухудшении разрешающей способности по вертикали;
- за каждые 5 мин не более одного высоковольтного пробоя.

Аппарат, включающий в себя потенциальный источник ионизирующего излучения, должен иметь конструкцию, обеспечивающую защиту человека от воздействия ионизирующего излучения, как при нормальных условиях работы, так и в условиях неисправностей.

Измерение мощности экспозиционной дозы излучения проводят в любой точке за пределами аппарата, расположенной на расстоянии 5 см от его внешней поверхности, с помощью дозиметра, имеющего эффективную площадь 10 см<sup>2</sup>.

Мощность экспозиционной дозы излучения не должна превышать 36 пА/кг (0,5 мР/ч).

## **14.2. Область применения требований по безопасности**

Требования по обеспечению безопасности обычно распространяют на бытовую аппаратуру, работающую при следующих условиях:

*нормальные условия эксплуатации:*

- температура окружающей среды от 15 до 35 °С;
- относительная влажность воздуха не более 75 %;
- использование на высотах не более 2000 м над уровнем моря, главным образом в сухих помещениях и в регионах с умеренным или тропическим климатом;
- питание от сети с номинальным напряжением питания, не превышающим:

250 В переменного однофазного или постоянного напряжения;

433 В переменного напряжения для аппаратуры, подключаемой к сети питания, содержащей более одной фазы.

В Австралии, Канаде, Дании, Японии, Румынии, ЮАР, США и Великобритании рассматриваемые требования по безопасности применяются, где



это приемлемо, как руководство для проектирования аппаратуры, работающей на батареях.

### **14.3. Классы аппаратуры по электробезопасности**

В соответствии с ГОСТ 12.2.007 установлено пять классов защиты: 0; 0I; I; II; III.

К классу 0 должны относиться изделия, имеющие, по крайней мере, рабочую (основную) изоляцию и не имеющие элементов для заземления, если эти изделия не отнесены к классу II или III.

К классу 0I должны относиться изделия, имеющие, по крайней мере, рабочую (основную) изоляцию, элемент для заземления и провод без заземляющей жилы для присоединения к источнику питания.

К классу I должны относиться изделия, в которых защита от поражения электрическим током не ограничивается только основной изоляцией, а включает дополнительные меры безопасности, предусматривающие подключение доступных токопроводящих частей к защитному проводу заземления, предусмотренному в конструкции аппарата. Такое подключение должно исключить возможность нахождения доступных токопроводящих частей под опасным напряжением в случае пробоя основной изоляции.

В случае если изделие класса I имеет провод для присоединения к источнику питания, этот провод должен иметь заземляющую жилу и вилку с заземляющим контактом. Аппарат этого класса может иметь части, отвечающие требованиям к аппарату класса II.

К классу II должны относиться изделия, в которых защита от поражения электрическим током не ограничивается только основной изоляцией, а включает дополнительные меры безопасности, например использование двойной или усиленной изоляции. В этих аппаратах не предусматривают элементов подключения защитного заземления и выполнение специальных условий монтажа.

К классу III должны относиться изделия, не имеющие ни внутренних, ни внешних электрических цепей с напряжением свыше 42 В.

Бытовая аппаратура, разработанная для питания от сети, должна быть выполнена в соответствии с требованиями к аппаратам класса I или класса II.

### **14.4. Маркировка ЭС**

Кроме конструктивно-технологических решений по обеспечению безопасности на изделия ЭС обязательно наносится маркировка, буквенно-цифровая или символьная, к которой предъявляются определенные требования.

### 14.4.1. Общие требования

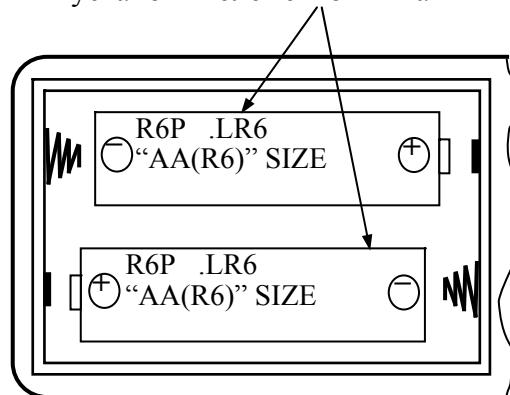
Маркировка на аппарате, готовом к эксплуатации, должна быть постоянной, однозначно понимаемой и легко различимой.

Информацию следует наносить преимущественно снаружи аппарата (рис. 14.2, а, в), за исключением нижней части. Однако допускается располагать маркировку в легко доступном вручную месте, например под крышкой (рис. 14.2, б) или на внешней стороне дна портативного аппарата или аппарата, масса которого не превышает 7 кг (рис. 14.2, г), и при условии, что в инструкции по эксплуатации указано место размещения маркировки.



а

Маркировка типоразмера и способа установки элементов питания



б



в



г

Рис. 14.2. Расположение маркировок: а — на задней панели усилителя; б — в отсеке питания пульта управления телевизором JVC; в — на задней панели приемника трехпрограммного проводного вещания; г — на нижней крышке ЭПУ «Лидер-306 моно»

Маркировка не наносится на прибор, если ее выполнение технологически затруднено (малогабаритные изделия и т. п.). При этом необходимые данные указываются на упаковке или в технической эксплуатационной документации. В последнем случае на приборе указывается знак . Этот знак наносится также рядом с частями, представляющими опасность, и в том случае, когда при работе с прибором необходимо применять особые меры предосторожности, указанные в технической документации.

Графические символы должны соответствовать МЭК 60027 или государственным стандартам на соответствующий тип аппаратуры.

Маркировка, наносимая на аппарат, должна содержать следующие данные:

- наименование изготовителя или ответственной поставляющей организации, торговая марка или фирменный знак;
- обозначение номера модели или типа;
- знак КЛАССА II –  если необходимо;
- вид питания;
- номинальное напряжение питания или диапазон номинальных напряжений питания, которые могут подаваться без предварительного переключения устройства установки напряжения;
- номинальная частота сети (или диапазон частот) в герцах;
- номинальный ток потребления или номинальная мощность;
- маркировка потребляемой мощности.

*Вид питания:*

- только переменный ток обозначается символом  $\sim$ ;
- только постоянный ток обозначается символом  $==$ ;
- переменный или постоянный ток обозначается символом  $\approx$ .

*Номинальные значения напряжений*, выбираемые пользователем, должны разделяться косой чертой, например 110/230 В, а диапазон номинальных напряжений должен указываться через тире, например 110–230 В.

*Номинальная частота сети (или диапазон частот)* маркируется в том случае, если от правильного выбора частоты сети зависит безопасность.

*Номинальный ток потребления или номинальная мощность* потребления маркируются на аппаратуре, которая может питаться от источника питания общего назначения. Эта информация может быть приведена в инструкции по эксплуатации.

*Потребляемая мощность* маркируется на изделиях, предназначенных для подключения к сети питания, имеющей более одной фазы.

Для механических выключателей, управляемых вручную, положение «включено» обязательно должно быть указано.

Маркировка положения «включено» символом  пускается только для всеполюсных сетевых выключателей.

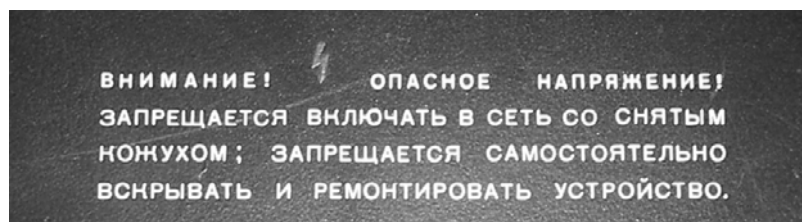


Рис. 14.3. Пример предупреждающей маркировки, расположенной на нижней крышке прибора

Если в приборе отсутствует механическая защитная блокировка и потенциально возможен доступ пользователя к частям, представляющим опасность, то на аппарат должна быть нанесена предупреждающая маркировка, пример которой приведен на [рис. 14.3](#).

#### 14.4.2. Требования к маркировке соединителей и клемм

Маркировка, наносимая на соединители и клеммы, должна быть следующая.

*Соединители*, являющиеся опасными для жизни при нормальных условиях работы, за исключением соединителей, предназначенных для подключения к сети питания, должны быть маркированы символом 

*Розетки*, предназначенные для обеспечения сетевого питания другой аппаратуры, должны иметь маркировку максимально допустимой потребляемой мощности или тока.

*Клемма* для подключения провода защитного заземления, входящего в состав провода питания, маркируется символом  Этот символ не должен использоваться для обозначения других заземляющих клемм.

*Выходные клеммы*, предназначенные для обеспечения питания другой аппаратуры, за исключением сетевого питания, должны иметь маркировку номинального выходного напряжения и, кроме того, маркировку максимального выходного тока, если при самой неблагоприятной нагрузке температура может превысить допустимые значения, указанные в табл. 14.2.

Это требование относится к аппаратуре, у которой на выходных клеммах отсутствует обозначение типа аппарата, подключение которого допускается.

*Плавкие вставки* должны иметь следующую маркировку, наносимую на каждый держатель плавкого предохранителя или вблизи с плавкой вставкой, в следующем порядке:

- символ, обозначающий амперсекундную характеристику, например:
  - F – быстродействующий;
  - T – замедленный;
- номинальный ток в миллиамперах для значений номинального тока до 1 А и в амперах для значений номинального тока более 1 А;
- символ, обозначающий отключающую способность плавкой вставки, например:
  - L – низкая отключающая способность;
  - E – повышенная отключающая способность;
  - H – высокая отключающая способность.

Таблица 14.2

## Допустимое превышение температуры частей аппарата

| Части аппарата                                                                                        | Условия нормальной работы, К | Условия неисправностей, К |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Д о с т у п н ы е   ч а с т и                                                                         |                              |                           |
| Кнопки, ручки и т. п.:                                                                                |                              |                           |
| металлические                                                                                         | 30                           | 65                        |
| неметаллические                                                                                       | 50                           | 65                        |
| Корпуса:                                                                                              |                              |                           |
| металлические                                                                                         | 40                           | 65                        |
| неметаллические                                                                                       | 60                           | 65                        |
| Ч а с т и ,   о б е с п е ч и в а ю щ и е   э л е к т р и ч е с к у ю   и з о л я ц и ю               |                              |                           |
| Шнуры питания и провода с изоляцией:                                                                  |                              |                           |
| поливинилхлорид                                                                                       | 60                           | 100                       |
| натуральный каучук                                                                                    | 45                           | 100                       |
| Другие изоляционные материалы:                                                                        |                              |                           |
| непропитанная бумага                                                                                  | 55                           | 70                        |
| непропитанный картон                                                                                  | 60                           | 80                        |
| пропитанные бумага и текстиль                                                                         | 70                           | 90                        |
| слоистые материалы на основе целлюлозы или текстиля, скрепленные эпоксидной смолой                    | 120                          | 150                       |
| Литые детали из материалов:                                                                           |                              |                           |
| фенолформальдегид или фенолфурфурол, меламин и меламинофенол в сочетании с целлюлозными наполнителями | 100                          | 130                       |
| термоотвердевающий полиэстер с минеральными наполнителями                                             | 95                           | 150                       |
| алкид с минеральными наполнителями                                                                    | 95                           | 150                       |
| Составные материалы:                                                                                  |                              |                           |
| полиэстер, усиленный стекловолокном                                                                   | 95                           | 150                       |
| эпоксидная смола со стекловолокном                                                                    | 100                          | 150                       |
| силиконовая резина                                                                                    | 145                          | 190                       |
| Провода обмоток, изолированные:                                                                       |                              |                           |
| непропитанным шелком, хлопком и др.                                                                   | 55                           | 75                        |
| пропитанным шелком, хлопком и др.                                                                     | 70                           | 100                       |
| материалами из олеосмол                                                                               | 70                           | 135                       |
| поливинилформальдегидными или полиуретановыми смолами                                                 | 85                           | 150                       |
| полиэстеровыми смолами                                                                                | 120                          | 155                       |
| полиэстеромидными смолами                                                                             | 145                          | 180                       |
| Другие части:                                                                                         |                              |                           |
| литиевые батареи                                                                                      | 40                           | 50                        |
| другие части, за исключением резисторов и частей из металла, стекла и керамики                        | 200                          | 300                       |

Примеры маркировки: T315L или T315 mAL; F1,25H или F1,25AH.

Допускается размещать маркировку где-либо в другом месте, но при условии, чтобы было понятно, к какому держателю плавкого предохранителя относится маркировка.

#### 14.4.3. Маркирование взрывозащищенного оборудования

Все ЭС, работающие во взрывоопасных средах, кроме обязательной потребительской маркировки, регламентируемой для соответствующих изделий, должны иметь маркировку по взрывозащите (ГОСТ 12.2.020, ГОСТ Р 51330.0, ГОСТ Р 51330.10).

**Маркировка взрывозащиты** электрооборудования должна выполняться рельефными знаками на видном месте оболочки электрооборудования, на основной части корпуса или на табличке, прикрепляемой к оболочке таким способом, чтобы была обеспечена ее сохранность в течение всего срока службы электрооборудования.

Маркировка взрывозащищенного электрооборудования группы II должна содержать данные в приведенной ниже последовательности:

- наименование изготовителя или его зарегистрированный товарный знак;
- обозначение типа электрооборудования;
- знак уровня взрывозащиты;
- знак Ex, указывающий, что электрооборудование соответствует стандартам на взрывозащиту конкретного вида;
- обозначение вида взрывозащиты;
- обозначение группы электрооборудования;
- знак температурного класса электрооборудования;
- порядковый номер изделия;
- название или знак органа по сертификации и номер сертификата (при выдаче сертификата);
- специальные условия для обеспечения безопасности в эксплуатации;
- любую другую дополнительную маркировку, предписываемую стандартами на взрывозащиту конкретных видов;
- любую маркировку, требуемую стандартами на электрооборудование конкретного вида.

**Маркировка уровня взрывозащиты.** Для электрооборудования группы I принята следующая маркировка:

- РП – для электрооборудования повышенной надежности против взрыва;
- РВ – для взрывобезопасного электрооборудования;
- РО – для особовзрывобезопасного электрооборудования.



Для электрооборудования группы II маркировка уровня взрывозащиты производится цифровым кодированием:

- 2 – для электрооборудования повышенной надежности против взрыва;
- 1 – для взрывобезопасного электрооборудования;
- 0 – для особовзрывобезопасного электрооборудования.

### **Маркировка вида взрывозащиты:**

- о – масляное заполнение оболочки для электрооборудования группы II и заполнение негорючей жидкостью для электрооборудования группы I;
- р – заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением;
- q – кварцевое заполнение оболочки;
- d – взрывонепроницаемая оболочка;
- e – защита вида e;
- ia – искробезопасность, уровень ia (категория ia);
- ib – искробезопасность, уровень ib (категория ib);
- ic – искробезопасность, уровень ic (категория ic);
- m – герметизация компаундом;
- n – защита вида n;
- s – специальный вид взрывозащиты.

*Искробезопасные цепи уровня ia* не должны вызывать воспламенение взрывоопасной смеси в предписанных стандартом условиях испытаний от теплового воздействия, а от искрений – с вероятностью большей  $10^{-3}$  в каждом из следующих случаев:

- при нормальной работе и введении всех неучитываемых повреждений, создающих наиболее опасные условия;
- при нормальной работе, введении одного учитываемого и всех неучитываемых повреждений, создающих наиболее опасные условия;
- при нормальной работе, введении двух учитываемых и всех неучитываемых повреждений, создающих наиболее опасные условия.

*Искробезопасные цепи уровня ib* не должны вызывать воспламенение взрывоопасной смеси в предписанных стандартом условиях испытаний от теплового воздействия, а от искрений – с вероятностью большей  $10^{-3}$  в каждом из следующих случаев:

- при нормальной работе и введении всех неучитываемых повреждений, создающих наиболее опасные условия;
- при нормальной работе, введении одного учитываемого и всех неучитываемых повреждений, создающих наиболее опасные условия.

*Искробезопасные цепи уровня ic* не должны вызывать воспламенение взрывоопасной смеси в предписанных стандартом условиях испытаний от теплового воздействия, а от искрений – с вероятностью большей  $10^{-3}$  при нормальной работе и введении всех неучитываемых повреждений, создающих наиболее опасные условия.

В случае использования на различных частях электрооборудования различных видов взрывозащиты, каждая соответствующая часть должна

иметь обозначение принятого в ней вида взрывозащиты. Если в электрооборудовании используют взрывозащиту нескольких видов, на первом месте ставят обозначение основного вида взрывозащиты, а затем других видов.

**Классификация аппаратуры, работающей во взрывоопасных средах.** Данная аппаратура подразделяется на две группы:

группа I – для электрооборудования, предназначенного для подземных выработок шахт и рудников и их наземных строений, опасных по рудничному газу и/или пыли;

группа II (подгруппы IIА, IIВ, IIС) – для электрооборудования внутренней и наружной установки, предназначенного для применения в местах с потенциально взрывоопасной газовой средой, кроме шахт и их наземных строений, опасных по рудничному газу и/или пыли.

Буквы А, В, С характеризуют подгруппу в соответствии с категорией взрывоопасности смеси, для которой оно предназначено, исходя из значения безопасного экспериментального максимального зазора (БЭМЗ) или в зависимости от значения соотношения между минимальным током воспламенения испытуемого газа или пара и минимальным током воспламенения (МТВ) лабораторного метана.

*Классификация по значению БЭМЗ:*

- категория взрывоопасности IIА: БЭМЗ св. 0,9 мм;
- категория взрывоопасности IIВ: БЭМЗ от 0,5 до 0,9 мм;
- категория взрывоопасности IIС: БЭМЗ менее 0,5 мм.

*Классификация по предельному значению соотношения МТВ:*

- категория взрывоопасности IIА: МТВ св. 0,8;
- категория взрывоопасности IIВ: МТВ от 0,45 до 0,8;
- категория взрывоопасности IIС: МТВ менее 0,45.

Если электрооборудование предназначено для применения только в одном газе, сразу за обозначением II должна следовать химическая формула (или название) газа.

Например, PExdI/1ExdIIВТЗ или PExdI/1ExdII(NH<sub>3</sub>).

Знак *температурного класса* электрооборудования выбирается по [табл. 14.3](#).

Таблица 14.3

**Обозначение температурного класса электрооборудования**

| Температурный класс | Предельная температура, °С | Температурный класс | Предельная температура, °С |
|---------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|
| T1                  | 450                        | T4                  | 135                        |
| T2                  | 300                        | T5                  | 100                        |
| T3                  | 200                        | T6                  | 80                         |

Для электрооборудования группы II указывают обозначение температурного класса, или максимальную температуру поверхности, или же то и другое вместе. Если в маркировке указаны оба этих данных, температурный



класс должен указываться последним, в скобках. На кабельных вводах температурный класс не маркируют. Например:

T1, или 350 °C, или 350 °C (T1).

Электрооборудование, имеющее максимальную температуру поверхности выше 450 °C, должно маркироваться лишь нанесением значения температуры, например «600 °C».

Электрооборудование, предназначенное для применения в определенном газе, не требует указания значения температуры.

**Порядковый номер не проставляется:**

- на присоединительную арматуру (кабельные и трубные вводы, заглушки, промежуточные платы, розетки и вилки соединителей и проходные изоляторы);
- миниатюрное оборудование с ограниченной поверхностью.

В качестве альтернативы порядковому номеру изделия может рассматриваться номер партии.

**Специальные условия для обеспечения безопасности в эксплуатации** маркируются знаком X, размещаемым после маркировки взрывозащиты. Этот знак включается в маркировку по требованию испытательной организации. В качестве дополнения к маркировке взрывозащиты для Ex-компонента используется знак U. Знаки X и U не следует применять вместе.

*Ex-компонент* – часть взрывозащищенного электрооборудования, которую отдельно во взрывоопасной среде не используют.

Ex-компоненты должны иметь следующую маркировку на видном месте:

- наименование или зарегистрированный товарный знак изготовителя;
- обозначение типа Ex-компонента;
- обозначение Ex;
- обозначение каждого примененного вида взрывозащиты;
- обозначение группы взрывозащищенного комплектующего изделия;
- наименование или знак органа по сертификации;
- обозначение сертификации и знак U, нанесенный после маркировки взрывозащиты;
- дополнительную маркировку, предписываемую стандартами на конкретные примененные виды взрывозащиты;
- маркировку, требуемую стандартами на комплектующие взрывозащищенные изделия.

**Маркировка различных видов взрывозащищенного оборудования**

| Наименование электрооборудования                        | Вид взрывозащиты                                                  | Группа (подгруппа) и температурный класс электрооборудования | Маркировка взрывозащиты |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Электрооборудование повышенной надежности против взрыва | Защита вида <i>e</i>                                              | Группа II, температурный класс T6                            | 2ExeIIT6                |
| Взрывобезопасное электрооборудование                    | Взрывонепроницаемая оболочка                                      | Подгруппа IIA, температурный класс T3                        | 1ExdIIAT3               |
| Особовзрывобезопасное электрооборудование               | Искробезопасная электрическая цепь                                | Подгруппа IIC, температурный класс T6                        | 1ExsIIT6                |
|                                                         | Искробезопасная электрическая цепь и взрывонепроницаемая оболочка | Подгруппа IIA, температурный класс T4                        | 0ExidIIAT4              |

Маркировка взрывозащиты взрывозащищенного электрооборудования группы I должна состоять из двух частей. В первой части указывается уровень взрывозащиты, во второй части, располагаемой правее или ниже первой, – остальная часть маркировки. Например:

PB                      PO                      или                      PB Exdibl  
Exdibl                      Exiasl PO Exiasl

Примеры маркировки различных видов взрывозащищенного оборудования группы II приведены в [табл. 14.4](#).

На малогабаритном электрооборудовании и на Ex-компонентах с ограниченной поверхностью количество маркировки может быть сокращено, тем не менее в ней обязательно должно быть отражено следующее:

- наименование или зарегистрированный товарный знак изготовителя;
- на электрооборудовании – знак Ex и обозначение уровня и вида взрывозащиты, а на Ex-компонентах – знак Ex и обозначение вида взрывозащиты;
- наименование или знак органа по сертификации;
- обозначение типа электрооборудования или Ex-компонента;
- обозначение сертификата;
- знак X для электрооборудования, если он предусмотрен, или знак U для Ex-компонента.

**Примеры маркировки сертифицированного электрооборудования.**  
*Электрооборудование во взрывонепроницаемой оболочке для применения в шахтах, опасных по рудничному газу (метану):*

АО «Логика»  
Тип КСЛ.1М  
PBExdl

№ 325

Сертиум № РОСС RU.АЮ30.В00018

*Ex-компонент, частично во взрывонепроницаемой оболочке и частично с искробезопасными электрическими цепями, для применения в помещениях и наружных установках с взрывоопасными средами, кроме шахт, опасных по рудничному газу (метану), а именно с газом подгруппы С:*

АО «Интеграл»

Тип KB369

Exdia IICU

№ 744

ОС ВРЭ ВостНИИ № РОСС RU.Мг02.А00028

При маркировке искробезопасного и связанного электрооборудования (ГОСТ Р 51330.10) учитывается следующее. Серийный номер может наноситься отдельно от другой маркировки.

Для присоединенного оборудования символы Ex ia или Ex ib (либо ia или ib, если символ Ex уже нанесен) должны быть заключены в квадратные скобки.

Место маркировки всех относящихся к искробезопасности параметров, например  $U_m$ ,  $L_i$ ,  $C_i$ ,  $L_0$ ,  $C_0$  и т. п., выбирают из практических соображений.

Должно быть ограничено или исключено использование курсива или подстрочных знаков, например  $U_0$  вместо  $U_0$ ; может быть использовано упрощенное написание символов.

Соединительные средства, например клеммные коробки, соединения посредством электрических разъемов искробезопасного и подключенного электрооборудования, должны быть четко промаркированы и легко идентифицироваться. Если для этой цели используют цвет, то таким цветом должен быть голубой. Если части электрооборудования или различные аппараты соединены между собой с помощью разъемов, последние должны быть идентифицированы как содержащие только искробезопасные цепи. Там, где для этой цепи используют цвет, он должен быть голубым.

АСВ – название или знак испытательной организации.

*Искробезопасное электрооборудование ( $t_a$  – диапазон рабочих температур, АСВ – название или знак испытательной организации):*

АО «Модуль»

Тип КН25

Exia IIC T4

$-25\text{ °C} \leq t_a \leq +50\text{ °C}$

АСВ № 98.2

Серийный номер 278

## 14.5. Обеспечение защиты от поражения электрическим током

### 14.5.1. Требования к конструкции

**Опасные для жизни части не должны быть доступными.** *Опасными для жизни* называют условия с такими электрическими параметрами объекта, при которых может возникнуть опасный ток от прикосновения.

*Доступной* считается такая часть устройства, к которой может прикоснуться пользователь. При испытаниях аппаратуры доступность проверяется при помощи испытательного пальца, соответствующего МЭК 61032 ([рис. 14.4](#)).

Чтобы определить, является ли доступная часть опасной для жизни, проводят измерения между любыми двумя частями или контактами, затем между любой частью и любым полюсом источника питания, используемого во время испытания.

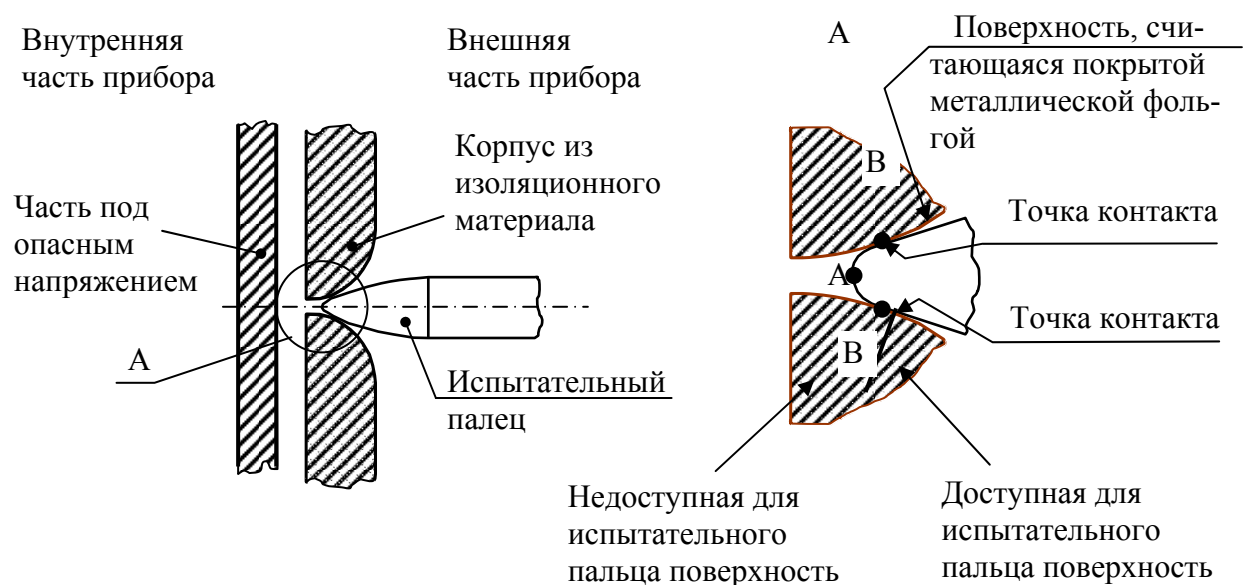


Рис. 14.4. Пример доступных частей. Точка А используется для определения доступности. Точка В используется для измерений воздушных зазоров и путей утечки

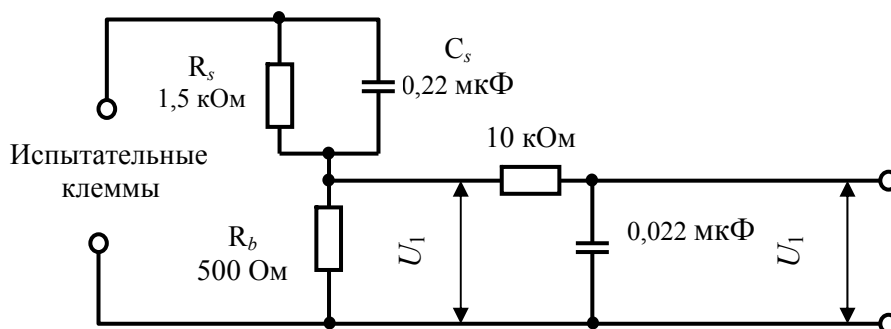


Рис. 14.5. Схема измерения тока прикосновения

Доступная часть не является опасной для жизни, если:

- напряжение разомкнутой цепи не превышает 35 В (пиковое значение) переменного тока или 60 В постоянного тока;
- ток от прикосновения, выраженный как напряжения  $U_1$  и  $U_2$  (рис. 14.5), не превышает следующих значений:  
для переменного тока:  $U_1 = 35$  В (пик.) и  $U_2 = 0,35$  В (пик.);  
для постоянного тока:  $U_1 = 1,0$  В;
- разряд не превышает 45 мкКл при наличии остаточных напряжений от 60 В до 15 кВ;
- энергия разряда не превышает 350 мДж при наличии остаточных напряжений, превышающих 15 кВ.

*Ток от прикосновения* – ток, проходящий через тело человека при прикосновении к одной или более доступным частям аппаратуры при нормальных рабочих условиях или при неисправностях.

Приведенные выше требования для определения доступности опасных для жизни частей распространяются только на опасные для жизни напряжения, не превышающие 1000 В переменного или 1500 В постоянного тока.

Аппарат должен быть сконструирован и изготовлен так, чтобы операции, выполняемые *вручную*, такие как установка напряжения питания или изменение вида питания, замена плавких вставок и элементов подсветки индикаторов, манипулирование выдвижными частями и т. п., не несли в себе опасности поражения электрическим током.

Под термином «вручную» понимается действие, которое не требует использования какого-либо предмета: инструмента, монеты и т. п.

Конструкция ЭС должна исключать риск поражения электрическим током от *доступных* частей или от тех частей, которые становятся доступными после снятия крышек вручную. Это требование также относится к внутренним частям батарейных отсеков, которые становятся доступными после снятия крышки во время замены батарей.

Это требование не распространяется на батарейные отсеки, находящиеся внутри аппарата, замена батарей в которых *пользователем* не предусмотрена, например батареи для устройств памяти.

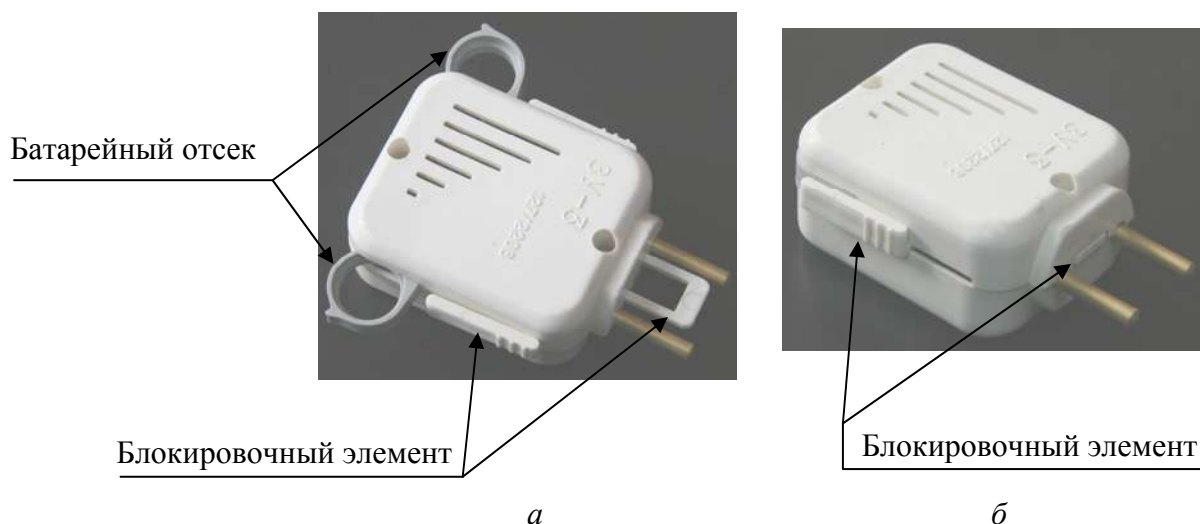


Рис. 14.6. Пример электробезопасной конструкции зарядного устройства

На [рис. 14.6](#) представлено зарядное устройство, в котором предусмотрена конструктивная защита пользователя. Во-первых, установку аккумуляторов можно провести только при отключении их от токовых клемм ([рис. 14.6, а](#)). Во-вторых, подключение зарядного устройства к сети возможно только тогда, когда механический блокировочный элемент фиксирует батарейный отсек в закрытом положении ([рис. 14.6, б](#)).

**Сеть – это источник электроэнергии номинальным напряжением более 35 В (амплитудное значение) переменного или постоянного тока.** Сеть может быть использована не только для питания аппаратуры.

Если риск поражения электрическим током возможен при несанкционированном доступе пользователя во внутрь конструкции, то обязательно должны быть предусмотрены соответствующие указания в инструкции по эксплуатации или на изделии (см. [рис. 14.3](#)).

Прибор класса I должен иметь клемму защитного заземления или контакт, к которому должны быть надежно присоединены контакты защитного заземления выходных розеток и доступные проводящие части. Такое соединение не требуется для тех доступных проводящих частей, которые отделены от опасных для жизни частей двойной или усиленной изоляцией.

Аппарат, спроектированный для питания исключительно от источника питания, определенного изготовителем аппарата, должен быть сконструирован таким образом, чтобы *специальный* источник питания не мог быть заменен на источник питания *общего назначения* без его изменения.

Оси управляющих кнопок, ручек, рычагов и аналогичных устройств не должны быть опасными для жизни.

Отверстия корпуса (вентиляционные или другие отверстия) должны быть сконструированы и расположены таким образом, чтобы посторонние предметы при их попадании в них не могли стать опасными для жизни.

Если отверстие, через которое обеспечивается доступ к органам предварительной настройки, обозначено соответствующим образом на корпусе или в инструкции по эксплуатации, а для регулирования требуется отвертка или другой инструмент, то процесс регулирования не должен быть связан с риском поражения электрическим током.

Проводники внутренней проводки, соединяющие сетевые розетки, встроенные в аппарат, с сетевыми клеммами непосредственно или через сетевой выключатель, должны соответствовать требованиям к площади поперечного сечения, приведенным в [табл. 14.5](#).

*Номинальный ток потребления* – ток потребления аппарата, работающего при номинальном напряжении питания в нормальных условиях эксплуатации.

*Номинальное напряжение питания* – напряжение питания или диапазон напряжений (в случае питания от трехфазной сети – напряжение между фазами), на которые аппарат рассчитан производителем.

Провода гибких шнуров, используемых для соединения одного аппарата с другим, работающим совместно с ним, должны иметь такую площадь поперечного сечения, чтобы повышение температуры изоляции как в нормальных условиях работы, так и при наличии неисправности было ничтожно мало.

Внутренние провода аппарата, повреждение изоляции которых может вызвать опасность, должны быть:

- закреплены таким образом, чтобы они не соприкасались с частями, имеющими температуру выше допустимых значений превышения температуры для изоляции проводов в соответствии с [табл. 14.1](#), когда усилие, равное 2 Н, прилагается к любой части проводов или их окружению;
- расположены так, чтобы не было риска повреждения их изоляции, например, острыми кромками, движущимися частями или воздействиями, которые могут привести к соприкосновениям с другими частями аппарата, когда усилие, равное 2 Н, прилагается к любой части проводов или их окружению.

Таблица 14.5

**Номинальные значения площади поперечного сечения проводников**

| Номинальный ток потребления аппарата*, А | Номинальное значение площади поперечного сечения, мм <sup>2</sup> |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| До 3 включ.                              | 0,50**                                                            |
| Свыше 3 до 6 включ.                      | 0,75                                                              |
| » 6 » 10 »                               | 1,0                                                               |
| » 10 » 16 »                              | 1,5                                                               |

\*Значения номинального тока потребления включают токи, которые могут проходить через розетки, подающие сетевое питание на другие аппараты.

\*\*Это номинальное значение площади поперечного сечения допускается только для аппаратуры класса II и при условии, что длина шнура питания, измеренная между вводом шнура в аппарат и вилкой, не превышает 2 м.

Таблица 14.6

**Масса и диаметр блока для испытаний натяжением**

| Общий диаметр гибкого шнура или кабеля, мм | Масса, кг | Диаметр блока, мм |
|--------------------------------------------|-----------|-------------------|
| До 6 включ.                                | 1,0       | 60                |
| Свыше 6 до 12 включ.                       | 1,5       | 120               |
| » 12 » 20 »                                | 2,0       | 180               |

Гибкие сетевые шнуры должны иметь защитную оболочку из поливинилхлорида или синтетической резины и выдерживать перегибы и другие механические напряжения, имеющие место при нормальной эксплуатации.

Соответствие требованию на механическую прочность проверяют испытаниями по условиям, приведенным в [табл. 14.6](#).

Наружные гибкие шнуры, содержащие один или более опасных для жизни проводников, необходимо присоединять к аппарату таким образом, чтобы места соединения проводов не подвергались натяжению, наружное покрытие – повреждению, а провод – перекручиванию.

Кроме того, конструкция должна быть такова, чтобы исключалась возможность проталкивания наружного шнура внутрь аппарата в месте его ввода, если это может повлиять на степень безопасности аппарата.

Способы, с помощью которых предотвращается натяжение и перекручивание проводов, должны быть очевидны. Не разрешается пользоваться такими приемами, как завязывание шнура на узел или перевязывание шнура веревкой. Устройства, с помощью которых предотвращается натяжение и перекручивание проводов, должны быть изготовлены из изоляционного материала (но не из натуральной резины) либо иметь стойкое покрытие из изоляционного материала.

В аппаратуре класса I размещение присоединительных клемм и длина выводов гибкого присоединительного сетевого шнура между приспособлением, препятствующим натяжению жил, и этими клеммами должны быть подобраны таким образом, чтобы в случае высвобождения шнура из этого приспособления и его обрыва последней оборвалась клемма защитного заземления.

Входное отверстие для наружных гибких шнуров должно быть сконструировано таким образом, чтобы при введении или перемещении шнура не происходило его повреждение. Это может быть достигнуто, например, путем закругления кромки входного отверстия или использования соответствующей втулки из изоляционного материала.

Передвижные аппараты, такие как музыкальные инструменты и работающие совместно с ними усилители, должны иметь устройства ввода наружного шнура для подключения к сети с помощью съемного шнура, или приспособление для его укладки, когда он не используется (например, в отсек) или закрепления на скобах или других приспособлениях.



Несъемные гибкие кабели и шнуры аппаратуры класса I должны быть оснащены зелено-желтой изолированной жилой, соединяющей клемму защитного заземления вилки при ее наличии.

#### 14.5.2. Требования к изоляции

Для изоляции частей, находящихся под *опасным для жизни* напряжением, не должны применяться гигроскопические материалы. Проводящие части, покрытые только лаком, эмалью на основе растворителя, обычной бумагой, непропитанной тканью, оксидной пленкой или шайбами из диэлектрика, рассматриваются как неизолированные.

Безопасность аппарата не должна нарушаться при воздействии влажности, которая может появиться во время эксплуатации.

Изоляция между *доступными* частями или частями, подключенными к ним, и *опасными для жизни* частями должна выдерживать перенапряжение, обусловленное переходными процессами, например атмосферными разрядами, воздействующими на аппарат через соединитель антенны.

Соответствие требованию проверяют следующим испытанием. Изоляцию между *соединителем* для подключения антенны и *клеммами* для сетевого питания подвергают воздействию 50 разрядов с максимальной скоростью 12 разрядов в минуту от конденсатора емкостью 1 нФ, заряженного до напряжения 10 кВ.

Доступные проводящие части аппарата класса I, за исключением тех частей аппарата, которые имеют *двойную* или *усиленную* изоляцию (конструкция класса II), должны быть отделены от опасных для жизни частей *основной* изоляцией, соответствующей требованиям к изоляции и требованиям к зазорам и путям утечек.

Это требование не распространяется на изоляцию, короткое замыкание которой не вызывает какой-либо опасности поражения электрическим током.

*Основная изоляция* – изоляция опасных для жизни частей, обеспечивающая основную защиту от поражения электрическим током. Основная изоляция необязательно должна включать в себя изоляцию, используемую исключительно для функциональных целей.

*Двойная изоляция* – изоляция, включающая как основную, так и дополнительную изоляцию.

*Дополнительная изоляция* – независимая изоляция, дополняющая основную изоляцию и служащая для защиты от поражения электрическим током в случае пробоя основной изоляции.

Кожухи из дерева могут использоваться как дополнительная изоляция, если они выдержали испытание на электрическую прочность.

*Усиленная изоляция* – единая система изоляции опасных для жизни частей, обеспечивающая степень защиты от поражения электрическим током, эквивалентную двойной изоляции. Усиленная изоляция может включать несколько слоев, которые не могут быть испытаны отдельно как основная изоляция или как дополнительная изоляция.

Доступные части аппарата класса II должны быть отделены от опасных для жизни частей либо *двойной* изоляцией, либо *усиленной* изоляцией.

Основная изоляция является достаточной для использования между цепями с напряжениями свыше 35 до 71 В переменного тока или от 60 до 120 В постоянного тока и доступными частями или частями, соединенными с доступными проводящими частями.

Цепи с напряжениями, приведенными выше, должны быть отделены от опасных для жизни частей с более высокими напряжениями одним из следующих способов:

- двойной или усиленной изоляцией;
- изолирующим трансформатором;
- проводящей частью, соединенной с клеммой защитного заземления;
- разделительным трансформатором.

*Изолирующий трансформатор* – трансформатор, имеющий защитное разделение между входной и выходной обмотками.

*Защитное разделение* – разделение между цепями посредством основной и дополнительной защиты (основная изоляция плюс дополнительная изоляция или плюс защитное экранирование) или равноценное обеспечение защиты, например посредством усиленной изоляции.

*Защитное экранирование* – отделение от опасных для жизни частей посредством проводящих экранов, соединенных с клеммой защитного заземления.

*Разделительный трансформатор* – трансформатор, у которого входные обмотки отделены от выходных обмоток, по крайней мере, с помощью основной изоляции.

*Клемма защитного заземления* – клемма, с которой соединены части аппаратуры, которые должны быть заземлены в целях безопасности.

Изолирующие материалы должны удовлетворять требованиям по электрической прочности и сопротивлению изоляции.

Испытательное напряжение для проверки качества изоляции приведены в табл. 14.7. Основная, дополнительная и усиленная изоляции должны, каждая в отдельности, выдержать испытание на электрическую прочность, как определено на [рис. 14.7](#).

Двойная или основная и дополнительная изоляции должны иметь толщину не менее 0,4 мм.

Усиленная изоляция может иметь минимальную толщину 0,4 мм в том случае, если она не подвергается никаким механическим воздействиям, которые могли бы привести к деформации или ухудшению изоляционного материала.

Таблица 14.7

**Испытательные напряжения для проведения испытаний  
на электрическую прочность и сопротивление изоляции**

| Вид изоляции                                                      | Сопротивление изоляции, МОм | Испытательное напряжение переменного (пиковое значение) или постоянного тока, В                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Между полюсами деталей, непосредственно соединенных с сетью       | 2                           | Для номинальных напряжений сети $\leq 150 \text{ В}_{\text{эфф.}}$ – 1410 В.<br>Для номинальных напряжений сети $> 150 \text{ В}_{\text{эфф.}}$ – 2120 В |
| Между частями, разделенными основной или дополнительной изоляцией | 2                           | Кривая А на рис. 14.7                                                                                                                                    |
| Между частями, разделенными усиленной изоляцией                   | 4                           | Кривая В на рис. 14.7                                                                                                                                    |

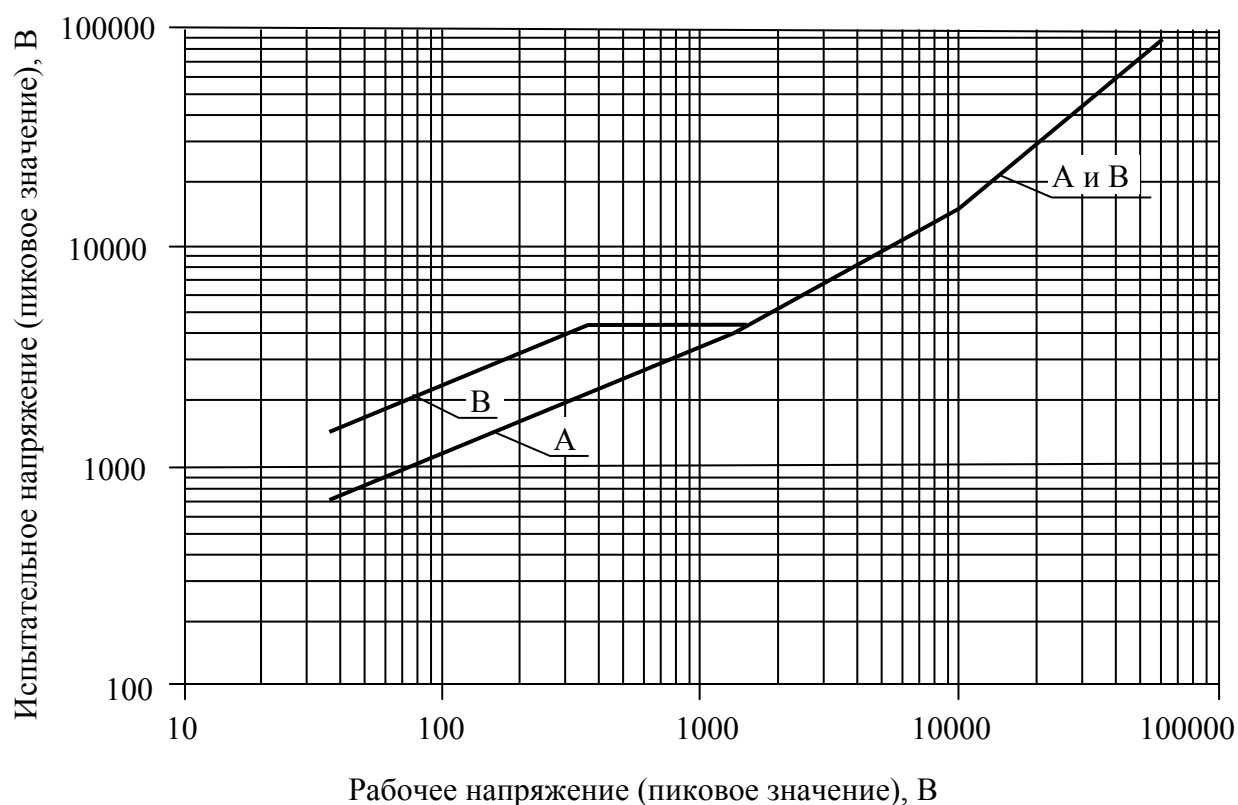


Рис. 14.7. Зависимость величины испытательного напряжения от рабочего

Требования по толщине не применяются к изоляции из тонких листовых материалов независимо от их толщины при следующих условиях:

- данная изоляция используется внутри корпуса аппарата;
- основная или дополнительная изоляция содержит, по крайней мере, два слоя материала, каждый из которых выдерживает испытание на электрическую прочность;
- основная или дополнительная изоляция содержит три слоя материала;

ла, все комбинации которого по два слоя вместе выдерживают испытание на электрическую прочность;

- усиленная изоляция содержит, по крайней мере, два слоя материала, каждый из которых выдерживает испытание на электрическую прочность;
- усиленная изоляция содержит три слоя изолирующего материала, все комбинации которого по два слоя выдерживают испытание на электрическую прочность.

Изоляция внутренней проводки между опасными для жизни проводящими жилами проводов или кабелей и доступными частями должна иметь толщину не менее 0,4 мм, если она изготовлена из поливинилхлорида. Другие материалы допускаются в том случае, если они выдерживают испытание на электрическую прочность и если их толщина обеспечивает механическую прочность для конкретной конструкции.

В аппарате класса II двойная изоляция должна быть обеспечена между: доступными частями и проводящими жилами проводов или кабелей, соединенных с сетью;

проводящими жилами проводов или кабелей, соединенными с доступными проводящими частями и частями, соединенными с сетью.

Если двойная изоляция состоит из двух слоев, которые не могут быть испытаны отдельно, то изоляция должна выдерживать испытание на электрическую прочность для усиленной изоляции.

Части аппарата, которые имеют основную, двойную или усиленную изоляцию, могут быть шунтированы резистором, конденсатором или резистивно-емкостным блоком. Эти элементы должны размещаться внутри корпуса аппарата.

### **14.5.3. Обеспечение защитного заземления**

Доступные проводящие части аппаратуры класса I, которые могут оказаться под опасным напряжением при нарушении основной изоляции, и контакты защитного заземления в розетках должны быть надежно соединены с клеммой защитного заземления аппарата.

В цепях защитного заземления не должно быть выключателей или плавких предохранителей.

У источников питания класса I, имеющих неопасные для жизни выходные напряжения, выходные цепи не должны соединяться с проводом защитного заземления.

Проводники защитного заземления могут быть оголенными или изолированными. Изолированные провода должны иметь зелено-желтую изоляцию, за исключением следующих двух случаев:

изоляция заземляющей оплетки должна быть либо зелено-желтой, либо прозрачной;

для внутренних защитных проводников в таких монтажных сборках, как резиновые кабели, шины, гибкая печатная проводка и т. п., может приме-

няться любой цвет при условии, что при их использовании не возникнет никакого неправильного толкования.

Провода зелено-желтой расцветки должны использоваться только для соединений защитного заземления.

Для постоянно подключенной аппаратуры или аппаратуры, снабженной несъемным гибким шнуром или кабелем, должна быть использована независимая клемма защитного заземления, которая должна быть расположена вблизи сетевых клемм и не должна служить для крепления других компонентов.

Если части, снимаемые вручную, имеют соединение с защитным заземлением, то при установке этих частей на место соединение с защитным заземлением должно происходить до включения токонесущих соединений и, наоборот, при снятии этих частей отсоединение защитного заземления должно происходить после отключения токонесущих соединений.

Проводящие части при контакте с проводниками защитного заземления не должны подвергаться существенной электрохимической коррозии.

Клеммы защитного заземления должны быть устойчивы к существенной коррозии.

Сопротивление соединения между контактами или клеммами защитного заземления и частями, которые должны быть подсоединены к защитному заземлению, не должно быть более 0,1 Ом.

#### 14.5.4. Зазоры и пути утечек

Конструкция аппарата должна быть такой, чтобы в случае отсоединения любого провода не произошло уменьшения значений *зазоров* и *путей утечек* вследствие естественного перемещения отсоединившегося провода. Это требование не применяется, если отсутствует риск отсоединения провода.

*Зазор* – кратчайшее расстояние между двумя токопроводящими частями в воздухе.

*Путь утечки* – кратчайшее расстояние между двумя токопроводящими частями, измеренное по внешней поверхности изоляционного материала.

Зазоры и пути утечек должны иметь размеры в соответствии с [рис. 14.8](#) и применяться с учетом следующих условий:

- указанные значения применяются к основной, дополнительной и усиленной изоляции;
- для основной, дополнительной и усиленной изоляции предполагается, что все детали цепи, непосредственно соединенной с сетью, находятся под напряжением не менее номинального напряжения сети по отношению к земле;
- для деталей, непосредственно соединенных с сетью напряжением от 220 до 250 В (эффективное значение), размеры выбирают под напряжением 354 В (пиковое значение);
- напряжение, приложенное к основной изоляции, определяют при закорачивании дополнительной изоляции и наоборот;
- кривые построены исходя из следующего:  
кривая А: 35 В соответствуют 0,6 мм; 354 В соответствуют 3,0 мм;  
кривая В: 35 В соответствуют 1,2 мм; 354 В соответствуют 6,0 мм;
- установленные воздушные зазоры и пути утечки являются минимально существующими разделениями с учетом точности в сборках и деталях.

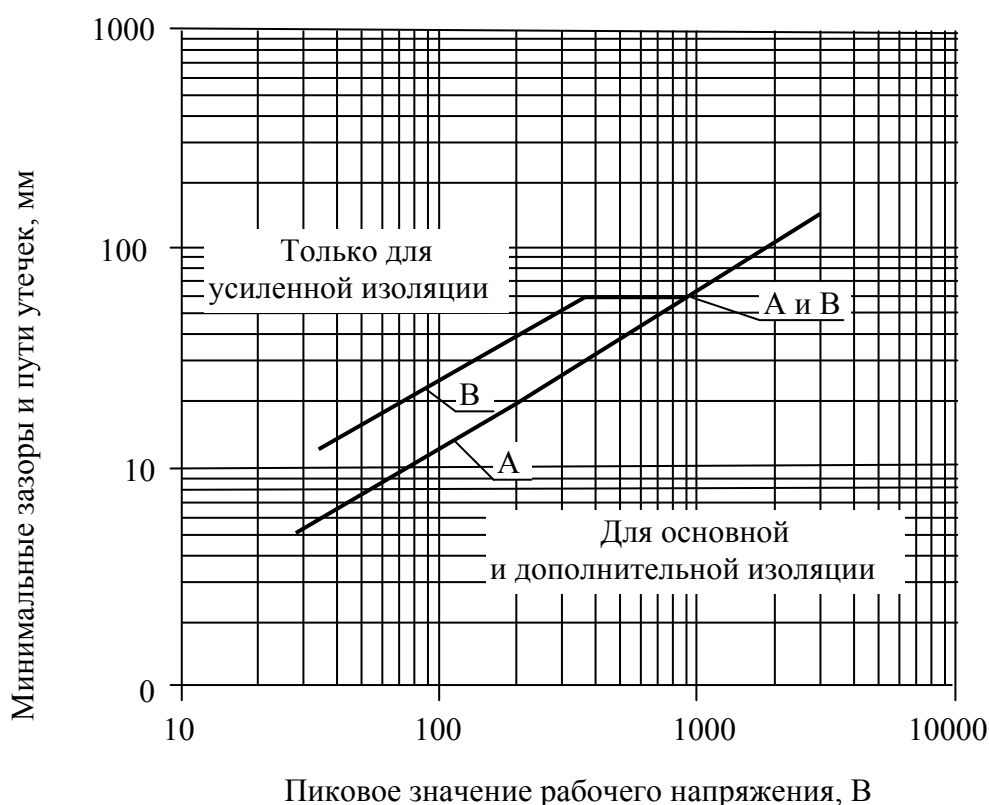


Рис. 14.8. Величины воздушных зазоров и путей утечек

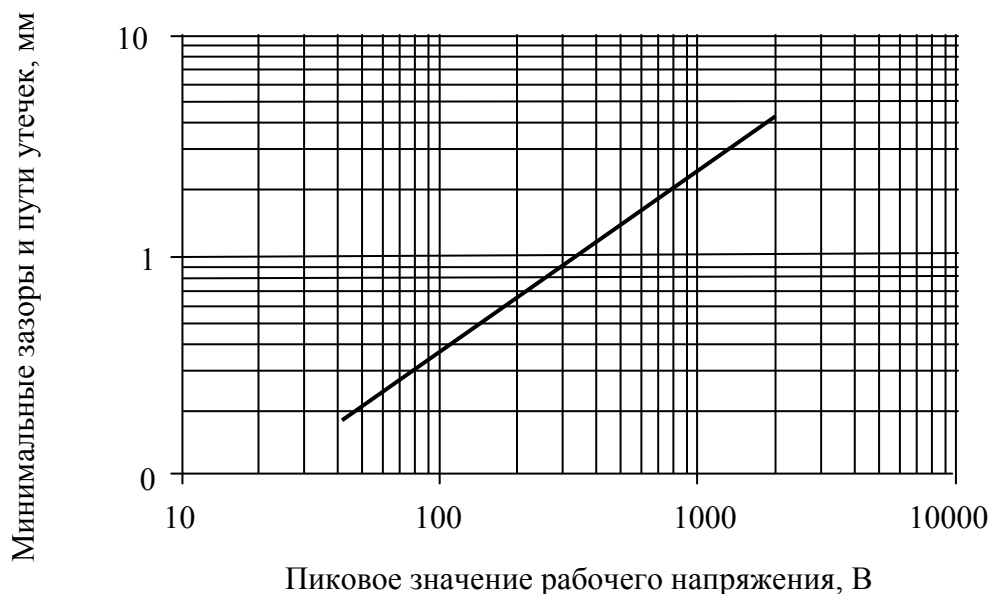


Рис. 14.9. Минимальные расстояния зазоров и путей утечек для печатных плат

Установленные зазоры не распространяются на воздушные промежутки между контактами устройств защиты, выключателей, имеющих конструкцию с маленьким коммутационным зазором, и аналогичных компонентов, где зазор изменяется при движении контактов.

Минимальные расстояния зазоров и путей утечек между проводниками (один из которых может быть соединен с сетью) на ПП даны на [рис. 14.9](#), при этом они должны соответствовать требованиям, приведенным ниже:

- эти расстояния применяются только к самим проводникам, не применяются к установленным компонентам или соединениям пайкой;
- лаковые или аналогичные покрытия не учитывают при измерении этих расстояний;
- если зазор состоит из двух или более воздушных промежутков, последовательно разделенных проводящими частями, то при расчете его общего расстояния промежутки, имеющие ширину менее 0,2 мм, не учитывают;
- кривую рассчитывают по формуле

$$\lg d = 0,78 \lg (V/300),$$

где  $d$  – расстояние (при минимальном расстоянии зазора и пути утечки, равном 0,2 мм);  $V$  – пиковое значение рабочего напряжения, В.

Значения расстояний зазоров и путей утечек, вычисляемых по [рис. 14.9](#), являются минимальными. Они могут быть уменьшены на 1 мм для основной и дополнительной изоляции и на 2 мм для усиленной изоляции при условии выполнения следующих трех требований:

- они не должны находиться между доступными проводящими частями корпуса и опасными для жизни частями;

- они должны поддерживаться посредством жесткой конструкции;
- должно быть маловероятным значительное снижение их изоляционных свойств от любого осаждения проводящей пыли, возникающего внутри аппарата, например от угольных щеток коллекторного электродвигателя.

При этом минимальные зазоры и пути утечек не должны быть ниже двух третей значений, определенных кривыми на [рис. 14.8](#), а также не менее 0,5 мм для основной или дополнительной изоляции и не менее 1,0 мм для усиленной изоляции.

Таблица 14.8

**Минимальные зазоры и пути утечек для конструкций,  
которые заключены в оболочку или герметично закрыты**

| Рабочее напряжение $U$<br>переменного<br>или постоянного тока<br>(пиковое значение), В | Минимальные<br>зазоры<br>и пути утечек, мм | Рабочее напряжение $U$<br>переменного<br>или постоянного тока<br>(пиковое значение), В | Минимальные<br>зазоры<br>и пути утечек, мм |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $U \leq 35$                                                                            | 0,2                                        | $U \leq 900$                                                                           | 2,3                                        |
| $U \leq 45$                                                                            | 0,2                                        | $U \leq 1120$                                                                          | 2,6                                        |
| $U \leq 56$                                                                            | 0,3                                        | $U \leq 1400$                                                                          | 3,2                                        |
| $U \leq 70$                                                                            | 0,3                                        | $U \leq 1800$                                                                          | 4,2                                        |
| $U \leq 90$                                                                            | 0,4                                        | $U \leq 2250$                                                                          | 5,6                                        |
| $U \leq 110$                                                                           | 0,4                                        | $U \leq 2800$                                                                          | 7,5                                        |
| $U \leq 140$                                                                           | 0,5                                        | $U \leq 3600$                                                                          | 10,0                                       |
| $U \leq 180$                                                                           | 0,7                                        | $U \leq 4500$                                                                          | 12,5                                       |
| $U \leq 225$                                                                           | 0,8                                        | $U \leq 5600$                                                                          | 16,0                                       |
| $U \leq 280$                                                                           | 1,0                                        | $U \leq 7000$                                                                          | 20,0                                       |
| $U \leq 360$                                                                           | 1,1                                        | $U \leq 9000$                                                                          | 25,0                                       |
| $U \leq 450$                                                                           | 1,3                                        | $U \leq 11200$                                                                         | 32,0                                       |
| $U \leq 560$                                                                           | 1,6                                        | $U \leq 14000$                                                                         | 40,0                                       |
| $U \leq 700$                                                                           | 1,9                                        |                                                                                        |                                            |

Для аппаратов, сборочных узлов или компонентов, которые не соединены с сетью, ограждены, заключены в оболочку или герметично закрыты для предотвращения попадания грязи и влаги, минимальные внутренние зазоры и пути утечек могут быть снижены до значений, приведенных в [табл. 14.8](#). Примерами таких конструкций являются герметично запаянные металлические коробки, пластмассовые коробки, запечатанные клеящим веществом, и части, покрытые обволакивающим материалом.



### 14.5.5. Требования к клеммам и соединителям

Сетевые розетки, имеющиеся на аппарате класса II и служащие для подключения других аппаратов, должны обеспечивать возможность подключения только аппаратов класса II.

Сетевые розетки, имеющиеся на аппарате класса I, предназначенные для подключения других аппаратов, должны обеспечивать возможность подключения только аппаратов класса II или быть снабжены клеммой защитного заземления, надежно соединяемой с клеммой защитного заземления других аппаратов класса I.

Для аппаратов, имеющих розетки, обеспечивающие подачу сетевого питания на другие аппараты, должны быть приняты меры, предотвращающие перегрузку их вилок или входных соединителей, обеспечивающих соединение аппарата с сетью, если номинальный ток вилок и устройств ввода менее 16 А.

Внешние провода розеток, обеспечивающих подачу сетевого питания на другие аппараты, должны иметь поперечное сечение, установленное в [табл. 14.5](#) для внешних гибких шнуров.

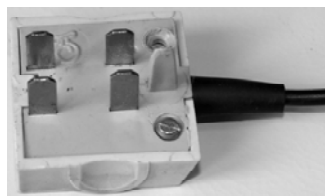
Соединители, которые не предназначены для подключения к сети питания, должны быть сконструированы так, чтобы их вилки имели такую форму, которая исключала бы возможность их подсоединения к розеткам сети питания.

Клеммы и соединители, используемые в выходных цепях источников питания, выходное напряжение которых не соответствует стандартным номинальным напряжениям сети, не должны быть совместимыми с контактными устройствами, которые установлены для бытовой и аналогичной аппаратуры.

Постоянно подключенная аппаратура должна иметь клеммы, соединение с которыми осуществляется с помощью винтов, гаек или аналогичных устройств, например безвинтовых клеммных устройств.



*а*



*б*



*в*

Рис. 14.10. Конструкции вилок, предназначенные для подключения к разным цепям:  
*а* – к сети 220 В аппарата класса II; *б* – к телефонной сети;  
*в* – для подключения вторичного электропитания к сотовому телефону

В аппаратуре с несъемными сетевыми шнурами питания присоединение отдельных проводников к внутренней проводке аппаратуры должно про-

изводиться с помощью средств, которые будут обеспечивать *надёжное электрическое и механическое соединения*, за исключением проводников питания и защитного заземления несъёмного сетевого шнура или кабеля, которые не должны паяться непосредственно к проводникам печатной платы.

Спаянные, скрученные и другие аналогичные соединения могут применяться для соединения внешних проводников. Паяные или скрученные соединения должны быть выполнены таким образом, чтобы зазоры и пути утечек не были меньше необходимых значений и чтобы не было возможности разрушения паяных соединений или соскальзывания скрученных соединений. Кроме того, проводники должны быть расположены и зафиксированы таким образом, чтобы была уверенность в том, что перемещение проводников не произойдет и будет поддерживаться их правильное положение.

Винты и гайки, закрепляющие провода внешней сети питания, должны иметь резьбу, соответствующую требованиям ИСО 261 или ИСО 262. С их помощью не должно осуществляться одновременное крепление других компонентов, за исключением внешних проводников, если они расположены таким образом, что вероятность их смещения при установке проводников сети питания незначительна.

Клеммы для внешних гибких шнуров должны позволять соединение с проводниками, имеющими номинальное поперечное сечение, указанное в [табл. 14.9](#), и иметь минимальные размеры, указанные в [табл. 14.10](#).

Клеммы шпилечного типа должны быть оснащены шайбами.

Клеммы должны быть сконструированы так, чтобы:

- они зажимали проводник между металлическими поверхностями с достаточным давлением контакта;
- они зажимали проводник без повреждения проводника;
- провод не мог выскользнуть при натяжении проводника.

Клеммы должны быть так зафиксированы, чтобы, когда зажим проводника усиливается или ослабевает:

- сама клемма не теряла фиксации ([рис. 14.11](#));
- внутренние провода не подвергались натяжению;
- зазоры и пути утечек не становились меньше установленных.

Таблица 14.9

**Номинальные поперечные сечения проводников, подключаемых к клеммам**

| Номинальный ток потребления аппарата, А | Номинальное поперечное сечение, мм <sup>2</sup> |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| До 3 включ.                             | От 0,5 до 0,75 включ.                           |
| Свыше 3 до 6 включ.                     | Свыше 0,75 до 1,0 включ.                        |
| » 6 » 10 »                              | » 1,0 » 1,5 »                                   |
| » 10 » 16 »                             | » 1,5 » 2,5 »                                   |

Минимальные номинальные размеры диаметра резьбы

| Номинальный ток потребления аппаратуры, А | Минимальный номинальный диаметр резьбы, мм |      |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------|------|
|                                           | Стойка или шпилька                         | Винт |
| До 10 включ.                              | 3,0                                        | 3,5  |
| Свыше 10 до 16 включ.                     | 3,5                                        | 4,0  |

*a**б*

Рис. 14.11. Фиксация клеммы: *a* – внешний вид клеммы;  
*б* – конфигурация стопорных шайб

Клеммы в цепях, пропускающих ток более 0,2 А в нормальных рабочих условиях, должны быть сконструированы так, чтобы давление контакта не передавалось на изоляционный материал, кроме керамики, если нет достаточной упругости металлических частей, способных скомпенсировать возможную усадку изоляционных материалов.

У несъемных сетевых шнуров питания каждая клемма должна устанавливаться вблизи клеммы другого соответствующего потенциала и клеммы защитного заземления при ее наличии.

Клеммы должны быть установлены, защищены или изолированы таким образом, чтобы не было риска случайного контакта между проводом, отделившимся от скрученного многожильного кабеля, и доступными проводящими частями или проводящими частями, соединенными с ними, а также проводящими частями, не соединенными с клеммой защитного заземления и отделенными от доступных проводящих частей только дополнительной изоляцией.

Проверку на выполнение этих требований проводят следующим образом. С конца многожильного провода, имеющего номинальную площадь поперечного сечения, снимают изоляцию на участке длиной 8 мм, после чего провод этим концом подсоединяют к клемме так, чтобы одна жила осталась свободной. Свободную жилу изгибают в любом возможном направлении без нарушения изоляции и закручивания конца жилы за имеющиеся препятствия.

Если проводник является опасным для жизни, то свободный провод не должен касаться никакой проводящей доступной части или части, соединенной с доступной проводящей частью, или (если прибор имеет двойную изоляцию) никакой проводящей части, которая отделена от доступных частей только двойной изоляцией.

Устройства, сконструированные в виде сетевой вилки ([рис. 14.12](#)), т. е. снабженные штырями, предназначенными для введения в розетку, не должны создавать в гнездах этой розетки чрезмерных механических напряжений.

Изгибающий момент не должен превышать 0,25 Н·м. Сила натяжения, действующая на штыри, не должна превышать значений, указанных в [табл. 14.11](#).

При отсутствии соединений с другой аппаратурой недоступные контакты клемм не должны быть опасными для жизни, за исключением:

- контактов выходных сигнальных клемм, если они являются опасными для жизни по причине функциональных особенностей аппарата при условии, что эти контакты отделены от источников питания. Допускается, чтобы недоступные входные клеммы, например у громкоговорителей, были опасными для жизни, если они присоединены к данным выходным клеммам;
- соединителей, предназначенных для подключения аппарата к сети, выходных розеток и контактов соединяющих устройств для обеспечения питанием других аппаратов.



*а*



*б*

Рис. 14.12. Блоки питания, выполненные в виде сетевой вилки:  
*а* – для настольной люминесцентной лампы; *б* – для сотового телефона

Таблица 14.11

**Сила натяжения, действующая на штыри**

| Классификация вилок по соответствующим типам | Количество полюсов | Сила натяжения, Н |
|----------------------------------------------|--------------------|-------------------|
| До 10 А включ.                               | 2                  | 40                |
| 130/250 В                                    | 3                  | 50                |
| От 10 до 16 А включ.                         | 2                  | 50                |
| 130/250 В                                    | 3                  | 54                |
| От 10 до 16 А включ.                         | 3                  | 54                |
| 440 В                                        | Более 3            | 70                |

Применение однополюсной вилки или неизолированного провода для соединения с контактом клеммы, используемой для подключения заземления

или антенны, а также сигналов звука, изображения или взаимодействия не должно создавать опасности поражения электрическим током.

Аппарат, предназначенный для подключения к сети с помощью сетевой вилки, должен быть сконструирован таким образом, чтобы не было опасности поражения электрическим током от заряда, накопленного на конденсаторах, в случае прикосновения к штырям или контактам вилки после ее отсоединения от розетки.

#### 14.5.6. Требования к компонентам

**Резисторы,** короткое замыкание или обрыв которых вызывает нарушение требований безопасности при работе в условиях неисправностей, а также резисторы, шунтирующие промежутки между контактами сетевых выключателей, должны иметь достаточно стабильное значение сопротивления в режиме перегрузки.

Такие резисторы должны размещаться внутри корпуса аппарата.

**Плавкие вставки и держатели плавких предохранителей.** Плавкие вставки, непосредственно соединяемые с сетью, применяются с целью обеспечения безопасности аппарата.

Держатели плавких предохранителей должны быть сконструированы так, чтобы параллельное включение нескольких плавких вставок в одну и ту же цепь было невозможным.

Если опасные для жизни части аппарата окажутся доступными при замене плавких предохранителей или прерывающих устройств, то необходимо предотвратить возможность доступа к этим частям вручную.

Если носители плавких вставок можно снять вручную с внешней стороны аппарата, держатели миниатюрных цилиндрических плавких вставок винтового или байонетного типа должны быть сконструированы таким образом, чтобы опасные для жизни части не становились доступными ни во время установки или снятия плавкой вставки, ни после снятия плавкой вставки.

Такие устройства защиты, как, например, плавкие резисторы, плавкие вставки или миниатюрные прерыватели, должны иметь необходимую замыкающую способность.

**Выключатели.** Постоянно подключенная аппаратура должна быть оснащена всеполюсным сетевым выключателем. Он должен иметь контактные разъединения не менее 3 мм в каждом полюсе.

*Всеполюсный сетевой выключатель* – механический выключатель, управляемый вручную и разъединяющий все полюса сети электропитания, за исключением провода защитного заземления.

В аппаратуре, которая при нормальных рабочих условиях потребляет более 15 Вт и/или имеет импульсное напряжение, превышающее 4 кВ, должен быть установлен механический выключатель, управляемый вручную.

*Механический выключатель, управляемый вручную*, – управляемое вручную устройство, не содержащее полупроводниковых приборов, расположенное в любой цепи аппарата, которая может прерывать предполагаемые функции, такие как звук и/или изображение, посредством перемещения контактов. Примерами механических выключателей, управляемых вручную, являются однополюсные или всеполюсные сетевые выключатели, функциональные выключатели и выключающие системы, которые, например, могут быть комбинацией реле и выключателей, управляющих действиями реле.

Выключатель должен быть подсоединен так, чтобы при положении «выключено» было обеспечено потребление мощности менее 15 Вт и/или импульсное напряжение не превышало 4 кВ при эксплуатации в нормальных рабочих условиях и в условиях неисправности.

Выключатель должен быть размещен так, чтобы был легкодоступным для пользователя. Не допускается установка выключателя на гибком сетевом кабеле или шнуре.

Независимо от мощности потребления не требуется установка выключателей в аппаратуре или части аппаратуры, которая функционирует самостоятельно и у которой в нормальных условиях эксплуатации пиковое значение напряжения не превышает 4 кВ, при условии, что она включается автоматически без вмешательства человека (например, радиочасы, видеоманитофоны, аппаратура, управляемая по линии связи) и предназначена для непрерывной работы (например, антенные усилители, радиочастотные преобразователи и модуляторы, устройства, образующие часть сетевой вилки).

На аппарате, для которого требуется механический выключатель, управляемый вручную, положение выключателя «включено» должно быть указано. Указание положения «включено» может выполняться световой или звуковой индикацией или другими подходящими способами.

Если маркировка, сигнальные лампы или аналогичные средства могут давать восприятие, что аппаратура полностью отключена от сети, в инструкцию должна быть включена полная и ясная информация о состоянии аппаратуры. При применении символов их значение также должно быть объяснено.

Аппаратура, которую можно переводить в рабочее состояние из дежурного режима и где требуется механический выключатель, управляемый вручную, должна быть оснащена индикацией, указывающей, что аппаратура находится в состоянии дежурного режима. Индикация состояния дежурного режима может выполняться световой или звуковой индикацией или другими подходящими способами.

Индикация не требуется, если ток потребления аппаратуры в состоянии дежурного режима не превышает 0,7 мА (пиковое значение) переменного или постоянного тока.

Если напряжение на разомкнутых контактах превышает 35 В (пиковое значение) переменного тока или 24 В постоянного тока, управляемый вручную механический выключатель, управляющий током более 0,2 А среднеквадратического значения переменного или постоянного тока, должен удовлетворять одному из следующих требований:

- выключатель должен быть пригоден для использования в условиях нормального загрязнения;
- по теплостойкости и огнестойкости выключатель должен относиться к 3-му уровню (МЭК 61058-1);
- скорость включения и разрыва контактов сетевых выключателей не должна зависеть от скорости воздействия;
- должен быть способен выполнять функции выключения в нормальных рабочих условиях;
- должен иметь соответствующую электрическую прочность.

Выключатель должен быть сконструирован таким образом, чтобы во время его предполагаемого использования не было чрезмерного повышения температуры. Применяемые материалы должны быть такими, чтобы характеристики выключателя не оказывали неблагоприятного действия на работу аппаратуры во время его предполагаемого использования. В частности, материал и конструкция контактов и выводов должны быть такими, чтобы работа и манипуляции выключателя не приводили к их окислению и другим видам износа.

**Защитные блокировки.** Установка защитных блокировок должна предусматриваться там, где возможен доступ вручную к зонам, представляющим опасность.

**Устройства установки напряжения и аналогичные устройства.** Аппаратура должна быть сконструирована таким образом, чтобы изменение установки одного напряжения на другое или одного типа питания на другой не могло произойти случайно.

**Электродвигатели** должны быть сконструированы так, чтобы исключить при их длительной нормальной эксплуатации вероятность каких-либо электрических и механических неисправностей. Изоляция не должна повреждаться, а контакты и соединения при нагреве, вибрации и т. п. не должны нарушаться.

**Трансформаторы.** Первичная и вторичная обмотки должны быть электрически разделены друг от друга, а конструкция обмоток должна быть такой, чтобы не было возможности никаких соединений между этими обмотками непосредственно или через проводящие части.

В частности, должны быть приняты меры, чтобы предотвратить:

- недопустимое смещение первичной или вторичной обмоток или их витков;
- недопустимое смещение внутренних проводов или проводов внешних соединений;
- недопустимое смещение частей обмотки или внутренних проводов в результате обрыва проводов или нарушения соединений;
- шунтирование любой части изоляции между первичной и вторичной обмотками, а также соединений обмоток, которое может произойти при утере



или ослаблении проводников, болтов, шайб и других подобных деталей.

Последний виток каждой обмотки должен быть закреплен соответствующим образом, например с помощью ленты, подходящим клеящим веществом, либо технологический процесс должен предусматривать способ крепления.

В случае использования катушек без щечек конечные обороты каждого слоя должны быть закреплены соответствующим образом. Каждый слой может, например, чередоваться с соответствующим изоляционным материалом, защищающим конечные обороты каждого слоя. Кроме того:

- обмотки должны быть пропитаны спекаемым материалом или материалом, отвердевающим при низкой температуре, значительно заполняющим пространство между слоями и надежно закрепляющим концы обмоток;
- обмотки должны удерживаться вместе изоляционным материалом;
- обмотки должны быть закреплены, например, технологическим процессом.

## **14.6. Обеспечение механической прочности, теплостойкости и огнестойкости.**

### **14.6.1. Обеспечение механической прочности**

Аппарат должен обладать достаточной механической прочностью и быть сконструирован так, чтобы выдержать воздействия, возможные в течение его эксплуатации.

Корпус аппарата должен обладать достаточным противодействием к приложению внешних сил. Соответствие этому требованию проверяют следующими испытаниями.

1. Жесткий испытательный палец в течение 10 с прикладывают к различным точкам корпуса, включая отверстия и текстильную обивку, с усилием, направленным внутрь и равным  $(50 \pm 5)$  Н. Во время испытания корпус не должен становиться опасным для жизни, а опасные для жизни части не должны оказаться доступными; текстильные обивки не должны касаться опасных для жизни частей.



2. С помощью испытательного крюка прикладывают направленное усилие  $(20 \pm 2)$  Н во всех точках, где это возможно, в течение 10 с. Во время испытания опасные для жизни части не должны оказаться доступными.

3. Внешние проводящие кожухи и проводящие части внешней части корпуса должны подвергаться в течение 5 с постоянному усилию, равному  $(250 \pm 10)$  Н для напольной аппаратуры или  $(100 \pm 10)$  Н для другой аппаратуры, приложенному к корпусу или части корпуса, прикрепленной к аппарату с помощью соответствующего испытательного инструмента, обеспечивающего поверхностное прикосновение в виде окружности диаметром 30 мм.

Конструкция аппарата должна исключать возможность короткого замыкания изоляции между опасными для жизни частями и доступными частями или частями, соединившимися с ними, например, в результате случайного ослабления или потери винтов.

Для проверки соответствия требованиям на механическую прочность проводят испытание вибрацией, испытание падением и испытание ударом. Например, передвижные аппараты, предназначенные для усиления звука музыкальных инструментов, портативные аппараты, а также аппараты, имеющие металлический корпус, подвергают испытаниям на виброустойчивость.

Аппарат с помощью ремней, опоясывающих корпус, закрепляют на вибростенде в положении, предназначенном для эксплуатации. Направление вибрации вертикальное. Условия испытания следующие:

- продолжительность – 30 мин;
- амплитуда – 0,35 мм;
- диапазон частот – от 10 до 55 Гц и от 55 до 10 Гц;
- скорость изменения частоты – приблизительно одна октава в минуту.

После окончания испытаний аппарат не должен иметь повреждений, в особенности не должны нарушаться соединения или ослабляться крепления деталей, приводящие к снижению безопасности.

Проверку соединения крепежными винтами осуществляют следующим образом. Их отвинчивают, потом завинчивают с приложением крутящего момента, равного  $\frac{2}{3}$  значения, указанного в [табл. 14.12](#), затем ослабляют на  $\frac{1}{4}$  оборота. После этого к органам управления в течение 1 мин прикладывают вращающий момент по касательной к окружности, соответствующий усилию 100 Н, но не более 1 Н·м, а также в течение 1 мин осевую растягивающую силу, равную 100 Н. Если масса аппарата менее 10 кг, то значение растягивающего усилия не должно превышать массы аппарата, но должно быть не менее 25 Н.

**Вращающий момент, прикладываемый к винтам**

| Номинальный диаметр винта, мм | Вращающий момент, Н·м |     |      |
|-------------------------------|-----------------------|-----|------|
|                               | I                     | II  | III  |
| До 2,8 включ.                 | 0,20                  | 0,4 | 0,40 |
| Свыше 2,8 до 3,0 включ.       | 0,25                  | 0,5 | 0,50 |
| » 3,0 » 3,2 »                 | 0,30                  | 0,6 | 0,60 |
| » 3,2 » 3,6 »                 | 0,40                  | 0,8 | 0,60 |
| » 3,6 » 4,1 »                 | 0,70                  | 1,2 | 0,60 |
| » 4,1 » 4,7 »                 | 0,80                  | 1,8 | 0,90 |
| » 4,7 » 5,3 »                 | 0,80                  | 2,0 | 1,00 |
| » 5,3 » 6,0 »                 | —                     | 2,5 | 1,25 |

Для органов управления, таких как нажимные кнопки, клавиши и т. п., которые во время эксплуатации могут подвергаться только воздействию силы давления и не выступают за пределы поверхности аппарата более чем на 15 мм, растягивающее усилие ограничивают значением менее 50 Н.

Устройство дистанционного управления, предназначенное для удержания его в руке и содержащее опасные для жизни части, должно обладать достаточной механической прочностью и быть сконструировано таким образом, чтобы выдержать воздействия, возможные в течение его эксплуатации.

*Дистанционное управление* – управление аппаратом на расстоянии, например, механическим, электрическим, акустическим способами или с помощью излучения.

Выдвижные устройства, которые предназначены для выдвижения из аппарата только на часть своей длины, должны иметь стопор такой механической прочности, чтобы опасные для жизни части не стали доступными.

Соответствие этому требованию проверяют следующим испытанием. Данное устройство выдвигают до тех пор, пока стопор не ограничит его дальнейшее выдвижение; затем в течение 10 с к нему прикладывают усилие 50 Н в наиболее неблагоприятном направлении. После испытания аппарат не должен иметь повреждений, в особенности ни одна опасная для жизни часть не должна стать доступной.

Коаксиальные антенные гнезда, устанавливаемые на аппарате, содержащем части или компоненты, которые обеспечивают изоляцию между опасными для жизни частями и доступными частями, должны быть сконструированы таким образом, чтобы выдержать воздействия, возможные в течение эксплуатации.

Соответствие требованию проверяют с помощью испытаний на износостойчивость, ударом и вращающим моментом. Например, при испытании на износостойчивость испытательный штекер вставляют и извлекают из антенного гнезда 100 раз.

Винтовые клеммы, обеспечивающие электрический контакт, и фиксирующие винты, которые при эксплуатации аппарата многократно отвинчивают и завинчивают, должны обладать механической прочностью.

К винтовым креплениям, которые в течение срока эксплуатации аппарата ослабляют или завинчивают несколько раз, относятся винтовые клеммы, винты для закрепления крышек (поскольку они должны ослабляться при открывании аппарата), винты для крепления ручек, кнопок и т. п.

Если при эксплуатации аппарата предусмотрена необходимость многократного ослабления и затяжения какого-либо винта, а надежность этого соединения обеспечивает выполнение требований безопасности по настоящему стандарту, необходимо применять дополнительные меры с целью безошибочного введения болта или винта в резьбу, нарезанную в неметаллическом материале.

Винты и другие крепежные элементы, предназначенные для задних и нижних крышек и т. п., не должны выпадать после отвинчивания, чтобы их нельзя было заменить при ремонте на винты и крепежные элементы других типов, применение которых может привести к уменьшению путей утечек и зазоров между доступными проводящими частями и опасными для жизни.

Токопроводящие детали, которые постоянно соединены между собой и через которые протекает ток более 0,2 А, должны быть скреплены таким образом, чтобы исключалась возможность ослабления соединения. При этом заливка компаундом обеспечивает достаточное законтривание только тех винтовых соединений, которые не подвергаются действию крутящего момента. Если крепление состоит более чем из одного винта или заклепки, то только одно из этих средств должно быть законтрено.

Электрические соединения в цепях током более 0,2 А при нормальных условиях должны быть такими, чтобы контактное давление не передавалось через изоляционный материал (это не относится к керамике), за исключением тех случаев, когда металлические детали не обладают достаточной эластичностью, которая может компенсировать любую возможную усадочную деформацию изоляционного материала.

Многожильные провода гибких шнуров питания, присоединяемые к винтовым клеммам, не должны скрепляться оловянно-свинцовым припоем, если они подвергаются контактному давлению, за исключением случаев, когда конструкция крепления не допускает возможности плохого контакта, обусловленного холодной пайкой.

Устройства для крепления крышек, которыми могут неоднократно пользоваться во время эксплуатации аппарата, должны обладать достаточной механической прочностью, если при их неисправности может быть нарушена безопасность аппарата.

Открытые и закрытые положения устройства не должны иметь неопределенности, и не должно возникать случайное открывание аппарата.

Съемные ножки или подставки, поставляемые изготовителем аппарата, должны быть снабжены комплектом крепежных элементов, за исключением случаев, когда их поставляют в сборе с аппаратом.

Аппарат, предназначенный для установки на полу и имеющий массу более 18 кг, должен обладать достаточной механической устойчивостью. Кроме того, устойчивость должна обеспечиваться при установке аппарата на ножки или подставку, поставляемые изготовителем.

Выход из положения равновесия проводят следующими испытаниями.

1. Аппарат помещают в обычное рабочее положение на плоскости, имеющей наклон под углом  $10^\circ$  к горизонтальной поверхности, и медленно вращают вокруг своей вертикальной оси на  $360^\circ$ .

2. Аппарат помещают на скользкую поверхность, наклоненную под углом не более  $1^\circ$  относительно горизонтали. При этом крышки, створки, ящики и дверцы должны находиться в наиболее неблагоприятном положении.

3. В любой точке горизонтальной поверхности, выступа или углубления прикладывают усилие 100 Н, направленное вертикально вниз таким образом, чтобы получить максимальный опрокидывающий момент при условии, что расстояние от этой точки до поверхности пола не превышает 75 см.

Острые кромки или углы, кроме тех, которые необходимы для нормального функционирования аппарата, должны быть сглажены (без резких разрывов), в противном случае они могут представлять опасность для пользователя при размещении или применении аппарата.

Стекла, за исключением кинескопов, с площадью поверхности, превышающей  $0,1 \text{ м}^2$ , или с наибольшим размером, превышающим 450 мм, не должны разбиваться так, чтобы это могло привести к травме кожи человека.

Движущие части, которые могут нанести травму, должны быть закрыты таким образом, чтобы при нормальных условиях работы была обеспечена надежная защита. Защитные кожухи, ограждения и т. п. должны обладать механической прочностью и не должны сниматься вручную.

Часть, которая становится доступной после удаления крышки вручную, не должна быть опасной для жизни. Это требование распространяется также на внутренние части батарейных отсеков, которые становятся доступными после снятия крышки вручную или с помощью инструмента, монеты или других предметов во время замены батарей. Любую часть устройства для установки напряжения, снимаемую вручную, считают защитной крышкой.

Окошки, линзы, колпаки сигнальных ламп и т. д. должны быть надежно закреплены, если при их отсутствии опасные для жизни части становятся доступными. Закрепление посредством только трения не считается надежным. Соответствие требованию проверяют обследованием и в сомнительных случаях приложением силы 20 Н в течение 10 с в наиболее неблагоприятном месте и в самом неблагоприятном направлении.

Крышки, которые могут подвергаться воздействию сил в течение предполагаемой эксплуатации, например крышки, закрывающие клеммы, должны

быть надежно закреплены, если при их отсутствии опасные для жизни части становятся доступными. Закрепление посредством только трения не считается надежным.

#### 14.6.2. Обеспечение требований по теплостойкости

В течение предполагаемой эксплуатации аппарата ни одна из его частей не должна нагреваться до чрезмерной температуры ([табл. 14.13](#)).

Таблица 14.13

Допустимое превышение температуры частей аппарата

| Условия нормальной работы, К | Условия неисправностей, К |
|------------------------------|---------------------------|
| 30                           | 65                        |
| 50                           | 65                        |
| 40                           | 65                        |
| 60                           | 65                        |
| 60                           | 100                       |
| 100                          | 130                       |
| 145                          | 190                       |
| 200                          | 300                       |

Изолирующий материал, поддерживающий детали, соединенные с сетью, должен быть устойчив к нагреву, если в течение предполагаемой эксплуатации аппарата через эти детали протекает ток свыше 0,2 А и они могут вырабатывать значительное количество тепла вследствие плохого контакта.

Температура размягчения изолирующего материала не должна быть менее 150 °С.

Примерами частей, которые могут вырабатывать значительное количество тепла в течение предполагаемой эксплуатации, могут быть контакты выключателей и устройств установки напряжения, клеммы с винтовыми зажимами и держатели плавких предохранителей.

#### 14.6.3. Обеспечение требований по огнестойкости

Аппаратура должна быть спроектирована таким образом, чтобы, насколько это возможно, предотвращалось воспламенение и распространение огня и не возникало опасности выхода огня за пределы аппарата. Это достигается:

- использованием хорошей инженерной практики в проектировании и производстве аппаратуры, дающей возможность избежать потенциальных источников воспламенения;
- использованием огнестойких материалов вблизи потенциальных источников воспламенения;

- использованием противопожарных кожухов, ограничивающих распространение огня.

Когда аппарат работает в условиях неисправностей, то ни одна из его частей не должна нагреваться до такой температуры, чтобы:

появилась опасность возникновения пожара вблизи аппарата;

снижалась его безопасность из-за чрезмерного количества тепла, выделяемого аппаратом.

Кроме того, соединения пайкой не должны использоваться в качестве защитного механизма, за исключением паяк, которые предназначены для того, чтобы расплавляться, например таких как термopедохранители.

Если блокировочные конденсаторы или резистивно-емкостные блоки защищены перегородкой, соответствующей требованиям по огнестойкости категории FV 0 по МЭК 60707, или перегородкой, выполненной из металла, то к ним требования по огнестойкости не предъявляются. Перегородка должна иметь размеры, покрывающие, по крайней мере, области, определенные в [табл. 14.14](#).

Батареи должны быть размещены таким образом, чтобы исключить опасность накопления огнеопасных газов и чтобы утечка электролита не могла повредить изоляцию.

Таблица 14.14

**Категории огнестойкости для конденсаторов  
и резистивно-емкостных блоков**

| Напряжение разомкнутой цепи<br>потенциального источника<br>воспламенения                                                                                                                                                                                                                                   | Расстояние вниз<br>или в сторону от<br>потенциальных ис-<br>точников воспламе-<br>нения до конденса-<br>тора или резистив-<br>но-емкостного бло-<br>ка, мм, не менее | Расстояние вверх<br>от потенциальных<br>источников<br>воспламенения<br>до конденсатора<br>или резистивно-<br>емкостного блока,<br>мм, не менее | Категория огне-<br>стойкости<br>по МЭК 60384-1 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| От 50 до 4000 В включительно<br>(пиковое значение) переменного или<br>постоянного тока                                                                                                                                                                                                                     | 13                                                                                                                                                                   | 50                                                                                                                                             | В                                              |
| Свыше 4 кВ (пиковое значение)<br>переменного или постоянного тока                                                                                                                                                                                                                                          | D*                                                                                                                                                                   | D**                                                                                                                                            | В                                              |
| <p>* Если D равно 13 мм либо напряжению разомкнутой цепи потенциального источника воспламенения в киловольтах, то принимают наибольшее значение.</p> <p>** Если D равно 50 мм либо напряжению разомкнутой цепи потенциального источника воспламенения в киловольтах, то принимают наибольшее значение.</p> |                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                |                                                |

При наличии возможности для пользователя заменить перезаряжаемые батареи (которые могут быть заряжены в аппаратуре) на незаряжаемые в аппаратуре должны быть предусмотрены специальные средства, исключающие попадание любого тока заряда на незаряжаемую батарею.

Следующие части могут являться незначительной добавкой горючего материала при воспламенении:

- мелкие механические части, масса которых не превышает 4 г, такие как опорные части, приводы, шестерни, кулачки, приводные ремни, подшипники;
- мелкие электрические компоненты, такие как конденсаторы объемом, не превышающим 1750 мм<sup>3</sup>, интегральные схемы, транзисторы и корпуса оптопар, если эти компоненты установлены на материал, имеющий категорию огнестойкости FV1 или лучше, соответствующий требованиям МЭК 60707.

Изоляция проводов не должна способствовать распространению огня в следующих условиях:

- проводка, работающая под напряжением, превышающим 4 кВ (пиковое значение) переменного тока или постоянного тока;
- проводка, выходящая из внутреннего противопожарного кожуха, за исключением изоляции, состоящей из определенных типов полихлорвинила, тетрафторэтилена, фторированного этиленпропилена или неопрена (ПВХ, ТФЭ, ФЭП).

Материал основания печатных плат, действительная мощность которых превышает 15 Вт и которые работают в нормальных рабочих условиях с напряжением, превышающим 50 В и равным или менее 400 В (пиковое значение) переменного или постоянного тока, должен иметь огнестойкость категории FV1 или лучше по МЭК 60707, за исключением печатных плат, помещенных в кожух, удовлетворяющий требованиям по огнестойкости категории FV0 по МЭК 60707 или изготовленный из металла и имеющий отверстия только для соединяющих проводов, которые целиком заполняют эти отверстия.

Материал основания печатных плат, действительная мощность которых превышает 15 Вт и которые работают в нормальных рабочих условиях с напряжением, превышающим 400 В (пиковое значение) переменного или постоянного тока, и материал основания ПП, несущих искровые разрядники, обеспечивающие защиту от перенапряжений, должен иметь огнестойкость категории FV0 по МЭК 60707, за исключением ПП, помещенных в металлический кожух, имеющий отверстия только для соединяющих проводов, которые целиком заполняют эти отверстия.

В случае если расстояния между потенциальными источниками воспламенения и компонентами или частями не превышают значений, установленных в [табл. 14.15](#), эти компоненты и части должны удовлетворять соответствующей категории огнестойкости по МЭК 60707, за исключением случаев, когда установлена защищающая от потенциального источника воспламенения перегородка, изготовленная из металла или удовлетворяющая требованиям по огнестойкости категории FV0 по МЭК 60707.

Перегородка должна быть отделена от потенциального источника воспламенения не менее чем на 5 мм. При наличии в перегородке отверстий

должна отсутствовать возможность проникновения через перегородку узкого пламени.

Печатные платы, несущие потенциальные источники воспламенения, не рассматриваются как защищающие перегородки, удовлетворяющие требованиям по огнестойкости категории FV0 по МЭК 60707.

На потенциальные источники воспламенения, имеющиеся внутри электрических компонентов, настоящие требования не распространяются.

Потенциальные источники воспламенения с напряжением разомкнутой цепи, превышающим 4 кВ (пиковое значение) переменного или постоянного тока в нормальных рабочих условиях, должны быть помещены в противопожарный кожух, который должен соответствовать требованиям по огнестойкости категории FV1.

Дерево и материалы на древесной основе толщиной не менее 6 мм рассматриваются как соответствующие требованиям по огнестойкости категории FV1.

Таблица 14.15

**Категории огнестойкости для компонентов и частей**

| Напряжение разомкнутых цепей потенциального источника воспламенения, В                                                                                                                                                                                                                             | Расстояние от потенциального источника воспламенения до компонентов или частей, расположенных внизу или сбоку, мм, не менее | Расстояние от потенциального источника воспламенения до компонентов или частей, расположенных сверху, мм, не менее | Категория огнестойкости по МЭК 60707 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Свыше 50 до 400 включительно (пиковое значение) переменного или постоянного тока                                                                                                                                                                                                                   | 13                                                                                                                          | 50                                                                                                                 | FN от 3 до 40 мм/мин                 |
| » 400 » 4000 »                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 13                                                                                                                          | 50                                                                                                                 | FV2                                  |
| » 4000 (пиковое значение) переменного или постоянного тока                                                                                                                                                                                                                                         | D*                                                                                                                          | D**                                                                                                                | FV1                                  |
| <p>*D равно 13 мм или напряжению разомкнутой цепи потенциального источника воспламенения в киловольтах, в зависимости от того, какое больше.</p> <p>**D равно 50 мм или напряжению разомкнутой цепи потенциального источника воспламенения в киловольтах, в зависимости от того, какое больше.</p> |                                                                                                                             |                                                                                                                    |                                      |

Внутренние противопожарные кожухи не должны иметь отверстий для вентиляции, превышающих 1 мм, независимо от длины.

Отверстия для соединяющих проводов должны быть целиком заполнены проводами.



## Контрольные вопросы

1. Перечислите опасные факторы при работе с ЭС.
2. Классы ЭС по электробезопасности.
3. Какие требования предъявляются к ЭС класса I?
4. Какие требования предъявляются к ЭС класса II?
5. Какие ЭС относятся к классу III?
6. Как проверяется устойчивость ЭС на объекте эксплуатации?

## **15. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

[15.1. Особенности конструкций наземных стационарных ЭС.](#)

[15.2. Особенности конструкций наземных транспортируемых ЭС.](#)

[15.3. Особенности конструкций наземных переносных ЭС.](#)

[15.4. Особенности конструкций наземных носимых ЭС.](#)

[15.5. Особенности конструкций бортовых ЭС.](#)

[Контрольные вопросы.](#)

Л и т е р а т у р а: [[15](#), [24](#), [52](#), [53](#)].

### **15.1. Особенности конструкций наземных стационарных ЭС**

Наземные стационарные ЭС применяются в широкоэмитательных радио- и телевизионных передающих станциях, вычислительных системах для научных исследований и управления народным хозяйством, наземных частях систем спутниковой связи, электронных и квазиэлектронных АТС, системах управления воздушным движением, системах автоматизированного проектирования и подготовки производства и т. д. Эти ЭС, как указывалось, состоят из большого числа сложных подсистем и отдельных устройств, часть которых работает в автоматическом режиме, другая часть – во взаимодействии с человеком-оператором.

К месту установки они обычно доставляются упакованными. Поэтому такие механические воздействия, как вибрации и удары, вызванные транспортированием, при разработке конструкции стационарной ЭС можно не учитывать (если это специально не оговорено техническими требованиями). Не предусматривается также возможность падения и погружения в воду. На ЭС, предназначенные для работы в отапливаемом помещении, не предусматривается воздействие инея и росы, дождя и воздушно-пылевого потока. Таким образом, требование устойчивости к дестабилизирующим факторам для этого вида ЭС гораздо менее жесткие, чем для транспортируемых или носимых ЭС.

Стационарные ЭС рассчитаны на длительные сроки эксплуатации. Использование ЭРЭ, ИС в герметичных корпусах облегчает замену вышедших из строя ЭРЭ. Сложность электрической схемы, многообразие выполняемых ЭС функций приводят к сложности конструкторской реализации, что обусловлено большим числом аналоговых и цифровых узлов устройств памяти, источников питания.

Конструктивно стационарные ЭС обычно состоят из большого числа стоек, шкафов, пультов, тумб, блоков, периферийных устройств (дисплеев, печатающих устройств, графопостроителей, антенн и т. д.). Для обеспечения взаимодействия отдельных устройств системы используют кабельные линии связи или кабельные линии и радиоканалы. Сложностью конструкции наземных ЭС обусловлены их большие габариты, масса, стоимость и энергопотребление, которые ограничиваются только стоимостью эксплуатации (площадь используемых помещений, расход материалов и электроэнергии и т. д.). Высокая стоимость стационарных ЭС предполагает их продолжительную эксплуатацию, высокую ремонтпригодность и возможность модернизации эксплуатируемых ЭС по мере необходимости.

Особенностью стационарных ЭС является также то, что отдельные устройства (передатчики, приемники, процессоры, запоминающие устройства, устройства питания, блоки отображения информации и т. д.) разрабатываются различными ведомствами, что приводит к большому разнообразию конструкторских решений.

## 15.2. Особенности конструкций наземных транспортируемых ЭС

Транспортировке подвергаются ЭС различного назначения: связные, навигационные, радиолокационные, контрольно-испытательные, измерительные и т. д. Транспортируемые ЭС устанавливают на автомобильном, гусеничном, водном и железнодорожном транспорте. Водный транспорт делится на речные и морские суда гражданского флота (пассажирские, грузовые, рыболовные, ледокольные, исследовательские и т. д.) и корабли военно-морского флота (надводные, подводные лодки).

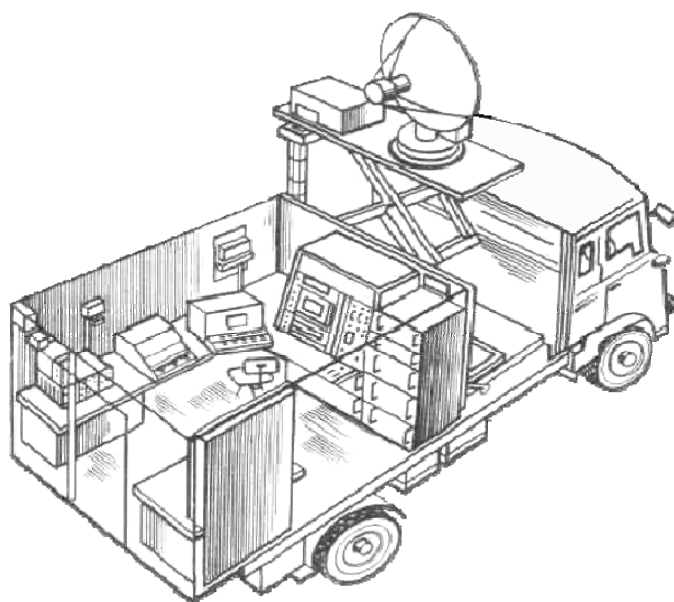


Рис. 15.1. Компоновка подвижной станции радиопротиводействия

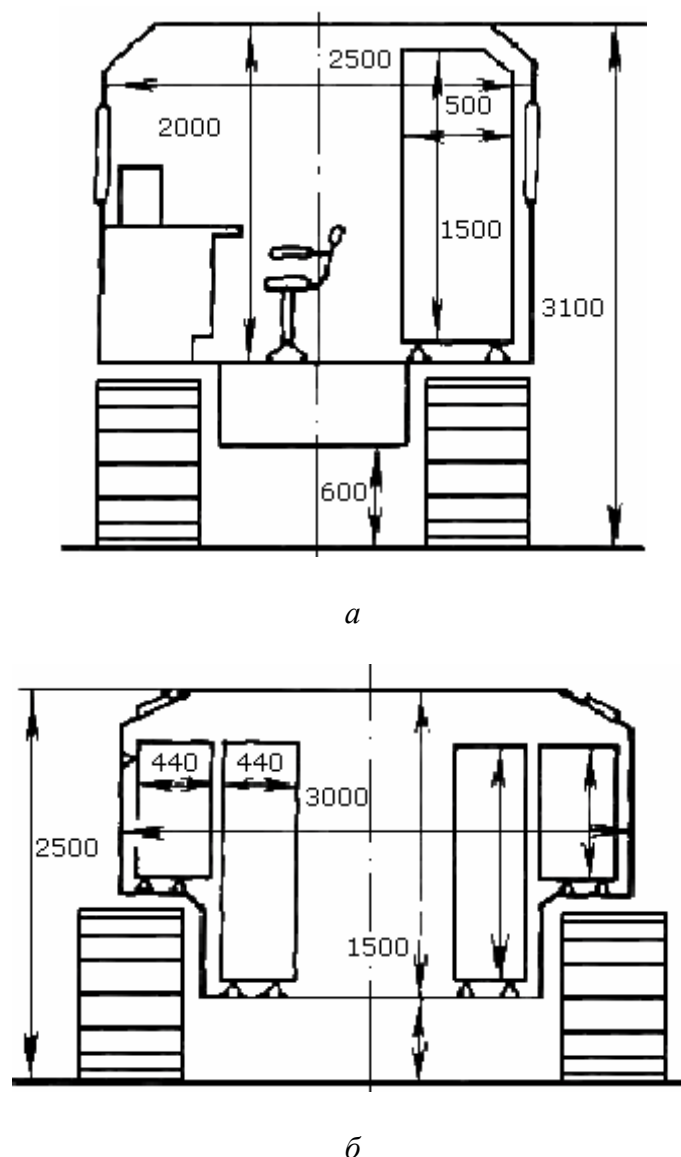


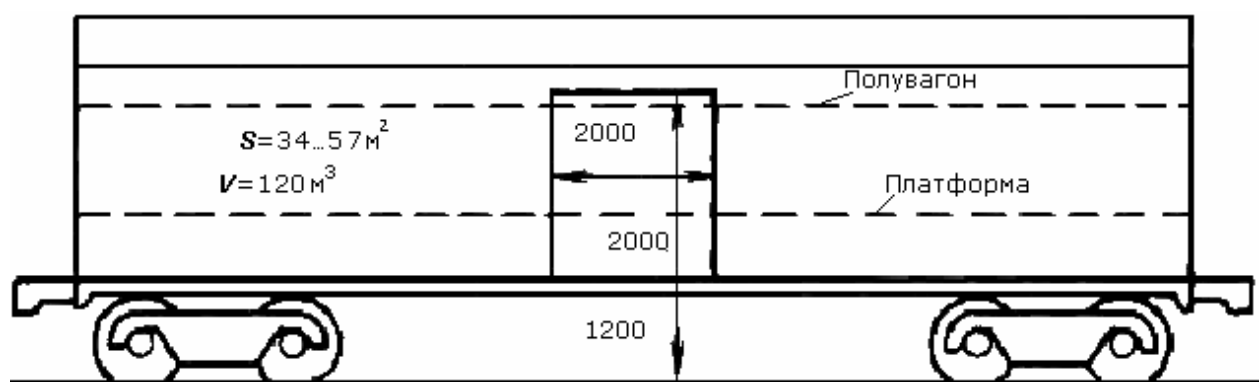
Рис. 15.2. Размещение ЭС в кузове обычной высоты (а) и низком кузове (б) для шасси на гусеничном ходу

При разработке конструкции транспортируемых ЭС прежде всего надо учитывать габариты и форму помещения объекта установки ЭС. На [рис. 15.1](#) показано размещение ЭС в автофургоне, на [рис. 15.2](#) – в фургоне на гусеничном шасси, на [рис. 15.3](#) – размеры помещения железнодорожного вагона и путевых строений. Отдельные устройства размещаются вдоль передней и боковой стенок автофургонов, кузовов гусеничных шасси, а в задней стенке обычно имеется дверной проем. Операторы располагаются в центральной части фургона.

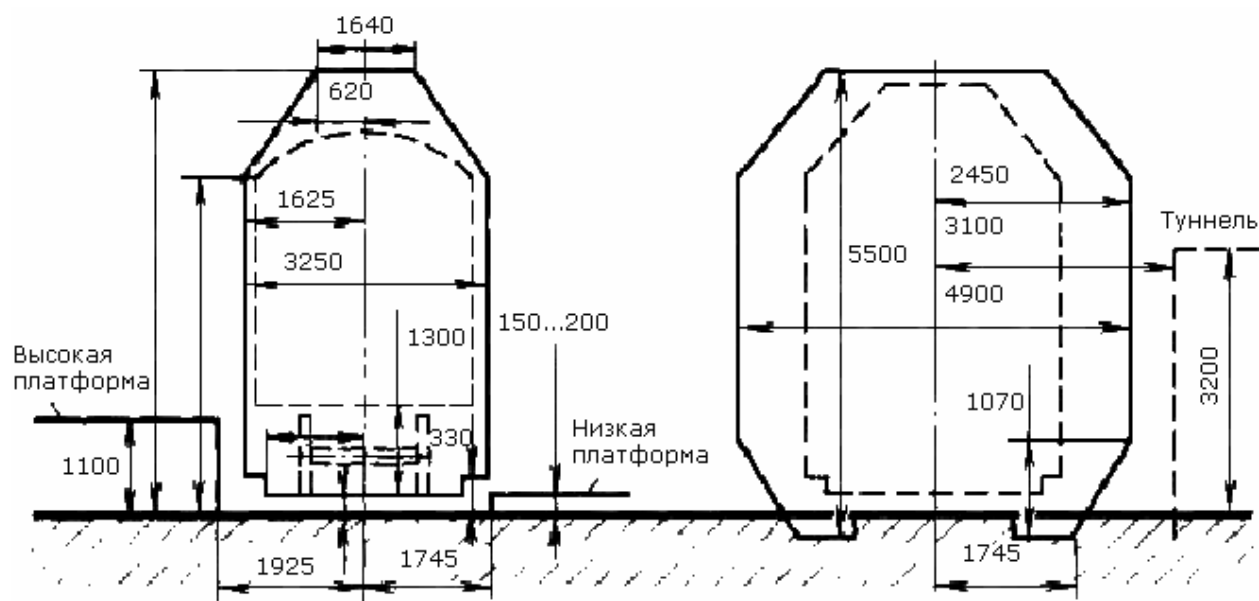
Теплоотвод в наземных транспортируемых ЭС обычно осуществляется естественной или принудительной воздушной конвекцией; в ЭС водного транспорта для охлаждения можно использовать забортную воду. При централизованной принудительной вентиляции воздух перед подачей в помещение может очищаться, охлаждаться или подогреваться с использованием

кондиционера. Особенно актуальна очистка воздуха в случае опасности радиоактивного заражения.

Антенны, размещаемые на транспортных средствах, как правило, выполняются в виде выносных узлов. Антенны значительных габаритов изготавливаются выдвижными, сборно-разборными (рис. 15.4). Для ускорения разворачивания используются зонтичные антенны, надувные и т. д.



*a*



*б*

*в*

Рис. 15.3. Основные размеры четырехосных железнодорожных платформ, полувагонов и дверных проемов в них (*a*), допустимые габариты подвижного состава железных дорог (*б*) и габариты расположения путевых строений (*в*)

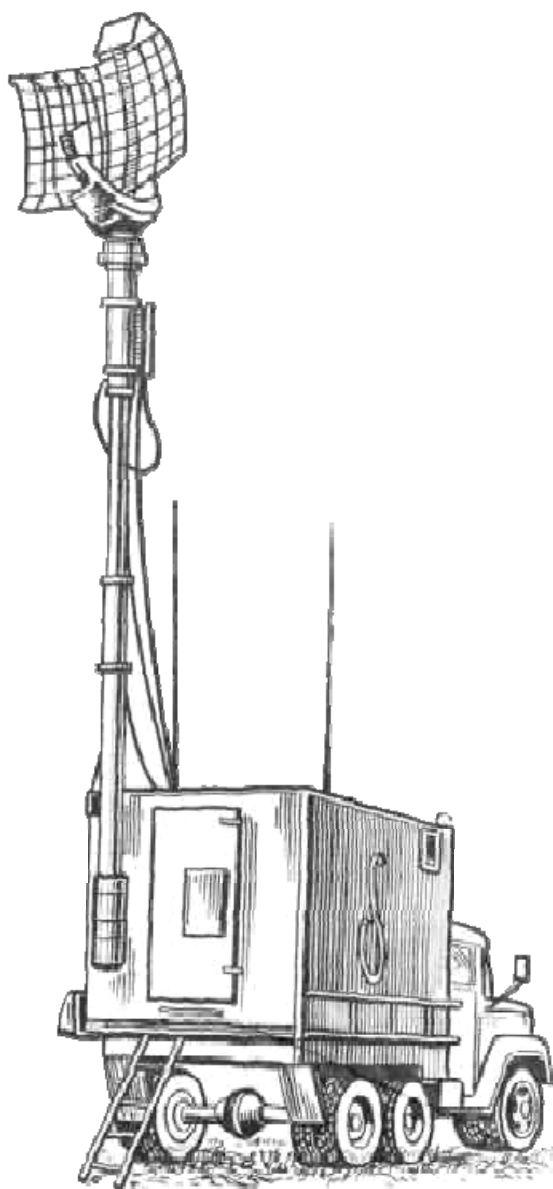


Рис. 15.4. Возимая связная радиостанция, размещаемая на кузове автомобиля

Общая масса транспортируемых ЭС не должна превышать двух третей грузоподъемности транспортного средства (одна треть остается для операторов и запасного имущества).

Кроме размеров объекта установки на характер конструкции транспортируемого ЭС оказывают влияние различные дестабилизирующие факторы – вибрации, удары, линейные ускорения, изменение температуры внешней среды, термоудары, воздействие инея и росы, морского тумана и т. д.

Для автомобильных и железнодорожных ЭС можно не учитывать такие факторы, как падение аппаратуры с заданной высоты и погружение в воду, воздействие пыли, если это не оговорено в технических требованиях. Спецификой транспортируемых ЭС является усиленная конструкция стоек, блоков, ячеек, а также амортизация стоек.

При разработке конструкции транспортируемых ЭС необходимо учитывать технологические факторы: использование типовых конструкций, пре-

емственность разрабатываемой конструкции относительно изделий-аналогов; соответствие способов обработки и сборки типу производства; оптимальность выбранных допусков и шероховатости поверхности деталей; рациональность использования драгоценных металлов и дефицитных материалов; токсичность технологических процессов и т. д.

### 15.3. Особенности конструкций наземных переносных ЭС

К переносным ЭС относят устройства массой до 30 кг, перемещаемые в неработающем состоянии одним-двумя операторами. Ввиду все большей миниатюризации этот класс наземных ЭС непрерывно расширяется и в настоящее время представлен: видеозвуковоспроизводящими устройствами (радиоприемники, телевизоры, магнитофоны, видеокамеры); настольными вычислителями (ПК и пр.); различными измерителями (осциллографы, генераторы, вольтметры, измерители теплового поля, частотомеры); медицинской аппаратурой (электрокардиографы, дефибрилляторы); аппаратурой специального назначения (вычислители для управления артиллерийским огнем, устройства наведения тактических ракет).

Переносные ЭС могут эксплуатироваться в помещении или вне его. Поэтому требование устойчивости к дестабилизирующим климатическим и механическим воздействиям для переносных ЭС являются промежуточными между требованиями, предъявляемыми к устойчивости стационарных и транспортируемых ЭС. Для бытовых ЭС они совпадают с требованиями к стационарным ЭС, работающим в отапливаемом помещении, а для ЭС специального назначения – с требованиями к транспортируемым ЭС по климатическим воздействиям (требования по механическим воздействиям более мягкие, так как носимые ЭС перевозятся в упакованном виде).



Рис. 15.5. Видеокамера  
JVC GR-DX97



Рис. 15.6. Телевизор  
Panasonic



Рис. 15.7. Ноутбук  
Toshiba

На конструкцию переносных ЭС также оказывают влияние такие факторы, как удобство переноски, способы миниатюризации, способы обеспечения устойчивости к климатическим и механическим воздействиям, защита от

собственного тепловыделения, специфика базовой конструкции, обеспечение эстетичности и технологичности.

На [рис. 15.5](#), [рис. 15.6](#), [рис. 15.7](#) представлены примеры конструкции переносных ЭС.

Несмотря на то что переносные ЭС значительно различаются по конструкции, некоторые их особенности являются общими для всей группы, а именно:

- максимальная масса ЭС зависит от конструкции приспособлений для переноски и не должна превышать 15 кг при наличии одной ручки (лямки) для переноски. Если ЭС можно удерживать руками (это позволяют его размеры и масса), то ручки можно не делать;
- охлаждение, как правило, осуществляется с помощью воздушной конвекции (естественной или принудительной с использованием вентиляторов);
- наличие защиты от климатических и механических воздействий;
- комплектация дополнительными деталями и узлами для замены вышедших из строя ИС, ЭРЭ и расширения выполняемых ЭС функций (кабели, переходники, делители напряжения и т. д.).

#### 15.4. Особенности конструкций наземных носимых ЭС

Носимые ЭС обычно располагаются на теле человека или его одежде. Они функционируют в процессе переноски, а также при воздействии дестабилизирующих факторов. Носимые ЭС бывают *бытового* (часы, телевизоры, радиоприемники, магнитофоны, микрокалькуляторы, ПК, диктофоны и т. д.) и *специального назначения* (связные приемопередатчики, телевизионные передающие камеры на приборах с зарядовой связью и т. д.).

На конструкцию носимых ЭС оказывает влияние большое число факторов: необходимость минимизации габаритов, массы, энергопотребления, стоимости; защита от влияния дестабилизирующих факторов; химическая совместимость материалов с телом человека (исключение раздражения кожи); ремонтпригодность и технологичность; эстетичность и эргономичность.

Принято, что масса карманных ЭС не должна превышать 0,7 кг, носимых на ремне через плечо – 3 кг, носимых за спиной – 10 кг. Это обеспечивается использованием микроэлектронной маломощной элементной базы (например, на основе комплементарных МДП-структур), миниатюрных элементов связи (кнопки, наушники, индикаторы), ударопрочных пластмасс для несущих конструкций (например, ударопрочного полистирола).

Спецификой носимых ЭС является наличие в них цифровых и аналоговых узлов, портативных автономных источников питания, преобразователей напряжения (осуществляющих повышение напряжения или формирование нескольких различных номиналов). Это предъявляет определенные требова-



ния к электромагнитной совместимости компонентов и узлов. Отвод теплоты благодаря небольшой выделяемой мощности осуществляется за счет естественной воздушной конвекции.

Рассмотрим пример самого распространенного носимого ЭС – электронные часы, которые обладают такими преимуществами, как точность хода, отсутствие подзавода, возможность выполнения других функций – микрокалькулятора, программного сигнализатора, календаря, секундомера.



Рис. 15.8. КПК hp iPAQ gx3715



Рис. 15.9. Цифровой диктофон D-Pro DR-1710

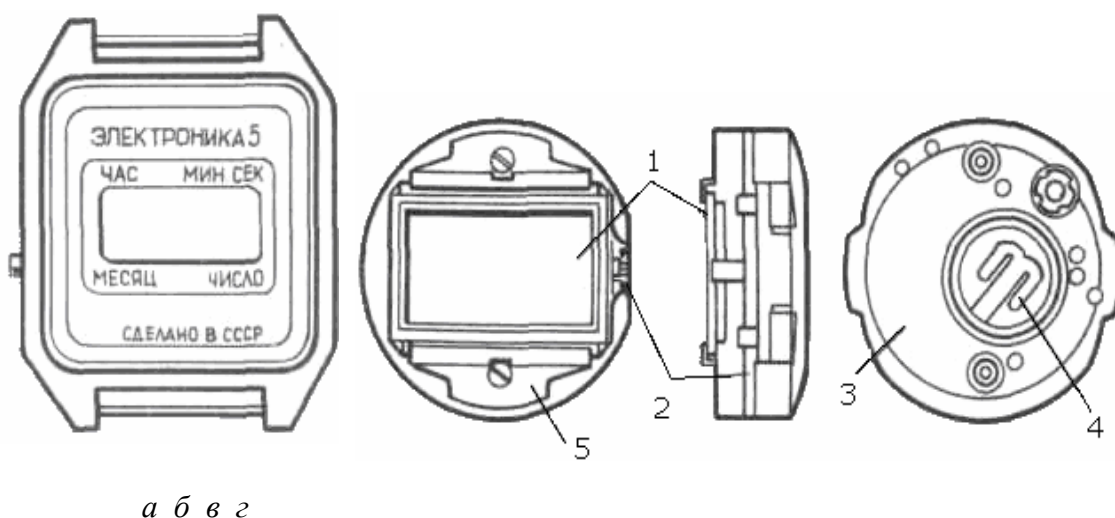


Рис. 15.10. Электронные наручные часы «Электроника-5»: *а* – общий вид; *б* – вид на электронный блок со стороны индикатора; *в* – вид сбоку; *г* – вид со стороны гнезда под батарейку; 1 – жидкокристаллический индикатор; 2 – печатная плата; 3 – пластмассовый корпус блока питания; 4 – пружинный контакт для подключения батареи питания; 5 – скобы для прижима индикатора к эластомерному соединителю типа «зебра»

В конструкции наручных часов «Электроника-5» ([рис. 15.10](#)) использована несколько измененная конструкция корпуса обычных наручных механических часов. Электронный блок представляет слоистую конструкцию цилиндрической формы. Основой является печатная плата из стеклотекстолита дисковой формы, на которой установлены дискретные компоненты: кварце-

вый резонатор, ИС пересчетного устройства, ИС преобразователя напряжения, лампочка подсветки индикатора и т. д. Над платой располагается жидкокристаллический индикатор (ЖКИ), соединенный с платой с помощью эластомерных соединителей, под платой (в специальной пластмассовой обойме с запрессованными контактами) – серебряно-цинковый элемент питания типа СЦ-21.

## 15.5. Особенности конструкций бортовых ЭС

К бортовым относятся ЭС, устанавливаемые на воздушных шарах, дирижаблях, вертолетах, беспилотных летательных аппаратах, дозвуковых и сверхзвуковых самолетах, больших и малых ракетах, космических объектах (искусственные спутники Земли, пилотируемые станции, транспортные космические корабли многоразового использования, межпланетные автоматические станции).

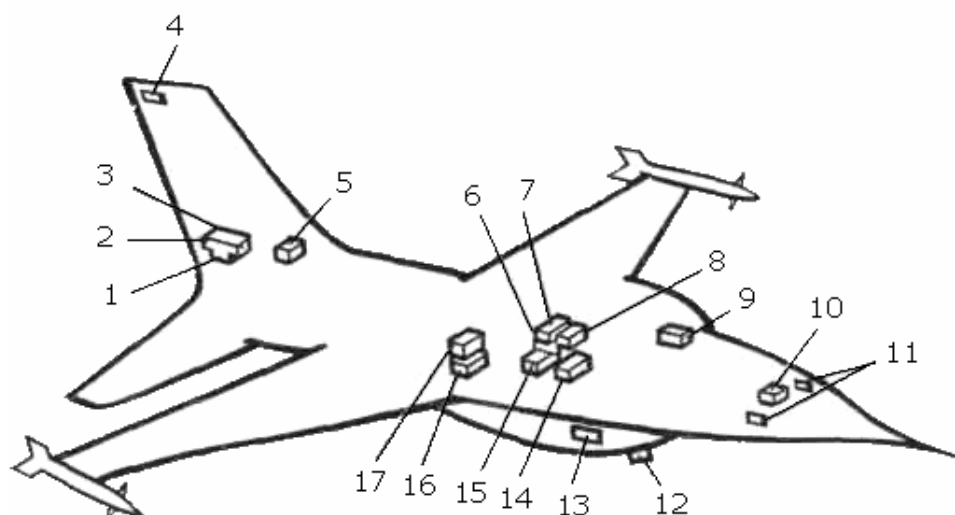


Рис. 15.11. Размещение системы Rapreport-3 на самолете F-16: 1 – антенны передатчика помех в хвостовом отсеке; 2 – усилитель мощности; 3 – передатчик имитационных помех в хвостовом отсеке; 4, 11 – антенны пеленгатора; 5, 10 – приемники пеленгатора; 6 – усилитель мощности; 7 – задающий генератор; 8 – передатчик имитационных помех в носовом отсеке; 9 – блок управления и индикации; 12 – антенна приемника диапазона частот 0,5–2 ГГц; 13 – антенны передатчика помех в носовом отсеке; 14 – приемник диапазона частот 0,5–2 ГГц; 15 – процессор; 16 – блок управления приемником диапазона частот 2–8 ГГц; 17 – приемник диапазона частот 2–8 ГГц

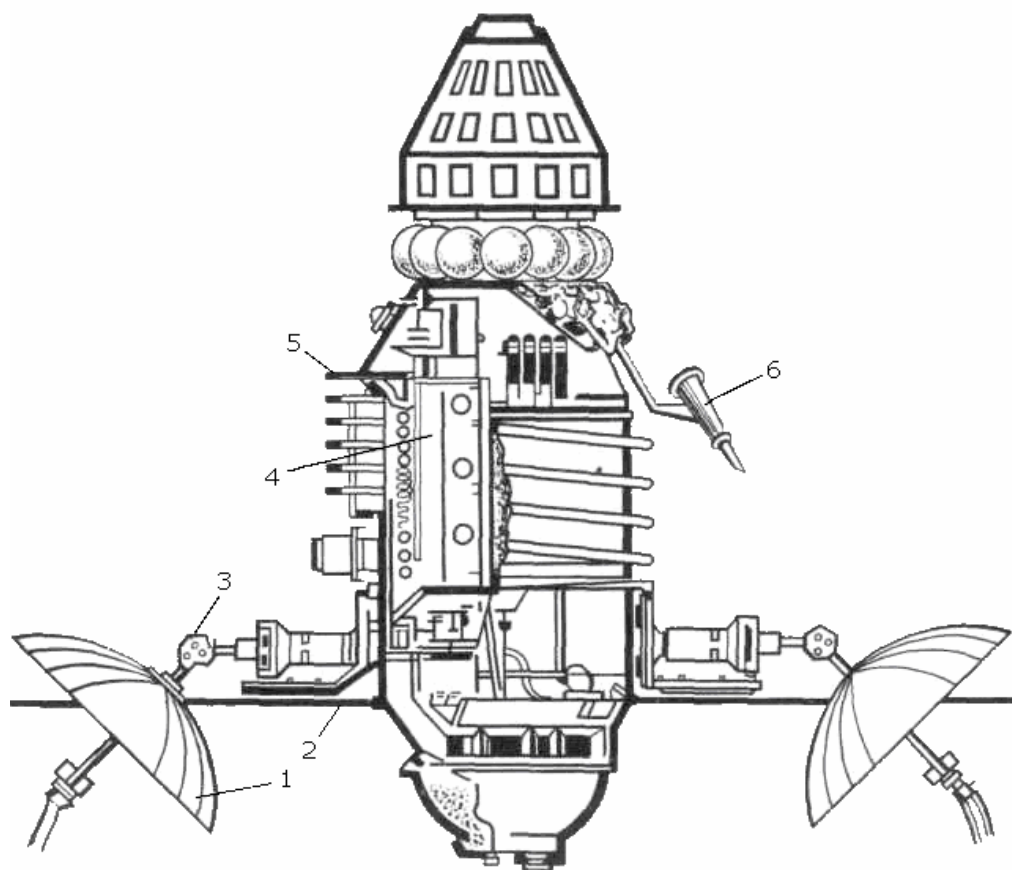


Рис. 15.12. Компоновка спутника связи «Молния-1»: 1 – антенны ретранслятора; 2 – солнечные батареи; 3 – привод антенны; 4 – блоки ЭС; 5 – корпус; 6 – телевизионная камера с системой самонаведения

На конструкции бортовых ЭС оказывают влияние различные ограничения: характер размещения ЭС на объекте установки, необходимость минимизации массы и габаритов, обеспечение заданной надежности при воздействии дестабилизирующих факторов, наличие типовых конструкций.

Размещение бортовых ЭС на объекте установки может быть централизованным и децентрализованным. Централизованно могут размещаться блоки РЛС, блоки вычислительной системы или системы управления каким-либо объектом (например, двигателем, но и в этих случаях отдельные узлы могут быть вынесены (индикатор РЛС – на пульт перед летчиком, датчики и исполнительные механизмы – к управляемому агрегату).

Децентрализация размещения блоков по объекту установки требует организации дополнительных линий связи, использования соединителей и принятия мер по обеспечению электромагнитной совместимости (экранирование, согласование линий связи и т. д.).

Пример децентрализованного размещения ЭС на самолете F-16 (США) приведен на [рис. 15.11](#). Но даже в этом случае блоки (1–3) размещены централизованно в хвостовой части самолета.

Другим примером децентрализованного размещения ЭС является спутник связи «Молния-1» ([рис. 15.12](#)).

На бортовые ЭС могут воздействовать различные климатические и механические факторы. К климатическим факторам относятся влажность и температура.

Диапазон изменения температур окружающей среды для бортовых ЭС шире, чем для наземных, так как зависит от высоты над поверхностью Земли. Высокие температуры могут иметь место в результате трения обшивки сверхзвуковых самолетов и ракет о плотные слои воздуха. Сам объект установки ЭС может являться источником высоких (двигатели) и низких температур (баки с охлажденным горючим). К повышению температуры может приводить и тепловыделение самих ЭС.

Влажность окружающей среды может меняться в широких пределах – от минимальной (в салоне пассажирского самолета) до максимальной (ЭС, установленные вне герметизированной кабины). Для самолетных ЭС особое значение имеет изменение атмосферного давления (при разгерметизации кабины), что требует прочных гермокорпусов. Кроме того, понижение атмосферного давления приводит к уменьшению электрической прочности воздуха, минимум которой соответствует высоте 22 000–24 000 м. Возникающие при коронном разряде озон и азотистые соединения (при наличии влаги) могут вызвать коррозию. Коронный разряд может привести к сбою в работе ЭС.

Существенным климатическим фактором для бортовых ЭС является возможность резких перепадов температуры (тепловых ударов), например для самолетных ЭС – от минус 60 до 150 °С. Это накладывает определенные ограничения на ТКЛР соединяемых компонентов.

Механические динамические воздействия объекта установки обусловлены работой двигателя, перегрузками при маневрировании, аэродинамическим торможением при вхождении в плотные слои атмосферы. Большие ударные перегрузки могут возникнуть при старте малых ракет, выстреле управляемого снаряда из пушки, реакции материала при снятии перегрузки. Пренебречь механическими воздействиями можно лишь для ЭС, устанавливаемых на воздушных шарах и дирижаблях, имеющих малую скорость движения.

### Контрольные вопросы

1. Чем обусловлены максимальные габариты бортовых ЭС?
2. Чем обусловлены максимальные габариты носимых ЭС?
3. Чем обусловлены максимальные габариты переносных ЭС?
4. Чем обусловлены максимальные габариты возимых ЭС?
5. Чем обусловлена максимальная масса возимых ЭС?
6. Чем обусловлена максимальная масса носимых ЭС?
7. Чем обусловлена максимальная масса переносных ЭС?

## **16. Основные технические характеристики и показатели аналоговых электронных устройств (АЭУ)**

Оценка (количественная) АЭУ производится по его техническим показателям: усиление, искажения, точность преобразования, по уровням  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$ , и т. д. Эти показатели позволяют оценить возможность использования АЭУ для тех или иных целей. Большинство параметров АЭУ совпадает с параметрами усилителей, т. к. основная масса АЭУ построена на их основе

### **16.1. Стандартизация. Унификация**

Для устройств широкого применения показатели и методы их определения указаны в Государственных или Отраслевых стандартах (ГОСТ, ОСТ). Например, ГОСТ 23850-85 — “Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Методы измерения акустических параметров”. Стандартизация тесно связана с унификацией (уменьшение числа типов), объектом которой могут быть как устройства, так и узлы. К унифицированным узлам аналоговых устройств, выпускаемым в массовом количестве, относятся интегральные микросхемы операционных усилителей, стабилизаторов, перемножителей, компараторов и т. д., а также специализированные микросхемы для радиоприемных устройств, телевизионных устройств и т. д. Стандартизация и унификация позволяют упростить разработку, удешевить производство, упростить ремонт техники.

## 16.2. Входное и выходное сопротивление

Входное сопротивление  $Z_{\text{вх}}$  усилителя или другого АЭУ — это внутреннее сопротивление между его входными зажимами. В большинстве случаев — это параллельное соединение входного сопротивления (активного, резистивного)  $R_{\text{вх}}$  и входной емкости  $C_{\text{вх}}$ . Желательно, как правило, иметь большое сопротивление  $R_{\text{вх}}$  и малую емкость  $C_{\text{вх}}$ .

Выходное сопротивление  $Z_{\text{вых}}$  — это внутреннее сопротивление между его выходными зажимами. По отношению к нагрузке усилитель (или АЭУ) является источником колебаний с внутренним сопротивлением  $Z_{\text{вых}}$ . В области средних частот  $Z_{\text{вых}}$  можно считать активным.

Если усилитель работает на нагрузку, подключенную через коаксиальный кабель, то  $R_{\text{вых}}$  должно быть равно 75 Ом во избежание отражений и искажений сигнала.

Для усилителя низкой частоты (УНЧ) желательно, чтобы  $Z_{\text{вых}}$  было как можно меньше — это ослабляет зависимость  $U_{\text{вых}}$  от  $Z_{\text{н}}$ . Последнее важно, если усилитель работает на нестабильную нагрузку.

## 16.3. Коэффициенты усиления (передачи)

Коэффициент усиления (или передачи) напряжения  $K_U$  — это отношение амплитуды выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  к амплитуде входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  (рис.1-1):

$$K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$$

Он определяется в установившемся режиме при гармоническом (синусоидальном) входном сигнале и в дальнейшем для простоты обозначается через  $K$  (без индекса  $U$ ).

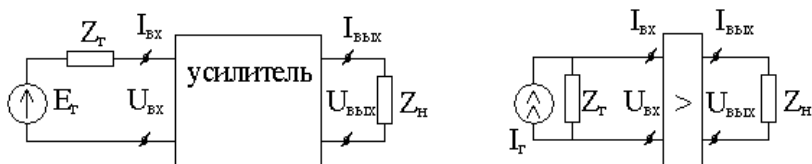


рис.16-1

Отношение  $K_{\text{СКВ}} = U_{\text{ВЫХ}} / E_T$  называется сквозным коэффициентом передачи.

Из рисунка следует, что

$$\underline{K}_{\text{СКВ}} = \underline{K}_{\text{ВХ}} \cdot \underline{K},$$

где  $\underline{K}_{\text{ВХ}} = \underline{Z}_{\text{ВХ}} / (\underline{Z}_T + \underline{Z}_{\text{ВХ}})$  — коэффициент передачи (в комплексной форме) входной цепи, состоящей из входного  $\underline{Z}_{\text{ВХ}}$  и  $\underline{Z}_T$ .

Коэффициент усиления (передачи) тока  $K_I$ :

$$K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}$$

— используется реже, т. к. технологически его трудно измерять (необходим разрыв цепи).

Иногда используют понятие сопротивление передачи:

$$Z_{\text{П}} = U_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}},$$

или проводимости передачи:

$$Y_{\text{П}} = I_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}.$$

## 16.4. Коэффициент усиления (передачи) по мощности

$$K_p = P_n / P_{вх} .$$

где  $P_n$  - мощность в нагрузке;  $P_{вх}$  - входная мощность.  
Так как громкость звукового восприятия звукового сигнала пропорциональна логарифму его интенсивности, для сравнения мощностей используют логарифмическую единицу “Бел” (по имени изобретателя телефона А. Белла).  
Коэффициент усиления (передачи) по мощности выражают и в более мелких единицах — дециБелах:

$$K_p[\partial B] = 10 \lg K_p.$$

Если  $R_n = R_{вх} = R$ , то:

$$K_p[\partial B] = 10 \lg \frac{\frac{U_{вых}^2}{R}}{\frac{U_{вх}^2}{R}} = 20 \lg \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$$

Это удобно, так как позволяет перемножение коэффициентов усиления заменить сложением.

## 16.5. Амплитудно - и фазочастотная характеристики

Комплексный коэффициент усиления по напряжению:

$$\underline{K} = K \cdot e^{j\varphi} .$$

где  $K$  — это модуль коэффициента усиления;  $\varphi$  — фаза выходного сигнала.



Зависимость модуля коэффициент усиления от частоты  $K = f(\omega)$  — это амплитудно-частотные характеристики усилителя — рис.1-2 а) и зависимость  $\varphi = f(\omega)$  — это фазочастотная характеристика — рис.1-2 б).

Здесь  $\omega = 2\pi f$ ;  $K_0$  — коэффициент усиления на средней частоте;  $y$  — относительный коэффициент усиления;  $d$  — допустимый уровень снижения коэффициента усиления;  $\varphi$  (в градусах) — фаза выходного сигнала (относительно входного);

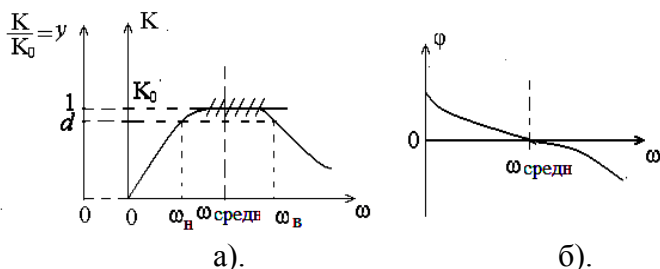


рис.16-2

Для АЧХ типичным является наличие так называемой области средних частот, где  $K$  почти не зависит от  $\omega$  и обозначается  $K_0$ . Как правило, по оси ординат используют относительный масштаб, откладывая относительное усиление  $y = K/K_0$ . Такая АЧХ  $y(\omega)$  или  $y(f)$  называется нормированной. На нижних и верхних частотах АЧХ обычно спадает. Частоты, на которых относительное усиление  $y$  уменьшается до условной величины  $d$ , называются граничными частотами усиления. Типовым (стандартным) условием считается значение

$$d = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot$$

Диапазон  $f_{\text{в}} \dots f_{\text{н}}$  — называется полосой пропускания усилителя.

Из-за спада АЧХ на краях полосы не все спектральные составляющие сложного входного колебания усиливаются одинаково — возникают частотные искажения (амплитудно-частотные). Они оцениваются коэффициентом частотных искажений:

$$M = K_0 / K = 1 / y,$$

который определяют на граничной частоте и выражают в дециБелах:

$$M [\text{дБ}] = 20 \lg M.$$

Для звуковых частот — это изменение тембра. Для звуковых частот допустимо  $M = 3 \text{ дБ}$  (1,41 раза); для измерительных устройств  $\leq 0,1 \text{ дБ}$  и т. д.

Зависимость фазового сдвига от частоты рис. 16-2 б) называется фазочастотной (фазовой) характеристикой. Если фазовая характеристика (ФЧХ) четырехполосника не является прямой, исходящей из начала координат, то время прохождения через четырехполосник различных спектральных составляющих сложного колебания — различно. Это приводит к искажению его формы, т. е. фазо-частотным (фазовым) искажениям.

Частотные и фазовые искажения называются линейными, т. к. создаются за счет  $L$  и  $C$  схемы, которые являются линейными элементами. Линейные искажения меняют форму сложного колебания, а форму гармонического (синусоидального) колебания не изменяют.

Масштаб по оси  $\omega$  — для АЧХ и ФЧХ обычно берут логарифмический.

рифмический, так как он удобен - растягивается нижняя и сжимается верхняя область частот. Таким образом, можно подробно рассматривать равные (относительные) интервалы изменения частоты в любой ее области.

## 16.6. Переходная характеристика

Переходной характеристикой (ПХ) называется зависимость мгновенного значения выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от времени при подаче на вход небольшого перепада напряжения, не вызывающего перегрузку усилителя. ПХ подобно АЧХ обычно строят в относительном масштабе (рис.16-3):

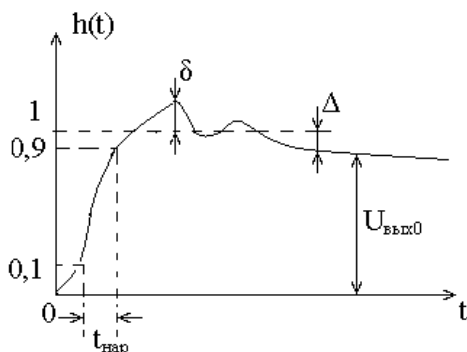


рис.16-3

По вертикали отношение  $h(t) = \frac{U_{\text{вых}}(t)}{U_{\text{вых0}}}$ , где  $U_{\text{вых}}(t)$  — выходное напряжение;  $U_{\text{вых0}}$  — выходное напряжение после установления фронта.

По существу, это есть ПХ коэффициента передачи по напряжению. Но можно строить ПХ и для других передаточных функций.

Время изменения нормированной ПХ от 0,1 до 0,9 называется временем нарастания  $t_{\text{нар}}$ .

Часто в конце фронта получается выброс иногда с последующими колебаниями на вершине ПХ.

Относительная величина выброса  $\delta$  измеряется в процентах (%). Спад верхней части ПХ обозначается  $\Delta$ . Эти величины нормируются при проектировании изделия.

ПХ однозначно определяет АЧХ и ФЧХ АЭУ — это всего лишь иной метод их оценки, оценки качества устройства — временной метод.

Иногда оценку производят по импульсной характеристике — реакции усилителя на очень короткий импульс, что по существу является производной от ПХ.

## 16.7. Нелинейные искажения

Нелинейные искажения — это изменения формы сигнала, обусловленные кривизной характеристик диодов, транзисторов, полупроводниковых конденсаторов, микросхем и т. д.

Параметры нелинейных элементов зависят от воздействующего на них тока или напряжения. Отличительным признаком нелинейных искажений является то, что им подвержены даже гармонические (синусоидальные) колебания. На этом основана их количественная оценка.

Коэффициент гармоник — это отношение эффективного (действующего) значения суммы высших гармоник выходного напряжения к эффективному значению его первой гармоники:

$$K_r = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1}$$

Можно использовать не эффективные значения, а амплитудные. Можно использовать также значения токов. Иногда используют коэффициенты отдельных гармоник:

$$K_{Г2} = \frac{U_{2Г}}{U_1} = \frac{I_2}{I_1}.$$

В звуковых усилителях эти искажения воспринимаются на слух как хрипы, дребезжание. При  $K_{Г} \leq 2 \div 3\%$  — искажения на слух не заметны. Однако в высококачественных усилителях устанавливают  $K_{Г} \leq 0,2\%$ , а в усилителях многоканальной связи  $< 0,001\%$ . Нелинейные искажения оценивают затуханием нелинейности (в дБ):

$$a_{Г[дБ]} = 20 \lg \left( \frac{1}{K_{Г}} \right).$$

Часто нормируют затухание по второй и третьей гармоникам:

$$a_{Г2} = 20 \lg \left( \frac{U_1}{U_2} \right); \quad a_{Г3} = 20 \lg \left( \frac{U_1}{U_3} \right).$$

В любом усилителе нелинейные искажения увеличиваются при приближении амплитуды выходного напряжения к максимально возможному значению. Напряжение  $U_{\text{вых}}$  (или  $U_{\text{вх}}$ ), при котором  $K_{Г}$  равен заданному (допустимому) значению, называется номинальным.

Тогда выходная номинальная мощность

$$P_{\text{выхном}} = \frac{U_{\text{выхном}}^2}{R_{\text{н}}}.$$

При усилении сложных сигналов возникают не только гармоники спектральных составляющих, но и их комбина-

ционные частоты. На слух они более заметны, т. к. они являются вновь возникшими составляющими. Поэтому для высококачественных усилителей измеряют такие интермодуляционные искажения, подавая на вход два синусоидальных колебания с сильно различающимися амплитудами: амплитуда сигнала  $f_1$  берется на 12 дБ меньше номинальной, а  $f_2$  — на 24 дБ (ГОСТ 23849-87). Количественно определяется (и нормируется) отношение суммарного напряжения комбинационных составляющих к напряжению частоты  $f_2$  на выходе усилителя.

### 16.8. Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия характеризует экономичность расходования энергии питания. Обычно он измеряется при усилении сигнала на  $f = 1 \text{ кГц}$ . Общий КПД всего усилителя называется промышленным — это отношение номинальной выходной мощности в нагрузке к суммарной мощности, потребляемой от всех источников:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\Sigma}}.$$

Разность  $P_{\Sigma} - P_{\text{ном}}$  является мощностью потерь в усилителе.

Применяются также КПД выходной цепи:

$$\eta = P_{\sim} / P_{\Pi},$$

где  $P_{\sim}$  — мощность переменного тока в выходной цепи УЭ (например, транзистора);  $P_{\Pi}$  — мощность, потребляемая этой цепью.

Чем выше  $\eta$ , тем меньше потери в УЭ, которые превращаются в тепло.

Таким образом,  $\eta$  косвенно характеризует удельные размеры, массу (на единицу выходной мощности).

## 16.9. Собственные помехи

Собственные помехи возникают внутри АЭУ. В основном это фон, наводки, шумы, а в УПТ — это еще и дрейф нуля. Фон — это колебания с частотой питающей сети, или кратной ей. Возникают в результате недостаточности сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения, из-за цепей накала катодов (при питании их переменным током). Наводки — помехи, наводимые в АЭУ электрическими или магнитными полями. Источники этих полей — трансформаторы, соединительные провода, электросети.

Количественная оценка фона и наводок — отношение их напряжения на выходе усилителя к номинальному выходному напряжению  $U_{\text{ном}}$  при номинальной выходной мощности. Как правило, норма  $\approx -60 \div -70$  дБ.

Собственные шумы усилителя представляют собой флуктуационные колебания, обусловленные хаотическим движением свободных носителей заряда (электронов, дырок) во всех электропроводящих материалах, из которых сделаны детали АЭУ.

Шумы возникают на микроскопическом уровне строения материалов, очень слабые. Но, будучи усиленными, могут быть соизмеримы с уровнем полезного сигнала. Их оценка будет дана ниже.

Дрейф нуля — медленное изменение выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  из-за нестабильности напряжения источника питания  $U_{\text{питания}}$  и характеристик транзисторов. Как правило, этот вид искажений относится к усилителям постоянного тока (УПТ). Их оценка будет дана ниже.

## 16.10. Амплитудная характеристика. Динамический диапазон

Амплитудная характеристика (АХ) — это зависимость амплитуды или действующего значения выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  от входного синусоидального напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  (рис.1-4):

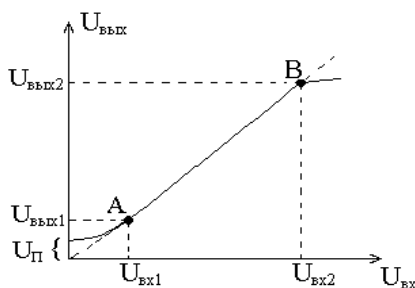


рис.1-4

Отношение  $U_{\text{ВЫХ}}$  к  $U_{\text{ВХ}}$  — это коэффициент усиления  $K$ . Поэтому, казалось бы, АХ должна быть прямой линией, исходящей из начала координат. Однако, она совпадает с прямой только на участке АВ. Начальный участок АХ отклоняется от прямой линии из-за наличия собственных помех  $U_{\text{П}}$ .

Верхний загиб АХ обусловлен наступлением перегрузок каскадов усилителя, когда наступает ограничение выходного колебания. Подробности будут рассмотрены ниже.

Динамический диапазон  $D$  — отношение наибольшего выходного (входного) напряжения к наименьшему в пределах линейной части АХ:



$$D = \frac{U_{\text{вых}2}}{U_{\text{вых}1}} = \frac{U_{\text{вх}2}}{U_{\text{вх}1}}$$

Динамический диапазон определяют обычно в дБ:

$$D_{[\text{дБ}]} = 20 \lg D, \text{ и обычно } D = 40 \div 60 \text{ дБ.}$$

Реальные речевые сигналы непрерывно изменяются: для радиовещания диапазон изменения сигналов составляет  $D_C \cong 40 \text{ дБ}$ . Для симфонического оркестра -  $D_C \cong 70 \text{ дБ}$ . Для усилителя необходимо выполнение условия  $D \geq D_C$ .

### 16.11. Специфические показатели АЭУ

Рассмотренные выше показатели характерны для большинства АЭУ. Однако есть специфические показатели, например:

для интегральных операционных усилителей и других аналоговых схем:

- входные токи; ЭДС; смещение нуля; максимальная скорость нарастания  $U_{\text{вых}}$ ; коэффициент ослабления синфазных  $U_{\text{вх}}$  и др.

для устройств перемножения и деления:

- масштабный коэффициент;

- величина прямого прохождения (или просачивания на выход напряжения) входного напряжения по одному из входов при равенстве нулю другого.

для компараторов:

- время переключения.

для активных фильтров:

- частота среза и неравномерность АЧХ в полосе пропускания и др.

## 16.12. Стабильность показателей

Технические показатели и характеристики любых АЭУ, к сожалению, не являются постоянными из-за нестабильности параметров составляющих элементов: при изменении температуры, напряжения питания; изменение показателей от экземпляра к экземпляру (производственный разброс), изменения вследствие старения. Наиболее нестабильны параметры транзисторов.

Для важнейших параметров показатели нестабильности нормируются техническими условиями.

При отыскании нестабильности какого-либо показателя  $\gamma$  устройства принято использовать понятие параметрической чувствительности:

$$S_x^\gamma = \frac{\frac{d\gamma}{\gamma}}{\frac{dx}{x}} = \frac{d\gamma}{dx} \cdot \frac{x}{\gamma}$$

— безразмерная величина;

Это, по сути, отношение относительных нестабильностей показателя  $\gamma$  по параметру  $x$  (как источника нестабильности).

Например: для простейшего однотранзисторного усилителя

$$\gamma = K, \quad x = I_{k0}.$$

Тогда чувствительность коэффициента усиления ( $K$ ) к изменениям тока коллектора ( $I_{k0}$ ) в рабочей точке:

$$S_{I_{k0}}^K = \frac{dK}{dI_{k0}} \cdot \frac{I_{k0}}{K} \quad (\text{безразмерная величина}).$$

## Выводы по теме

1. Оценка (количественная) АЭУ производится по его техническим показателям: усиление, искажения, точность преобразования, по уровням  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$ , и т. д.

2. Большинство параметров АЭУ совпадает с параметрами усилителей, т. к. основная масса АЭУ построена на их основе.

3. Стандартизация и унификация позволяют упростить разработку, удешевить производство, упростить ремонт техники.

4. Технические показатели и характеристики любых АЭУ, к сожалению, не являются постоянными из-за нестабильности параметров составляющих элементов: при изменении температуры, напряжения питания; изменение показателей от экземпляра к экземпляру (производственный разброс), изменения вследствие старения. Наиболее нестабильны параметры транзисторов.

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение входному и выходному сопротивлениям усилителя;

2. Как определяются коэффициенты передачи по напряжению, по току усилителя?

3. Как определяется коэффициент передачи по мощности усилителя?

4. Приведите определение амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик усилителя;

5. Что такое переходная характеристика усилителя?

6. В чем суть нелинейных искажений и причина их появления?

7. Дайте определение коэффициента полезного действия;

8. Приведите классификацию и объясните природу собственных помех усилителя;

9. Что такое амплитудная характеристика?

10. Что такое динамический диапазон усилителя?

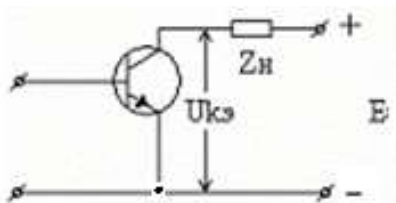
11. Приведите примеры специфических показателей усилителя;

12. Что такое параметрическая чувствительность усилителя?

## 17. Требования к цепям питания усилительных элементов. Стабилизация режима транзистора

Состояние, при котором напряжение входного сигнала  $U_{вх\sim} = 0$  для УЭ, называется состоянием покоя. Положение рабочей точки на входной и выходной ВАХ в этом состоянии характеризует режим работы УЭ по постоянному току. Для его обеспечения подают, например, для биполярного транзистора: напряжение смещения — напряжение “база-эмиттер” и напряжение питания коллекторной цепи. Для получения выходного напряжения по переменному току используют две схемы (рис.17-1):

а) схема последовательного питания:



б) схема параллельного питания:

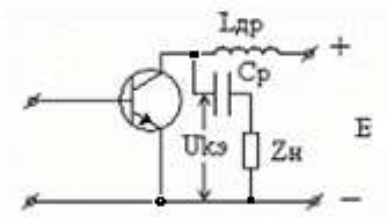


рис. 17-1

В первом случае через  $Z_n$  проходит и постоянная и переменная составляющие тока транзистора; во втором случае из-за  $C_p$  через  $Z_n$  идет только переменная составляющая. Подача смещения осуществляется цепями смещения. Возможно использование или двух самостоятельных ИП (по

смещению и по питанию коллектора), или питание осуществляется от одного ИП (чаще всего).

К цепям смещения предъявляются особые требования:

1) задать выбранные значения и полярность напряжений питания для установления положения рабочей точки;

2) обеспечить положение точки покоя в заданном положении при воздействии дестабилизирующих факторов.

Если выполняется только первое требование, то это - нестабилизированные цепи питания. Если оба требования выполняются одновременно, то это – стабилизированные цепи питания.

## 17.1. Нестабилизированные цепи питания

### 17.1.1. Смещение фиксированным током базы

Схема установки смещения фиксированным током представлена на рис. 17-2:

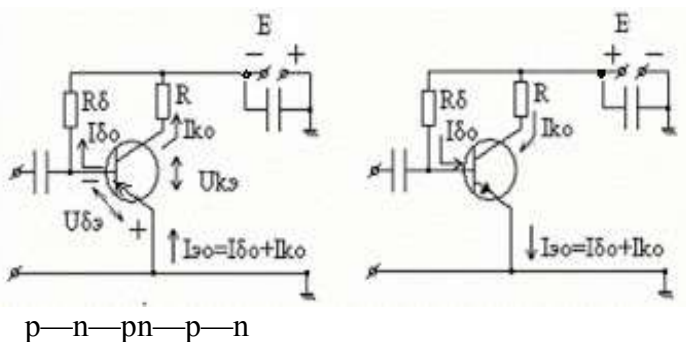


рис.17-2

Сопротивление  $R_\delta$  выбирается  $\gg R_{\delta k}$  (сопротивления перехода база-коллектор) по постоянному току;  $U_{\delta э0} \ll E$ . Поэтому

$$I_{\delta 0} = (E - U_{\delta э0}) / R_\delta \approx E / R_\delta .$$

То есть ток базы практически не зависит от параметров транзистора, является фиксированным (определяется только величинами  $E$  и  $R_\delta$ ).

Ток  $I_{\delta 0}$  создает на входном сопротивлении напряжение смещения  $U_{\delta 0}$  (для кремниевых транзисторов  $\approx 0,6 \div 0,7$  В, для германиевых — меньше).

Не следует думать, что если  $I_{\delta 0}$  или  $U_{\delta 0}$  фиксированы, то точка покоя постоянна на ВАХ. На самом деле статические характеристики нестабильны. Причины нестабильности:

— технологический разброс параметров от транзистора к транзистору;

— сильная зависимость параметров от температуры.

Ток коллектора

$$I_k \approx h_{21\beta} (I_{\delta 0} + I_{k0}),$$

где  $h_{21\beta}$  — статический коэффициент усиления по току в схеме ОЭ;  $I_{k0}$  — начальный ток коллектора при отключенном эмиттере. Это тепловой ток неосновных носителей заряда через р-п переход (часто его называют обратным током коллектора).

Коэффициент  $h_{21\beta}$  может от транзистора к транзистору изменяться в  $2 \div 3$  раза. Ток  $I_k$  меняется от температуры: при изменении  $\Delta t = 10^\circ$  изменение  $\Delta I_k = 2$  раза для германиевых и 3 раза для кремниевых транзисторов. То есть величина изменения  $\Delta I_k$  очень сильно зависит от дестабилизирующих факторов. Даная схема на практике применяется редко. Для расчетов используют параметры:

- среднее значение коэффициент  $h_{21\beta}$  :

$$h_{21\beta} = \sqrt{h_{21\beta \min} \cdot h_{21\beta \max}}$$

- значение начального тока коллектора при отключенном эмиттере

$$I_{кo} = h_{21э} \cdot I_{бo} + (1 + h_{21э}) \cdot I_{кbo},$$

где  $I_{кbo}$  — начальный обратный ток коллектора перехода, зависящий от окружающей температуры и температуры перехода транзистора  $t_{п}$ :

$$I_{кbo}(t) = I_{кbo} \cdot 10^{a(t_{п} - 25^{\circ})}.$$

Для кремниевых транзисторов  $a = 0,02 \div 0,025$ ; для германиевых  $a = 0,03 \div 0,035$ .

### 17.1.2. Смещение фиксированным напряжением база—эмиттер

Схемы смещения с фиксированным напряжением база—эмиттер приведены на рис. 17-3:

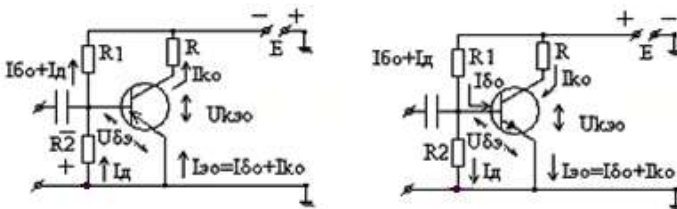


рис.17-3

Необходимое напряжение смещения  $U_{бэo}$  обеспечивается делителем  $R_1 / R_2$  в цепи базы.

$$E = I_{д} \cdot R_2 + I_{бo} \cdot R_1 + I_{д} \cdot R_1$$

где  $I_{д}$  — ток делителя:

$$I_{д} = \frac{E - I_{бo} \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

Так как



$$U_{\text{бэо}} = I_{\text{д}} \cdot R_2,$$

то

$$U_{\text{бэо}} = (E - I_{\text{бо}} \cdot R_1) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

То есть, чем больше  $I_{\text{д}}$ , тем меньше  $U_{\text{бэо}}$  зависит от параметров транзистора.

При  $I_{\text{д}} \gg I_{\text{бо}}$

$$U_{\text{бэо}} \approx \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

то есть смещение фиксировано, и зависит только от  $E$ . Достоинство схем — простота и экономичность. Однако применение ограничено из-за нестабильности режимов транзистора во времени.

Причины нестабильности:

- изменение температуры и разброс параметров приводит к изменениям  $\Delta I_{\text{кбо}}$  и  $\Delta I_{\text{ко}}$ . При этом напряжение на делителе будет изменяться. Для уменьшения этого влияния нужно, чтобы выполнялось условие  $I_{\text{д}} \gg I_{\text{бо}}$ . Но для роста  $I_{\text{д}}$  нужно уменьшать  $R_1$  и  $R_2$ , что ведет к росту  $P_{\text{расс}}$  на них и уменьшению  $R_{\text{вх}}$  каскада. Для данной схемы влияние температуры можно учесть через параметр  $\Delta U_o$ , который учитывает сдвиг характеристики прямой передачи  $i_k = f(U_{\text{бэ}})$ , который происходит примерно со скоростью  $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ В на } 1 \text{ градус}$  (рис.2-4). При этом:

$$\Delta U_o = 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t_c + (0,03 \div 0,06) \text{ В},$$

где добавки  $(0,03 \div 0,06)$  — это технологический разброс.

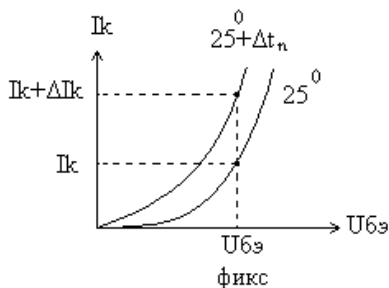


рис.17-4

Тогда с учетом конечного значения  $R_6$ :

$$\Delta I_{ko} = \frac{h_{11э} \cdot \Delta U_o \cdot Y_{21э}}{h_{11э} + R_6} = \frac{h_{21э} \cdot \Delta U_o}{h_{11э} + R_6}$$

где

$$R_6 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

## 17.2. Стабилизация режима транзистора

### 17.2.1. Эмиттерная стабилизация

Схема эмиттерной стабилизации приведена на рис.17-5: Стабилизация осуществляется за счет отрицательной обратной связи, создаваемой по току за счет падения напряжения на резисторе  $R_3$ .

Напряжение смещения:

$$U_{бэо} = I_D \cdot R_2 - I_{эо} \cdot R_3 = U_{бб} - I_{эо} \cdot R_3$$

где

$$U_{бб} = I_D \cdot R_2$$

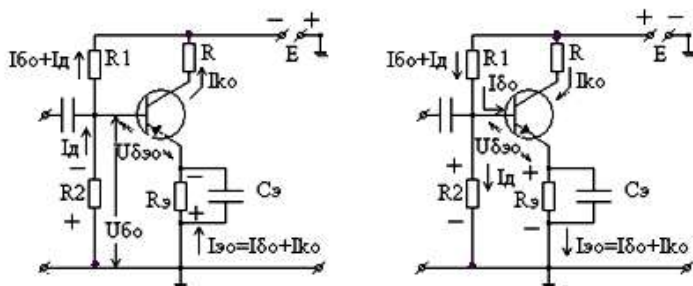


рис.17-5

Ток  $I_d \gg I_{60}$  и напряжение  $I_d \cdot R_2$  практически не зависит от тока базы  $I_{60}$ . Напряжение  $U_{630}$ , и, следовательно, смещение будет изменяться при изменении  $I_{30}$  только из-за изменения  $(I_{30} \cdot R_3)$ . Например, пусть  $I_{30}$  растет с ростом температуры (или при смене транзистора). При этом растет  $I_{30} \cdot R_3$ ; это приведет к уменьшению  $U_{630}$ ,

Транзистор закроется, ток  $I_{60}$  соответственно уменьшится, соответственно уменьшится  $I_{30}$ . Для того, чтобы коэффициент усиления не упал,  $R_3$  по переменному току закорачивают конденсатором  $C_3$ . Стабилизирующее действие увеличивается с ростом  $R_3$  и уменьшением  $R_1, R_2$  (с увеличением  $I_d$ ). Но при этом необходимо увеличивать  $E_{п}$  (требуемое).

Обычно выдерживают:

$$U_{R_3} = (0,1 \div 0,2) E_{п}$$

Тогда

$$R_3 = (0,1 \div 0,2) \frac{E}{I_{30}}.$$

Затем задают  
и определяют

$$I_D = (1 \div 10) I_{\delta o}$$

$$R_2 = [I_{\delta o} \cdot R_3 + |U_{\delta o}|] / I_D$$

$$R_1 = (E - I_D \cdot R_2) / (I_D + I_{\delta o}).$$

Для найденных значений  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  находят коэффициент неустойчивости:

$$S_T = \left[ 1 - \frac{h_{21\delta}}{1 + R_3/R_1 + R_3/R_2} \right]^{-1}$$

Если  $S_T = 2 \div 10$ , то считают стабилизацию удовлетворительной.

Другое объяснение стабилизации.

Эмиттерную стабилизацию можно объяснить действием последовательной ООС по току. Напряжение ОС с  $R_3$  подается на базу последовательно с напряжением  $U_{\delta\epsilon}$  в противофазе. При этом глубина обратной связи (будет рассмотрено ниже - в лекции «Обратная связь») составляет

$$F = (1 + h_{21\epsilon}) R_3 / (R_{\delta} + R_{вх}),$$

где величина входного сопротивления:

$$R_{вх} = r_{\delta} + r_3 (1 + h_{21\epsilon});$$

и изменение тока коллектора (с учетом ООС) уменьшается:

$$\Delta I_{к ос} = \Delta I_{к} / F$$

- т.е. происходит повышение стабильности положения рабочей точки.

Так как действие ООС влияет и на полезный сигнал, то для исключения этого влияния резистор  $R_3$  блокируют конденсатором  $C_3$ .

Рассмотренная схема широко применяется в предварительных каскадах усиления, где постоянная составляющая выходного тока не зависит от амплитуды усиливаемого сигнала. В оконечных каскадах смещение на транзисторе зависит от амплитуды выходного сигнала, поэтому для них применяют схемы смещения с фиксированным напряжением база-эмиттер, а для стабилизации рабочей точки применяют схемы с термокомпенсацией.

### 17.2.2. Цепи смещения с температурной стабилизацией

Цепи смещения с температурной стабилизацией показаны на рис.17-6.

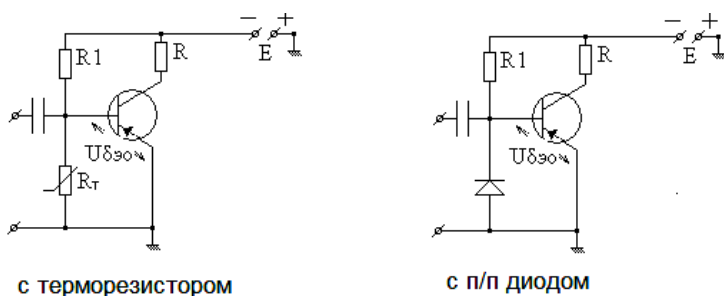


рис.17-6

В качестве терморезистора берут резисторы с отрицательным температурным коэффициентом: с ростом температуры уменьшается сопротивление терморезистора. Это при-

водит к уменьшению  $U_{бэо}$ , что, в свою очередь, приводит к соответствующему уменьшению  $I_{ко}$ .

Таким образом,  $\Delta I_{ко}$  (изменение) может быть существенно уменьшено из-за противоположных направлений изменения  $I_{ко}$ . Если вместо  $R_1$  включить терморезистор с положительным температурным коэффициентом, то стабильность  $\Delta I_{ко}$  существенно улучшится.

При использовании полупроводниковых диодов повышение температуры приводит к уменьшению прямого сопротивления диода, что приводит к уменьшению  $U_{бэо}$  и соответственно к уменьшению  $I_{ко}$ , что стабилизирует ток коллектора.

Примечание: для стабилизации режима необходимо, чтобы изменение  $U_{бэо}$  от температуры на терморезисторе (или диоде) убывало с такой же скоростью, с какой изменяется напряжение на эмиттерном p-n переходе транзистора (со скоростью  $\frac{\Delta U_{об}}{\Delta T} = -2.2 \text{ мВ}/^{\circ}\text{К}$ ).

Недостаток диодной схемы компенсации — невысокая точность и глубина.

При большом сигнале термоэлементы вносят искажения.

Схемы диодной компенсации широко используются в интегральных малосигнальных усилителях.

### 17.3. Цепи смещения без стабилизации режимов полевых транзисторов

Напряжения, характеризующие состояние покоя, и выходные токи покоя устанавливают подачей постоянных напряжений на соответствующие электроды полевых транзисторов (ПТ).

Входные токи ПТ практически отсутствуют, если не принимать во внимание чрезвычайно малые обратные токи затвора, составляющие единицы—десятки нано- или пико-ампер в зависимости от типа ПТ.

Цепи смещения без стабилизации режимов ПТ приведены на рис.17-7.

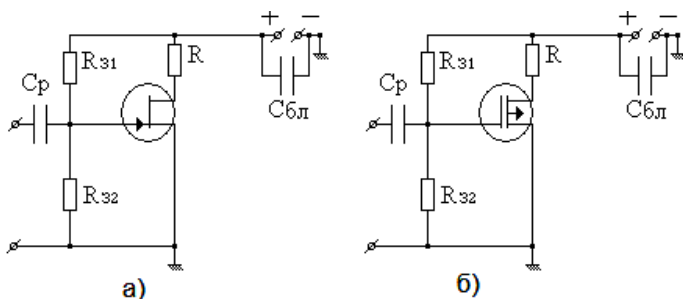


рис.17-7

Схема с фиксированным напряжением на затворе для ПТ с управляющим р—п переходом (с n—каналом) – рис.2-7 а); схема для МДП — транзистора (с встроенным каналом р—типа) – рис.2-7 б).

Напряжение смещения

$$U_{zu} = E \cdot R_{32} / (R_{31} + R_{32});$$

величины  $R_{31}, R_{32}$  выбирают так, чтобы высокое  $R_{вх}$  транзистора шунтировалось незначительно.

Недостатки данных схем – отсутствие стабилизации ПТ при изменении температуры.

## 17.4. Цепи смещения со стабилизацией режима работы полевых транзисторов

Схема истоковой стабилизации режима работы приведена на рис.17-8.

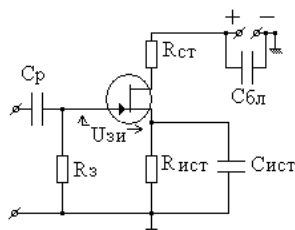


рис.17-8

Блокировочный конденсатор  $C_{ист}$  устраняет отрицательную ОС по сигналу, способствуя большему усилению, а конденсатор  $C_p$  — обычный разделительный во входной цепи. Резистор  $R_{ст}$  — стоковая нагрузка ПТ.

Любые отклонения постоянного тока стока от исходного приводят к изменению напряжения на  $R_{ист}$  (передающегося затем через  $R_3$  на затвор), что стабилизирует положение точки покоя:

$$U_{зи} \cong -R_{ист} \cdot I_c$$

Для увеличения стабилизации применяется схема (рис.17-9).

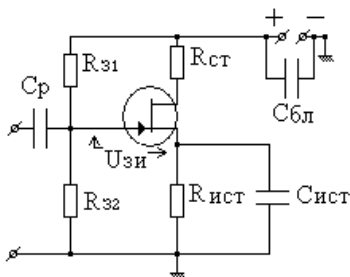


рис.17-9



Схема на рис.17-9 отличается от предыдущей только тем, что в ней добавлен один резистор, включенный между стоком и затвором для увеличения стабильности исходного режима работы. Дело в том, что сопротивление в цепи истока  $R_{ист}$  в предыдущей схеме строго определено:

$$R_{ист} = \frac{U_{зи}}{I_c}$$

Однако полученное сопротивление резистора может оказаться недостаточным с точки зрения стабильности. В этом случае необходимый уровень стабилизации достигается увеличением сопротивления резистора в цепи истока  $R_{ист}$  с последующей компенсацией излишка напряжения введением в схему делителя напряжения  $R_{31}, R_{32}$ .

При этом смещение:

$$U_{зи} = U_{R32} - I_c \cdot R_{ист} = \frac{R_{32} \cdot E}{R_{31} + R_{32}} - I_c \cdot R_{ист}$$

Обычно выбирают:

$$\frac{R_{31}}{R_{32}} = \frac{E}{U_{R32}} - 1$$

Тогда задавая значения  $R_{31}$ , находим значение  $R_{32}$ .

## 17.5. Генераторы стабильного тока (ГСТ)

### 17.5.1. Принцип работы ГСТ

Для повышения стабильности режима стараются увеличить  $R_{ист}$ , однако из-за большого падения напряжения на нем величина  $R_{ист}$  ограничена сверху величиной напряже-

ния источника питания. Поэтому его заменяют ГСТ (вместо  $R_{ист}$ ) – рис.17-10:

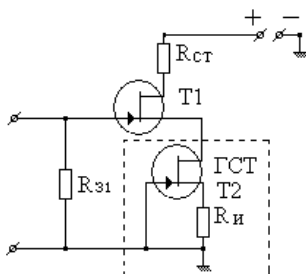


рис.17-10

ГСТ – это устройство, близкое по своим параметрам к идеальному источнику, ток которого не изменяется с изменением сопротивления на нагрузке. У ГСТ динамическое сопротивление  $R_{и}$  значительно отличается от сопротивления постоянному току и при большем значении  $R_{и}$  не надо повышать  $E_{ист.}$  питания. ГСТ находит широкое применение не только для цепей смещения, но и в качестве динамических нагрузок и цепей стабилизации (рис.17-11):

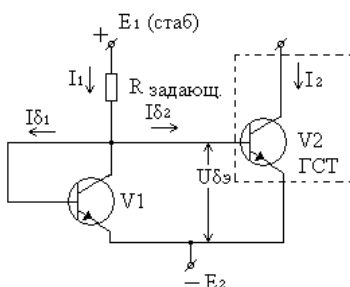


рис.17-11

Для транзистора V1:

$$I_1 = (I_{\kappa 1} + I_{\bar{o}1} + I_{\bar{o}2}) = (1 + h_{21\bar{o}1}) \cdot I_{\bar{o}1} + I_{\bar{o}2}.$$

Для основного транзистора V2:

$$I_2 = I_{k2} = h_{21\bar{o}2} \cdot I_{\bar{o}2}$$

Так как транзисторы одинаковы, то  $I_{\bar{o}1} \cong I_{\bar{o}2}$ ;  $h_{21\bar{o}1} \cong h_{21\bar{o}2}$ , при этом соотношение токов

$$\frac{I_1}{I_2} = \left[ \frac{1 + h_{21\bar{o}1}}{h_{21\bar{o}2}} \right] \cdot \frac{I_{\bar{o}1}}{I_{\bar{o}2}} + \frac{1}{h_{21\bar{o}2}}$$

близко к 1 при  $h_{21\bar{o}1} \gg 1$  и  $h_{21\bar{o}2} \gg 1$ , что обычно выполняется.

Таким образом, для V1 и V2 имеет место “зеркальное отображение” токов, выражающееся в том, что I2 “следит” за I1.

В этом смысле понимается термин “токовое зеркало”. Относительная нестабильность – тоже одинакова

$$\Delta I_1 / I_1 = \Delta I_2 / I_2.$$

Так как дополнительный транзистор V1 используется в диодном режиме, то его ток  $I_{\kappa 1}$  (и, соответственно, ток  $I_1$ ) можно стабилизировать с требуемой точностью. Соответственно, можно стабилизировать ток  $I_2$ , задавая его значение с помощью источников питания  $E_1$ ,  $E_2$  и резистора  $R_{\text{задающ.}}$ . Транзистор V2 включают в эмиттерные цепи соответствующих транзисторов, стабилизируя их токи.

### 17.5.2. Схемы ГСТ

Термин “токовое зеркало” раньше применяли для схем у которых  $\frac{I_1}{I_2} = 1$ . В последствии стали применять и для схем, у которых  $\frac{I_1}{I_2} \neq 1$ , но стабильно. Для таких схем применяют термин “отражатель тока”. Температурную стабильность можно получить для данной схемы приблизительно 5% (по току). Недостатком данной схемы – малое отношение  $\frac{I_1}{I_2} \approx 5$ . Для отношений  $\gg 5$  применяют другую схему ГСТ (рис.17-12).

Достоинство схемы - позволяет стабилизировать весьма малые токи  $I_2$  при сравнительно небольших  $R_{зад}$  и  $R_э$ .

Наличие  $R_э$  заметно увеличивает выходное сопротивление ГСТ (за счет ООС по току). Однако при этом токи  $I_2$  могут оказаться очень малыми, что нежелательно. Для устранения этого применяют схему с  $R_{доб}$  (рис.17-13):

За счет  $R_{доб}$  повышается потенциал  $U_{бэ2}$  и увеличивается  $I_{э2}$ , сохраняя высокое выходное сопротивление.

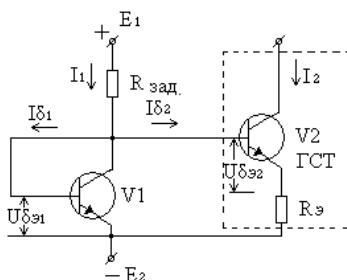


рис.17-12

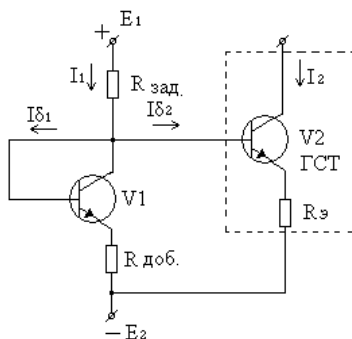


рис.17-13

$$U_{\bar{\sigma}1} + I_{\sigma 1} \cdot R_{\text{доб}} = U_{\bar{\sigma}2} + I_{\sigma 2} \cdot R_{\sigma}$$

Пренебрегая  $I_{\sigma 1}$  ( $I_{\sigma 2}$ ) можно записать:

$$I_{\sigma 1} = I_1; I_{\sigma 2} = I_2$$

При равенстве  $R_{\text{доб}}$  и  $R_{\sigma}$  следует равенство  $I_1 = I_2$  (при идентичности параметров схем).

То есть это - типичный “отражатель тока” (“токовое зеркало”).

При  $I_1 \cdot R_{\text{доб}} \cong U_{\bar{\sigma}1}$  и, соответственно,

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{R_{\text{доб}}}{R_{\sigma}}$$

То есть отношения токов может варьироваться в очень широких пределах (до двух порядков) независимо от температуры.

Другое достоинство ГСТ - большое динамическое сопротивление для переменного тока и очень малое по постоянному току.

Физическая суть значительного отличия  $R_{\text{дин}} \gg R_{\text{статич}}$  для ГСТ при использовании терминов « активная нагрузка» или «электронный эквивалент сопротивления» может быть объяснена на рис.17-14:

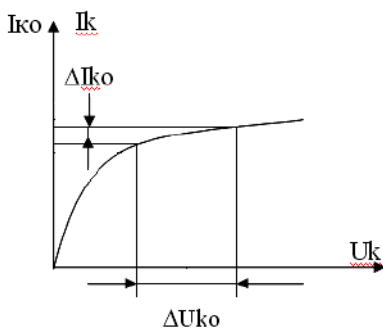


рис.17-14

$R_{\text{статич}} = U_{k0} / I_{k0}$  (небольшое);  $R_{\text{дин}} = \Delta U_k / \Delta I_k$ ; При этом, так как  $\Delta I_k$  очень мало (из-за небольшого наклона ВАХ), то получается  $R_{\text{дин}} \gg R_{\text{статич}}$ . Реально можно получить для  $R_{\text{дин}}$  сотни  $k\Omega$  или даже  $M\Omega$  при относительно небольших значениях  $R_{\text{статич}}$ .

## Выводы по теме

1. К цепям смещения предъявляются особые требования:
  - 1) задать выбранное значение и полярность напряжения для положения рабочей точки;

2) обеспечить положение точки покоя в заданном положении при воздействии дестабилизирующих факторов.

2. Достоинство схем фиксированным током базы или фиксированным напряжением базы — простота и экономичность. Однако применение ограничено из-за нестабильности режимов транзистора во времени и из-за изменения температуры.

3. Эмиттерная стабилизация имеет преимущество перед коллекторной, так как исходный режим задается делителем  $R_1R_2$ , а требуемая стабилизация — выбором  $R_3$ , независимо от параметров делителя; эмиттерная стабилизация более эффективна.

4. Недостаток диодной схемы компенсации — невысокая точность и глубина. При большом сигнале термоэлементы вносят искажения. Диодная схема компенсации широко используется в интегральных малосигнальных усилителях.

5. Входные токи ПТ практически отсутствуют, если не принимать во внимание чрезвычайно малые обратные токи затвора, составляющие единицы — десятки нано- или пикоампер в зависимости от типа ПТ.

6. Смещение на ПТ желательно выбирать таким, чтобы точка покоя была расположена ближе к термостабильной точке транзистора.

7. ГСТ — это устройство, близкое по своим параметрам к идеальному источнику, ток которого не изменяется с изменением сопротивления на нагрузке. ГСТ находит широкое применение не только для цепей смещения, но и в качестве динамических нагрузок и цепей стабилизации.

8. Достоинством схемы стабилизации с ГСТ является стабилизация весьма малых токов при сравнительно небольших значениях резисторов  $R_{зод}$  и  $R_3$ .

9. Другим достоинством ГСТ является большое дина-

мическое сопротивление для переменного тока и очень малое по постоянному току. При использовании обычных элементов этого достичь невозможно.

### Контрольные вопросы

1. Приведите схему последовательного и параллельного питания транзистора в каскадах маломощного усиления;
2. Какие требования предъявляются к цепям смещения?
3. Приведите особенности схемы смещения фиксированным током базы;
4. Приведите особенности схемы смещения фиксированным напряжением базы;
5. Перечислите причины неустойчивости схем смещения фиксированным током базы и фиксированным напряжением базы;
6. Приведите схему установки рабочей точки фиксации тока эмиттера;
7. Приведите особенности схемы эмиттерной стабилизации;
8. Приведите особенности схемы смещения с температурной стабилизацией;
9. В чем заключаются особенности питания цепей смещения полевых транзисторов?
10. Приведите примеры схем смещения без стабилизации режимов ПТ;
11. Как учитывается неоднозначность зависимости тока стока ПТ от температуры при построении цепей смещения?
12. Приведите примеры схем смещения со стабилизацией режимов ПТ;
13. В чем заключается особенность работы схем ГСТ?



14. В чем заключается особенность построения схемы «токового зеркала»?

15. В чем заключается особенность построения схемы «отражателя тока»?

16. В чем заключается особенность построения схемы и смысл терминов « активная нагрузка» или «электронный эквивалент сопротивления»?

## **18. Обратная связь в аналоговых электронных устройствах и ее влияние на их параметры и свойства. Схемотехника применения отрицательной обратной связи**

Понятие «обратная связь» (ОС) широко используется как в технике, так и в других областях знаний. Когда в 1928 г. была предпринята попытка запатентовать отрицательную обратную связь, то эксперты не увидели ее полезности и дали отрицательный ответ. И действительно, на первый взгляд, отрицательная обратная связь только уменьшает коэффициент усиления усилителя. Однако, как это часто бывает в технике вообще и в электронике в частности, один недостаток того или иного решения может значительно перевешиваться его достоинствами. Отрицательная обратная связь, хотя и уменьшает коэффициент усиления, но исключительно благотворно влияет на многие параметры и характеристики усилителя. В частности, уменьшаются искажения сигнала, в значительно большем диапазоне частот коэффициент усиления оказывается не зависящим от частоты и т. д.

### **18.1. Виды обратной связи**

Обратной связью называется связь, при которой происходит передача сигнала (напряжения, тока) из выходной цепи усилителя во входную (рис.18-1). В усилителях ОС

используется для уменьшения искажений и повышения стабильности усиления и режима работы усилительных элементов. Как видно из рисунка, в узле 1 суммируются сигналы ( $U, I$ ) от источника и от выхода усилителя.

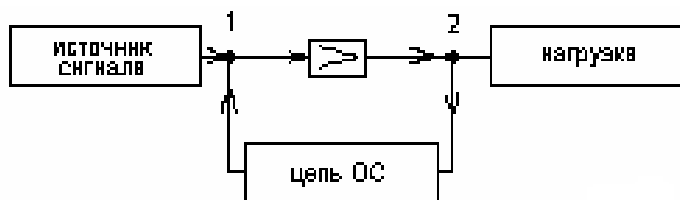


рис.18-1

Если фазы этих сигналов совпадают, то их общая амплитуда возрастает как в точке 1, так и в точке 2 – это положительная обратная связь.

При противоположной фазе – отрицательная обратная связь, вносящая ослабление.

ООС – частотно-независимая, если коэффициент передачи напряжения (тока) цепи ОС не зависит от частоты, в отличие от частотно-зависимой.

Если цепь (элемент) ОС является неотъемлемой частью усилителя, такая ОС – внутренняя. Если ОС охватывает один каскад многокаскадного усилителя, то это местная ОС, в отличие от общей ОС, охватывающей весь усилитель в целом.

### 18.1.1. Параллельная по входу и выходу ОС

Действие этого вида ОС зависит от параметров входной ( $Y_1, Z_1$ ) и выходной ( $Y_2, Z_2$ ) нагрузок и не проявляется при коротком замыкании как на входе ( $Y_1 = \infty, Z_1 = 0$ ), так и на выходе ( $Y_2 = \infty, Z_2 = 0$ ). Так как этот вид связи существует только при  $U_2 \neq 0$ , то этот вид ОС – параллельный по напряжению (рис.18-2):

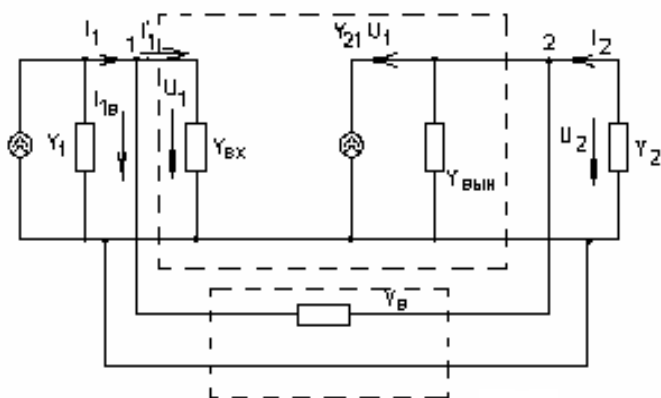


рис.18-2

Другой характерный признак – наличие узлов 1 и 2 на эквивалентной схеме.

Пример реализации такой обратной связи (рис.18-3):

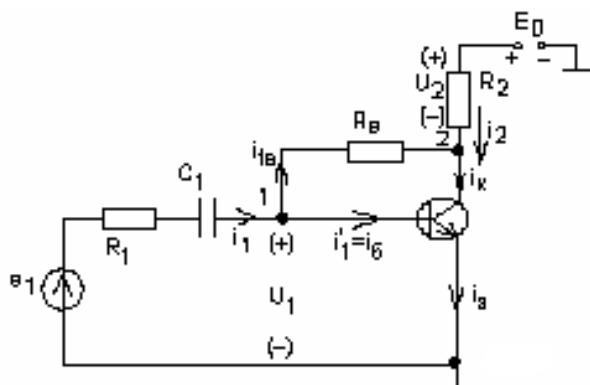


рис.18-3

$$\begin{cases} i_1 = i_1' + i_{1B} \\ i_k = i_2 = i_2 + i_{1B} \end{cases}$$

Разделительный конденсатор  $C_1$  (и резистор  $R_1$ ) является частью сопротивления источника сигнала:

$$Y_1 = \frac{1}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}}$$

Как видно:

1) при  $R_1 = 0$ ,  $1/j\omega C_1 = 0$ , а так же при  $R_2 = 0$  обратная связь не действует;

2) кроме того, имеются узлы 1 и 2.

При  $i_1 = i_1' + i_{1B}$ ; и  $1/j\omega C_1 \ll R_1$

$$U_1 = e_1 - R_1(i_1' + i_{1B})$$

- понижается за счет увеличения  $i_{1B}$  – т.е. характерно для отрицательной обратной связи.

Так как обратная связь имеется только при наличии  $U_2$  (см. эквивалентную схему), то ОС – «по напряжению».

### **18.1.2. Последовательная по входу и выходу обратная связь**

Схема последовательной по входу и выходу обратной связи представлена на рис.18-4:

$Z_{вх}$  – входное сопротивление усилителя без ООС;

$U_{1B}$  – напряжение ОС;

В режиме холостого хода на входе ( $Z_{вх} = \infty$ ) сигнал  $U_{1B}$  не передается на вход;

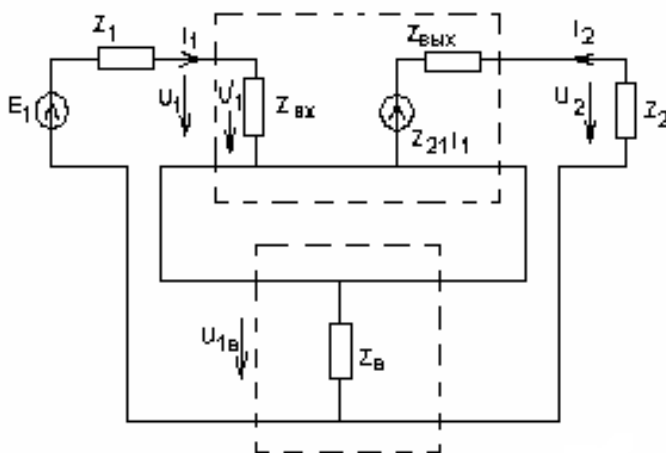


рис.18-4

то же самое – при холостом ходе на выходе ( $Z_2 = \infty$ ) напряжение ОС равно нулю, т.е. необходимым условием наличия ОС – существование выходного тока  $I_2 \neq 0$  (ОС «по току»).

В простейшем случае реализация такой ОС (рис.18-5):  $R_{\delta 1}$ ;  $R_{\delta 2}$ ;  $C_1$  – следует отнести к источнику сигнала:

$$Z_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_{\delta 1}} + \frac{1}{R_{\delta 2}} + \frac{1}{R_1 + j\omega C_1}}$$

Напряжение на промежутке база-эмиттер  $U'_1 = U_1 - U_{1B}$  - т.е. ОС отрицательная. Признаком последовательной ОС является отсутствие узла во входной цепи, а связи по току – то, что при коротком замыкании на выходе ( $R_2 = 0$ ) передача сигнала с выхода на вход не прекращается.

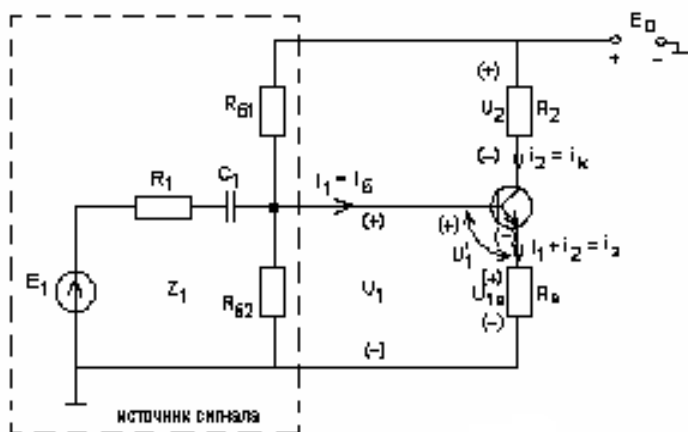


рис.18-5

### 18.1.3. Последовательная по входу и параллельная по выходу обратная связь

Это гибридная схема (рис.18-6).

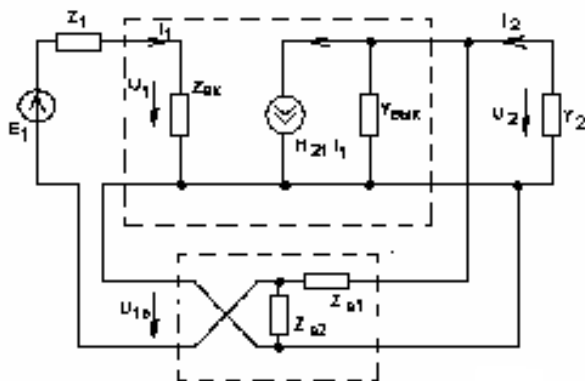


рис.18-6

Данная схема ОС не действует при холостом ходе на входе

( $Z_1 = \infty$ ) и при коротком замыкании на входе ( $Y_2 = \infty$ ).  
 Для получения ОС на выходе ставят делитель  $Z_{B1}$ ,  $Z_{B2}$  (резисторы, конденсаторы, их комбинации, трансформаторы и т.д.).  
 Пример реализации такой обратной связи (рис.18-7):

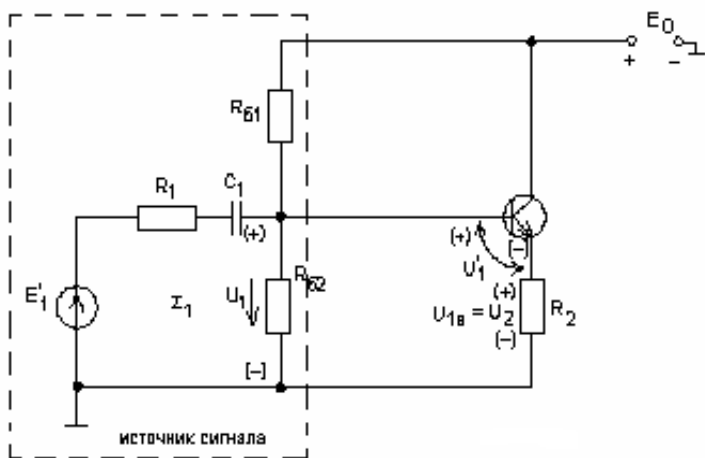


рис.18-7

Напряжение ОС  $U_{1B} = U_2$  равно напряжению на выходе. В схеме отсутствует узел 1 – признак последовательной связи.

$Z_2 = R_2$ , а  $Z_{1B}$  и  $Z_{2B}$  отсутствуют. Связь отрицательная, так как  $U'_1 = U_1 - U_{1B}$ .



#### 18.1.4. Параллельная по входу и последовательная по выходу ОС

Схема параллельной по входу и последовательной по выходу ОС приведена на рис.18-8:

ОС не действует при коротком замыкании на входе ( $Y = \infty$ ) и в режиме холостого хода на выходе ( $Z_2 = \infty$ ,  $Y_2 = 0$ ).  $Y_{1B}$ ,  $Y_{2B}$  – выполняются в виде комбинации из R, C, трансформаторов и т.д.

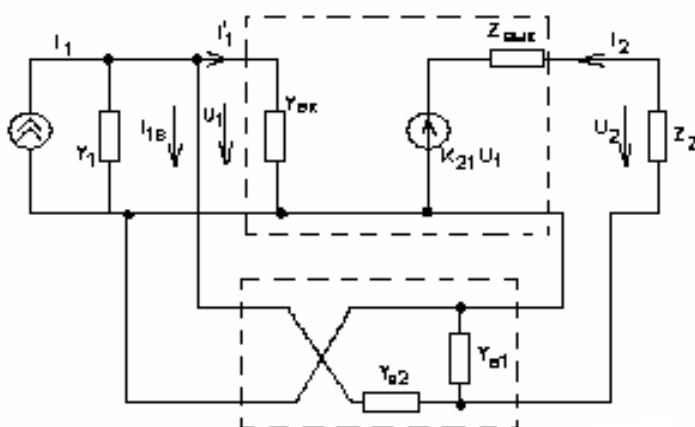


рис.18-8

Пример реализации такой ОС (рис.18-9):

$R_3$  - предназначено для замыкания цепи питания по цепи база-эмиттер.

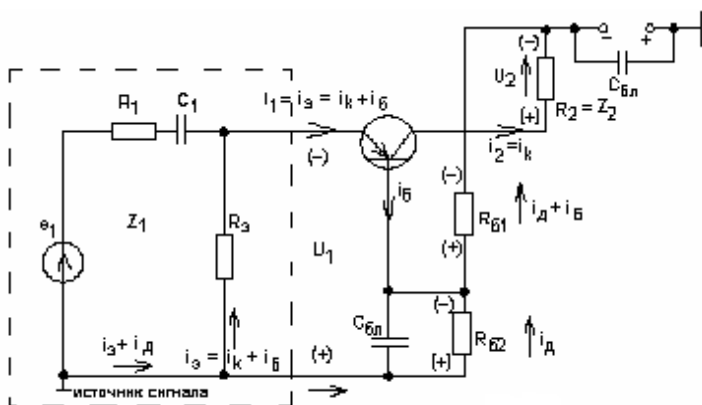


рис.18-9

Комплексное сопротивление источника сигнала

$$Z_1 = \frac{\left( R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \cdot R_3}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + R_3}$$

Напряжение смещения подается на базу через делитель  $R_{б1}$  и  $R_{б2}$ . Для устранения дополнительной (местной) ОС на  $R_{б2}$  – ставится конденсатор  $C_{бл}$ .

Переменная составляющая тока коллектора  $i_k = i_2$ , вызванная напряжением сигнала  $U_1$  проходит в составе эмиттерного тока  $i_3 = i_б + i_k = i_1$  через источник сигнала, т.е. возвращается на вход.

Это схема эмиттерной стабилизации с ОС на резисторе  $R_3$  для схемы с общей базой.

## 18.2. Влияние ОС на коэффициенты усиления.

Рассмотрим влияние ООС на коэффициенты усиления, охваченного последовательной обратной связью по напряжению (рис.18-10).

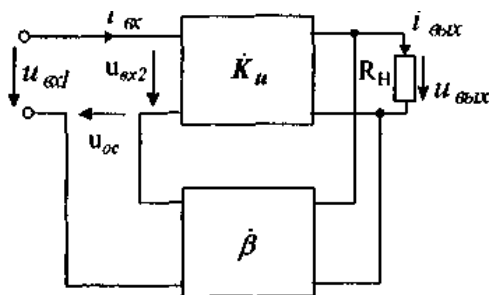


рис.18-10

В структурную схему входит цепь прямой передачи и цепь обратной связи (цепь обратной передачи). Предполагается, что указанные цепи линейные. На усилитель с обратной связью подается внешний синусоидальный входной сигнал  $u_{вх1}$ , а на цепь прямой передачи — сигнал  $u_{вх2}$ . Цепь прямой передачи характеризуется комплексным коэффициентом усиления по напряжению  $\dot{K}_u$  (коэффициентом прямой передачи):

$$\dot{K}_u = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{вх2}},$$

где  $\dot{U}_{вых}$ ,  $\dot{U}_{вх2}$  — соответственно комплексные действующие значения напряжений  $u_{вх2}$  и  $u_{вых}$ .

Цепь обратной связи характеризуется комплексным коэффициентом обратной связи  $\dot{\beta}$ :

$$\dot{\beta} = \frac{\dot{U}_{oc}}{\dot{U}}$$

где  $\dot{U}_{oc}$  — комплексное действующее значение напряжения обратной связи  $u_{oc}$ .

Коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью, определяется по формуле

$$\dot{K}_{uoc} = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{вх1}}$$

где  $\dot{U}_{вх1}$  — комплексное действующее значение напряжения  $u_{вх1}$ . Легко заметить, что при отрицательной обратной связи

$$\dot{U}_{вх2} = \dot{U}_{вх1} - U_{oc}$$

$$\dot{U}_{вх1} = U_{вх2} + U_{oc}$$

Поэтому

$$\begin{aligned} \dot{K}_{uoc} &= \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{вх1}} = \frac{\dot{K}_u \cdot \dot{U}_{вх2}}{\dot{U}_{вх2} + \dot{U}_{oc}} = \frac{\dot{K}_u \cdot \dot{U}_{вх2}}{\dot{U}_{вх2} + \beta \cdot \dot{U}_{вых}} = \\ &= \frac{\dot{K}_u \cdot \dot{U}_{вх2}}{\dot{U}_{вх2} + \beta \cdot \dot{K}_u \cdot \dot{U}_{вх2}} = \frac{\dot{K}_u}{1 + \beta \cdot \dot{K}_u} \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\dot{K}_{uoc} = \frac{\dot{K}_u}{1 + \beta \cdot \dot{K}_u}$$

т.е. коэффициент усиления по напряжению при последовательной отрицательной обратной связи уменьшается.

Коэффициент усиления по току при этом виде обратной связи не изменяется:

$$K_i = \frac{I_{вых}}{I_{вх}} = K_{ioc} = const,$$

полагая при этом, что  $U_{BX2}$  и  $R_{BX}$  (т.е.  $I_{BX}$ ) усилителя не изменяются при введении обратной связи.

Рассмотрим влияние ООС на коэффициенты усиления, охваченного параллельной обратной связью по напряжению (рис.18-11).

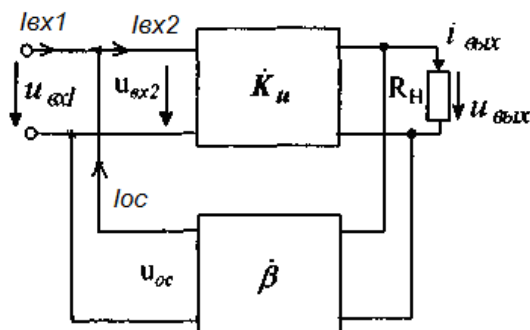


рис.18-11

Так как для этого вида обратной связи

$$U_{вх1} = U_{вых2} = U_{ос},$$

то коэффициент усиления по напряжению при этом виде обратной связи не изменяется:

$$K_u = K_{uoc} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = const$$

Коэффициент усиления по току при этом виде обратной связи (отрицательной):

$$I_{вх2} = I_{вх1} - I_{ос}$$

$$I_{вх1} = I_{вх2} + I_{ос}$$

и, соответственно,

$$K_{ioc} = \frac{I_{\text{вблх}}}{I_{\text{вх1}}} = \frac{I_{\text{вблх}}}{I_{\text{вх2}} + I_{oc}}$$

- уменьшается.

При комбинированной по входу ОС составляющая последовательной ОС влияет только на коэффициент усиления по напряжению, а составляющая параллельной ОС – только на коэффициент усиления по току.

Величину  $1 + \dot{\beta} \cdot \dot{K}_u$  называют глубиной обратной связи, а величину  $\dot{\beta} \cdot \dot{K}_u$  называют петлевым усилением. Если глубина обратной связи достаточно велика, то  $|1 + \dot{\beta} \cdot \dot{K}_u| \gg 1$

и

$$\dot{K}_{uoc} = \frac{1}{\dot{\beta}}$$

Отсюда можно сделать следующий очень важный вывод: если глубина отрицательной обратной связи достаточно велика, то коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью  $K_{uoc}$ , зависит только от свойств цепи обратной связи и не зависит от свойств цепи прямой передачи.

### 18.3. Стабильность коэффициента усиления при обратной связи

Как было показано выше, коэффициент усиления усилителя, охваченного отрицательной обратной связью, одно-

$$\dot{K}_{uoc} = \frac{\dot{K}_u}{1 + \dot{\beta} \cdot \dot{K}_u}$$

Пусть коэффициенты  $\dot{K}_u$  и  $\dot{\beta}$  являются вещественными. Тогда и коэффициент  $\dot{K}_{uoc}$  - вещественный. Будем для этого случая использовать обозначения  $K_u$ ,  $\beta$  и  $K_{uoc}$ . Пусть в некотором частотном диапазоне коэффициент  $K_u$  изменяется в пределах от 10000 до 1000 (на 90% по отношению к значению 10000), а коэффициент  $\beta$  является постоянным,  $\beta = 0,1$ .

Тогда в соответствии с формулой для  $K_{uoc}$  окажется, что  $K_{uoc}$  будет изменяться в пределах от 9,99 до 9,9 (примерно на 1%). Таким образом, изменение коэффициента усиления после введения отрицательной обратной связи станет значительно меньшим.

Важно уяснить, что если все же необходимо повысить коэффициент усиления до 10000, то и в этом случае использование отрицательной обратной связи значительно улучшит стабильность.

Пусть для получения большого коэффициента усиления использованы четыре включенных последовательно описанных усилителя, охваченных отрицательной обратной связью.

Тогда в рассматриваемом диапазоне частот общий коэффициент усиления будет изменяться в пределах от 9960 ( $9,99 \cdot 9,99 \cdot 9,99 \cdot 9,99$ ) до 9606 ( $9,9 \cdot 9,9 \cdot 9,9 \cdot 9,9$ ). Изменение составит  $3,6\% \left( \frac{9960 - 9606}{9960} \cdot 100\% \right)$ .

Это, очевидно, значительно меньше 90% .

## 18.4. Влияние отрицательной обратной связи на входные и выходные сопротивления

### 18.4.1. Влияние отрицательной обратной связи на входное сопротивление

Обратимся к структурной схеме усилителя с последовательной отрицательной обратной связью по напряжению (рис.18-12):

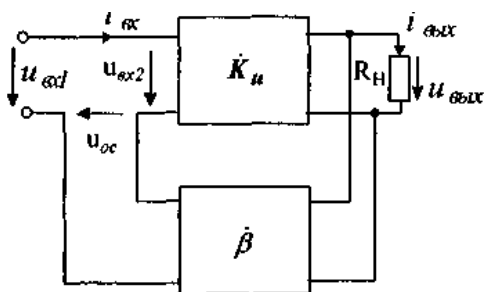


рис. 18-12

Обозначим через  $Z_{BX}$  входное комплексное сопротивление цепи прямой передачи:

$$\dot{Z}_{ex} = \frac{\dot{U}_{ex2}}{\dot{I}_{ex}}$$

где  $\dot{I}_{ex}$  - комплексное действующее значение тока  $i_{вх}$ .

Найдем входное комплексное сопротивление усилителя  $\dot{Z}_{exoc}$ , охваченного обратной связью:

$$\dot{Z}_{exoc} = \frac{\dot{U}_{ex1}}{\dot{I}_{ex}}$$



Получим

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{\text{вхос}} &= \frac{\dot{U}_{\text{вх1}}}{\dot{I}_{\text{вх}}} = \frac{\dot{U}_{\text{вх2}} + \dot{U}_{\text{ос}}}{\dot{I}_{\text{вх}}} = \frac{\dot{U}_{\text{вх2}} + \dot{U}_{\text{вх}} \cdot \dot{\beta}}{\dot{I}_{\text{вх}}} = \\ &= \frac{\dot{U}_{\text{вх2}} + \dot{U}_{\text{вх2}} \cdot \dot{K}_U \cdot \dot{\beta}}{\dot{I}_{\text{вх}}} = \frac{\dot{U}_{\text{вх2}}}{\dot{I}_{\text{вх}}} \cdot (1 + \dot{K}_U \cdot \dot{\beta}) = \dot{Z}_{\text{вх}} \cdot (1 + \dot{K}_U \cdot \dot{\beta})\end{aligned}$$

Таким образом,

$$\dot{Z}_{\text{вхос}} = \dot{Z}_{\text{вх}} \cdot (1 + \dot{K}_U \cdot \dot{\beta})$$

Пусть коэффициенты  $\dot{K}_u$  и  $\dot{\beta}$  являются вещественными.

Тогда

$$Z_{\text{вхос}} = Z_{\text{вх}} \cdot (1 + K_U \cdot \beta)$$

Отсюда следует, что последовательная отрицательная обратная связь увеличивает входное сопротивление по модулю.

Подобные рассуждения показывают, что при параллельной отрицательной обратной связи при сохранении  $\dot{U}_{\text{вх1}} = \text{const}$  входной ток увеличивается на величину тока обратной связи, что приводит к уменьшению входного сопротивления:

$$Z_{\text{вхос}} = \frac{Z_{\text{вх}}}{1 + K_U \cdot \beta}$$

При этом изменения входного сопротивления не зависят от способа получения обратной связи на выходе усилителя.

#### 18.4.2. Влияние отрицательной обратной связи на выходное сопротивление

Определим выходное сопротивление усилителя, охваченного обратной связью. Обозначим через  $\dot{Z}_{\text{вых}}$  и  $\dot{Z}_{\text{выхос}}$ , соответственно, выходное комплексное сопротивление цепи прямой передачи и выходное комплексное сопротивление усилителя, охваченного обратной связью по напряжению (рис.18-12).

По определению

$$\dot{Z}_{\text{вых}} = - \frac{\Delta \dot{U}_{\text{вых}}}{\Delta \dot{I}_{\text{вых}}}$$

где  $\Delta \dot{U}_{\text{вых}}$  и  $\Delta \dot{I}_{\text{вых}}$  — приращения комплексных действующих значений соответственно напряжения  $u_{\text{вых}}$  и тока  $i_{\text{вых}}$ . При этом предполагается, что обратная связь отключена (например, выход цепи обратной связи закорочен).

Также предполагается, что  $\dot{U}_{\text{эс1}} = \text{const}$ , а изменение величин  $u_{\text{вых}}$  и  $i_{\text{вых}}$  вызвано изменением сопротивления нагрузки.

По определению

$$\dot{Z}_{\text{выхос}} = - \frac{\Delta \dot{U}_{\text{вых}}}{\Delta \dot{I}_{\text{вых}}}$$

Но при этом предполагается, что обратная связь действует и что  $\dot{U}_{\text{эс1}} = \text{const}$ . В этом случае причиной возникновения

$$\dot{Z}_{\text{вых}}$$

приращения  $\Delta \dot{U}_{\text{вых}}$  является не только падение напряжения на выходном сопротивлении, но и появление приращения  $\Delta \dot{U}_{\text{ос}}$  комплексного действующего значения напряжения  $U_{\text{ос}}$ .

Следовательно,

$$\Delta \dot{U}_{\text{вых}} = -\Delta \dot{I}_{\text{вых}} \cdot \dot{Z}_{\text{вых}} - \Delta \dot{U}_{\text{ос}} \cdot \dot{K}_U$$

Знаки «минус» использованы потому, что и увеличение тока  $I_{\text{вых}}$  и увеличение напряжения  $U_{\text{ос}}$  вызывают уменьшение напряжения  $U_{\text{вых}}$ . Отсюда с учетом, что  $\Delta \dot{U}_{\text{ос}} = \Delta \dot{U}_{\text{вых}} \cdot \dot{\beta}$ , получим

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{вых}} &= -\Delta \dot{I}_{\text{вых}} \cdot \dot{Z}_{\text{вых}} - \Delta \dot{U}_{\text{вых}} \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{K}_U \\ \Delta \dot{U}_{\text{вых}} &= -\Delta \dot{I}_{\text{вых}} \cdot \frac{\dot{Z}_{\text{вых}}}{1 + \dot{\beta} \cdot \dot{K}_U} \end{aligned}$$

В соответствии с этим

$$\dot{Z}_{\text{выхос}} = -\frac{\Delta \dot{U}_{\text{вых}}}{\Delta \dot{I}_{\text{вых}}} = \frac{\dot{Z}_{\text{вых}}}{1 + \dot{\beta} \cdot \dot{K}_U}$$

Пусть коэффициенты  $\dot{K}_u$  и  $\dot{\beta}$  являются вещественными.

Тогда,

$$Z_{\text{выхос}} = \frac{Z_{\text{вых}}}{1 + \beta \cdot K_U}$$

т.е. отрицательная обратная связь по напряжению уменьшает выходное сопротивление усилителя  $/1/$ .

Отрицательная обратная связь по напряжению поддерживает стабильным выходное напряжение, делая его независимым от сопротивления нагрузки, что эквивалентно уменьшению выходного сопротивления усилителя.

Подобные рассуждения показывают, что отрицательная обратная связь по току поддерживает стабильным выходной ток, что эквивалентно увеличению выходного сопротивления усилителя:

$$Z_{\text{выхОС}} = Z_{\text{вых}} \cdot (1 + K_U \cdot \beta)$$

При этом изменения выходного сопротивления не зависят от способа введения обратной связи на входе усилителя.

#### **18.4.3. Общий метод определения влияния ООС на входные и выходные сопротивления по формуле Блекмана**

Как было отмечено выше величину

$$1 + \dot{\beta} \cdot \dot{K}_u$$

называют глубиной обратной связи и часто обозначают символом F:

$$F = 1 + \dot{\beta} \cdot \dot{K}_u$$

где  $\dot{\beta}$  - комплексный коэффициент обратной связи (рис.3-10):

$$\dot{\beta} = \frac{\dot{U}_{oc}}{\dot{U}}$$

Влияние ООС на входные и выходные сопротивления легко определять по формуле Блекмана:

$$Z_F = Z \cdot \frac{F_{кз}}{F_{хх}},$$

где  $Z_F$  и  $Z$  - сопротивления (входные или выходные) при наличии или отсутствии обратной связи, а  $F_{кз}$  и  $F_{хх}$  - глубина обратной связи при замкнутой или разомкнутой цепи, соответственно.

Рассмотрим применение формулы Блекмана на примере последовательной ООС по напряжению (рис.18-10).

Выходная цепь: при коротком замыкании нагрузки напряжение на выходе усилителя и напряжение ООС отсутствуют и  $F_{к.з.} = 1$ , так как  $\dot{\beta} = 0$ . При х.х. («обрыв» нагрузки) напряжение на выходе усилителя и напряжение ООС сохраняются и величина обратной связи равна  $F_{х.х.}$ .

Тогда по формуле Блекмана:

$$z_{ВЫХF} = z_{ВЫХ} \frac{1}{F_{ХХ}},$$

т.е. выходное сопротивление усилителя при отрицательной обратной связи по напряжению уменьшается, как это и было показано выше с помощью математических соотношений.

Входная цепь: при к.з. источника сигнала ООС на входе усилителя сохраняется и равна величине  $F_{кз}$ ; при х.х. по входу («обрыв» цепи источника сигнала) и напряжение сигнала и напряжение ООС на входе усилителя отсутствуют, и так как при этом  $\dot{\beta} = 0$ , то  $F_{х.х.} = 1$ .

Тогда по формуле Блекмана:

$$z_{ВХF} = z_{ВХ} \cdot F_{кз},$$

т.е. при последовательной отрицательной обратной связи входное сопротивление увеличивается, как и было показано выше.

### 18.5. Влияние ОС на амплитудно-, фазочастотные и переходные характеристики (линейные искажения)

#### 18.5.1. Частотно-независимая ОС

Типичные АЧХ и ФЧХ усилителей показаны на рис.18-13 и 18-14:

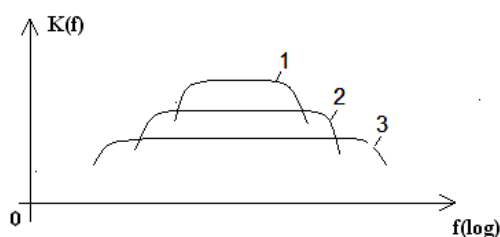


рис. 18-13

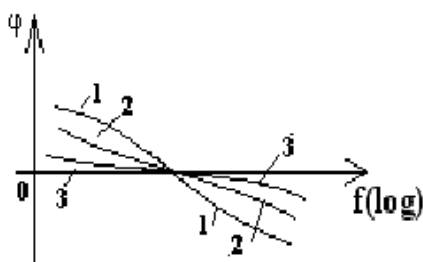


рис. 18-14

1 – с положительной ОС – самая нелинейная АЧХ и ФЧХ;

2 – без ОС;

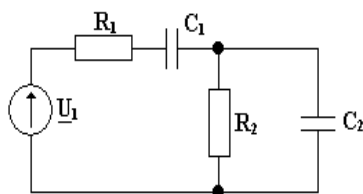
3 – с отрицательной ОС – самая линейная АЧХ и ФЧХ.

Т.е. ООС – расширяет полосу пропускания усилителя,

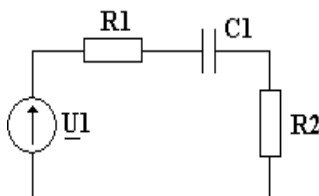
делая его АЧХ более равномерной, а ФЧХ – более линейной.

Количественно эти утверждения можно оценить следующим образом.

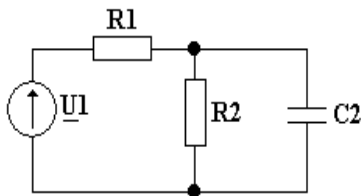
Усилительный каскад может быть представлен общей упрощенной эквивалентной схемой (рис.18-15 а) и эквивалентными схемами на НЧ (рис.18-15 б) и на ВЧ (рис. 18-15 в):



а)



б)



в)

рис.18-15

Полагая, что  $C_2 \ll C_1$ ;  $R_1 \ll R_2$ , на НЧ – пренебрегаем  $C_2$ , так как  $\frac{1}{\omega \cdot C_2} \gg R_2$  - рис.18-15 б); На ВЧ – пренебрегаем  $C_1$  так как  $\frac{1}{\omega C_1} \ll R_1$  - рис. 18-15 в)

Общее выражение для коэффициента усиления с ОС:

$$K_F(j\omega) = \frac{K(j\omega)}{1 + \beta(j\omega)K(j\omega)} ;$$

Для усилителя без ОС:

$$K(j\omega) = \frac{K}{(1 + j\omega\tau_B)}$$

где  $\tau_B = RC$  - постоянная времени усилительного каскада на ВЧ;

Подставляя  $K(j\omega)$  (без ОС) в формулу  $K_F(j\omega)$ , получаем:

$$K_F(j\omega) = \frac{K/(1 + \beta \cdot K)}{1 + j\omega\tau_B/(1 + \beta \cdot K)} ,$$

т.е. постоянная времени  $\tau_B$  усилителя с ОС уменьшилась в  $F$  раз; следовательно, верхняя граничная частота усиления

$$\omega_{BF} = \omega_B \cdot (1 + \beta K)$$

- увеличилась в  $F$  раз.

Аналогично показывается расширение частотного диапазона в области НЧ. По аналогии можно показать, что  $\varphi_F = \varphi / F$  - т.е. фазовый сдвиг по абсолютной вели-



чине уменьшается в  $F$  раз при ООС и увеличивается при ПОС, а АЧХ – более нелинейная при ПОС.

Так как ООС уменьшает амплитудно-частотные и фазочастотные искажения, то она уменьшает и связанные с ними переходные искажения.

Так как ООС расширяет полосу как в сторону  $f_n$ , так в сторону  $f_v$ , то ООС будет уменьшать время установления  $t_y$  импульса ( $t_{\text{нарастания}}$ ) и спад его плоской вершины ( $\Delta$ ) – см. рис. 18-16.

Форма ПХ в области малых времен обусловлена эквивалентной схемой для ВЧ.

Форма ПХ в области больших времен обусловлена эквивалентной схемой для НЧ.

Расширение полосы в сторону НЧ эквивалентно увеличению постоянной времени заряда конденсатора  $C_1$  и, соответственно, уменьшению спада  $\Delta$ .

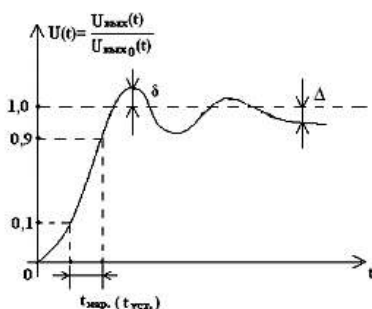


рис.18-16

Расширение полосы в сторону ВЧ эквивалентно уменьшению постоянной времени заряда  $C_2$  и, соответственно, уменьшению  $t_{\text{уст.}}$

### 18.5.2. Частотнозависимая ОС

Частотнозависимая ОС изменяет АЧХ усилителя, делая её обратной АЧХ коэффициента передачи цепи обратной связи (рис.18-17):

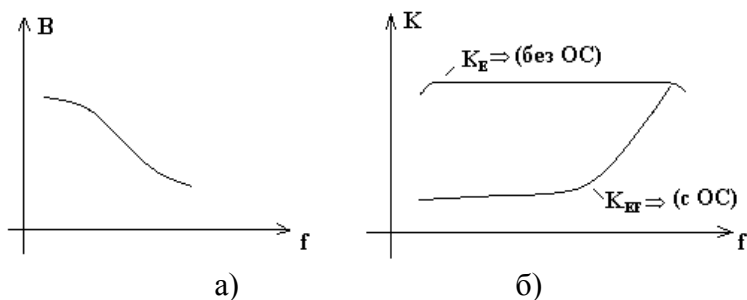


рис.18-17

Например, для схемы передачи ОС через цепь  $RC$  с увеличением частоты сопротивление  $X_c = 1/\omega C$  падает, и коэффициент обратной связи  $\beta$  уменьшается (см. рис.3-17 а).

Если усилитель без ОС имел горизонтальную АЧХ, то с ООС он будет иметь вид, показанный на рис.3-17 б), т.е. с ростом частоты величина ОС падает и коэффициент усиления  $K_F$  растет.

Существует большое количество цепей коррективки АЧХ за счёт частотно-зависимой ООС – примеры приведены ниже на рис 3-18.

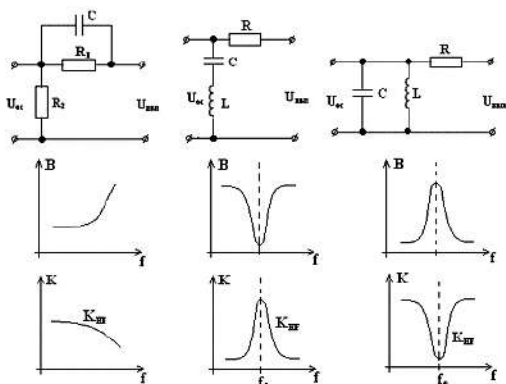


рис.3-18

### 18.6. Влияние ОС на нелинейные искажения, помехи и динамический диапазон

Можно показать, что при наличии ООС уменьшение помех на выходе усилителя определяется:

$$U_{2ПФ} = \frac{U_{2П}}{1 + \beta \cdot K_E} = \frac{U_{2П}}{F}.$$

Но так как ООС одинаково ослабляет и помеху и сигнал, то отношение  $U_{\text{с}}/U_{\text{п}}$  - не изменится. Введение ООС позволяет уменьшить нелинейные искажения. Физически это объясняется тем, что гармонические составляющие по цепи ОС попадают на вход в противофазе. Это значит, что при том же самом сигнале на входе уровень гармонических составляющих на выходе определяется:

$$K_{IF} \cong \frac{K_{\Gamma}}{(1 + \beta \cdot K_F)} = \frac{K_{\Gamma}}{F}.$$

Это очень важно для усилительных устройств многоканальной связи. Глубина F может составлять 60 – 70 дБ.

Снижение уровня помех и повышение линейности способствует расширению динамического диапазона

$$D = \frac{U_{BbIX \max}}{U_{BbIX \min}} = \frac{U_{BX \max}}{U_{BX \min}}$$

в пределах линейного участка амплитудной характеристики ( $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ ).

Так как напряжение помехи (как и сигнала) с выхода усилителя поступает на вход по цепи обратной связи в противофазе с основным сигналом (и помехой), то в результате произойдет ослабление помехи (при этом соотношение сигнал/помеха не изменится!)

### 18.7. Устойчивость усилителей с ОС. Критерии устойчивости. Запасы устойчивости

Как видно из гибридной схемы (рис.3-6) усилитель и цепь ОС составляют замкнутое кольцо, которое принято называть петлей обратной связи.

Для замкнутой цепи ОС, как было уже показано, имеются количественные характеристики величины обратной связи (рис.3-10):

- глубина обратной связи (отрицательной)

$$F = 1 + \dot{\beta} \cdot \dot{K}_u$$

- и комплексный коэффициент обратной связи  $\dot{\beta} = \frac{\dot{U}_{oc}}{\dot{U}}$

Для количественной оценки характеристик петли обратной связи применяются показатели:

- коэффициент петлевого усиления  $K_{\Pi} = \beta \cdot K_u$

- и величина возвратного отношения  $T = -K_{\Pi}$ .

При этом глубина ООС:

$$F = 1 + K_{II} = 1 - T$$

Величина возвратного отношения  $\underline{T}$  – комплексная величина, характеризуется модулем  $T$  и аргументом  $\varphi_T$  – фазой обратной связи.

Модуль глубины ОС  $F$  определяется через  $T$  и  $\varphi_T$  (рис.3-19):

$$F = |1 + T \cdot e^{j\varphi_T}| = \sqrt{1 + 2T \cos \varphi_T + T^2}.$$

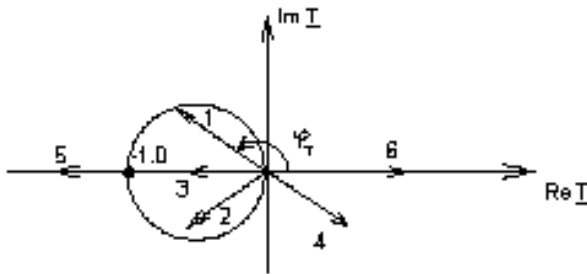


рис.3-19

При  $F = 1$  получаем величину возвратного отношения  $T = -2 \cos \varphi_T$ , зависимость которого от частоты имеет вид окружности с единичным радиусом:

1) любой вектор из начала координат, лежащий на окружности относится к нейтральной ОС (вектор 1), которая влияет лишь на фазу выходного напряжения;

2) при  $F < 1$   $T < -2 \cos \varphi_T$ , т.е. векторы находятся внутри окружности, не соприкасаясь с ней. Это положительная ОС – векторы 2,3;

3) если вектор оказывается вне круга, то ОС – отрицательная (векторы 4,5,6);

4) отдельный случай – расположение векторов на оси вещественных значений  $T$  (при  $\varphi_T = 180^\circ$  и  $\varphi_T = 0^\circ$ ):

- при  $\varphi_T = 180^\circ$  и  $T < 1$ , вектор внутри круга – положительная ОС (вектор 3);
- при  $\varphi_T = 180^\circ$  и  $T > 1$ , то усилитель неустойчив, самовозбуждается, превращаясь в генератор (вектор 5);
- при  $\varphi_T = 0^\circ$  – отрицательная ОС (вектор 6).

Критерий Найквиста: в соответствии с ним усилитель с ОС устойчив, если (рис.3-20) годограф вектора возвратного отношения  $T(jf)$  не охватывает точки с координатами  $(-1,0)$  в области изменения частоты от 0 до  $\infty$ .

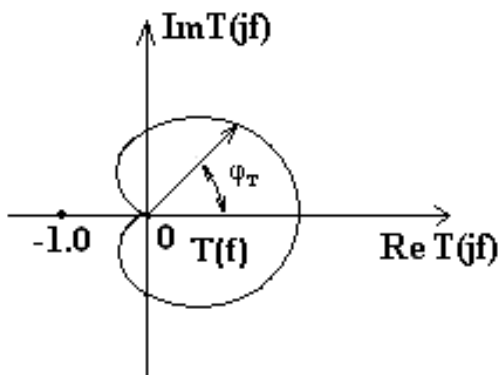


рис.3-20

Годограф – кривая, по которой проходит конец вектора  $T$  при изменении частоты от 0 до  $\infty$ .

На рис. 3-21 показан годограф возвратной разности неустойчивого усилителя. Однако, если уменьшить коэффициент усиления, то  $T(f)$  уменьшится и неустойчивый усилитель станет устойчивым (пунктир.)

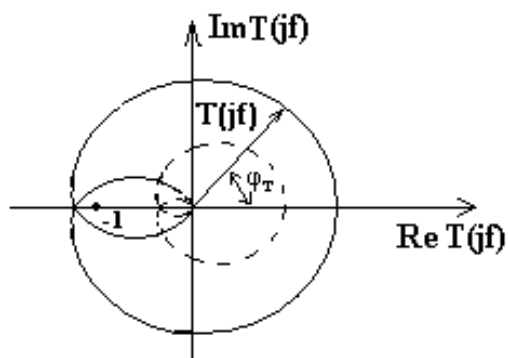


рис.3-21

Условно устойчивый усилитель (рис.3-22): при перегрузках усилителя (сигналом или помехой) критическая точка  $(-1,0)$  может оказаться внутри годографа – наблюдается самовозбуждение (потеря устойчивости).

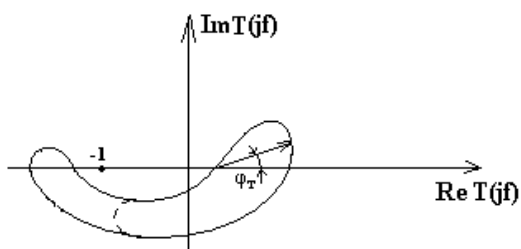


рис.3-22

Чтобы не допустить потери устойчивости делают автоматическую регулировку, изменяя годограф (см. пунктир на рис.3-22).

Запасы устойчивости определяют с помощью годографа (рис.3-23).

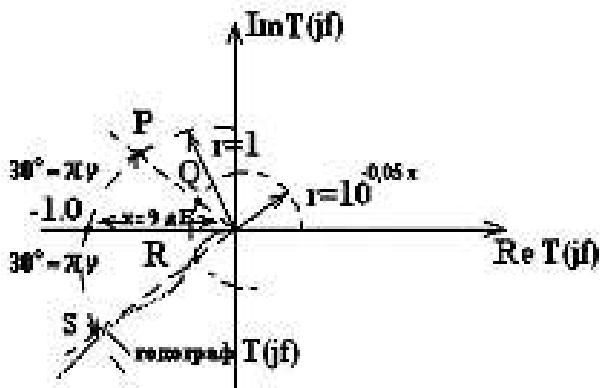


рис.3-23

Для обеспечения устойчивости с запасом, который необходим из-за разброса и непостоянства параметров усилителей и их зависимости от температуры, от изменения напряжения источников питания, от времени и т.д., годограф должен проходить на некотором удалении от точки  $(-1,0)$ ; т.е. должны быть запасы по  $X$  - по модулю  $T$  (в децибелах) и  $Y$  - по аргументу  $\varphi$ : это связано с тем, что фазовый сдвиг является зависимым от соотношений активных и реактивных цепей ( $L$  и  $C$  на ВЧ (выводы, паразитные ёмкости); на НЧ - это блокировочные ёмкости в цепях питания и т.д.).

Годограф вектора  $T(jf)$  должен находится вне области PQRS (рис.3-23): при этом рекомендуемые значения запаса по модулю порядка  $X=9$  дБ и по аргументу  $Y = 1/6 = \pi/6 = 30^\circ$ .

Ниже приведены основные меры по обеспечению устойчивости.

1. Нужны меры по снижению коэффициента петлевого усиления  $K_{\Pi} = \beta \cdot K_u$  на частотах, где фаза обратной связи  $\varphi$  достигает  $180^\circ$ .



Для этого нужно уменьшить число каскадов, охваченных ОС, или охватывать ОС каскады, дающие малые фазовые сдвиги (резисторные).

2. Если есть трансформатор на выходе усилителя, то ОС надо снимать с первичной обмотки, если на входе – то подавать ОС во вторичную обмотку.

При этом будут минимальные сдвиги фазы.

3. Если в усилителе много каскадов с ОС – то желательно общую петлю ОС разделять на несколько.

4. Можно применять корректирующие цепочки, уменьшающих сдвиг фазы петли ОС.

Например (рис.3-24):

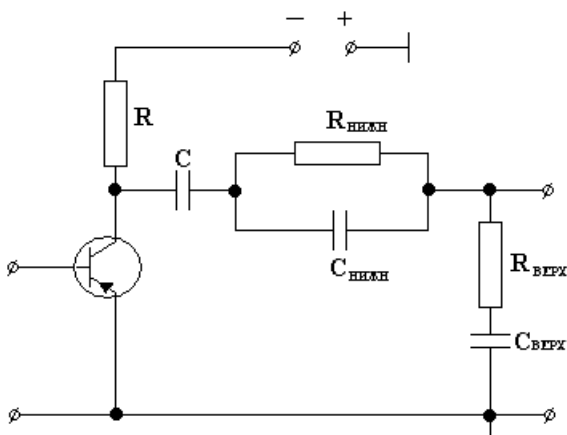


рис.3-24

$R_{Н}C_{Н}$  снижает коэффициент усиления на НЧ и отодвигает фазовый сдвиг в область очень НЧ, устраняя неустойчивость на рабочей частоте.

$R_{В}C_{В}$  аналогично действует в области ВЧ. Их необязательно применять вместе.

## Выводы по теме

1. Влияние ОС на коэффициенты усиления не зависит от способа получения ОС, а определяется только способом введения ОС на вход усилителя.

2. При последовательной ОС сигнал ОС вводится последовательно с напряжением источника сигнала. При этом ток входной цепи, а значит и усиление по току не меняется; происходит сложение напряжений (сигнала и ОС). Если ОС отрицательна, то сигнал ОС вычитается из напряжения источника сигнала и усиление по напряжению уменьшается. При ПОС, соответственно, усиление по напряжению увеличивается.

3. При параллельной ОС сигнал ОС вводится параллельно с напряжением источника сигнала. При этом напряжение на входе и, соответственно, коэффициент усиления по напряжению не меняются. Так как при этом вычитаются токи сигнала и ООС, то уменьшается коэффициент усиления по току. При ПОС, наоборот, усиление по току увеличится.

4. При комбинированной по входу ОС составляющая последовательной ОС влияет только на коэффициент усиления по напряжению, а составляющая параллельной ОС – только на коэффициент усиления по току. При ООС – все коэффициенты, соответственно, уменьшаются, а при ПОС – увеличиваются.

5. Сквозной коэффициент усиления при любом способе введения ОС уменьшается.

6. ООС расширяет полосу пропускания усилителя, делая его АЧХ более равномерной, а ФЧХ – более линейной. Повышается стабильность коэффициента усиления. Снижается уровень помех и уровень нелинейных искажений (при неизменности соотношения  $U_c/U_n$ ).

7. Выходное сопротивление усилителя при отрицательной обратной связи по напряжению уменьшается, а при отрицательной обратной связи по току – увеличивается.
8. Входное сопротивление усилителя при параллельной отрицательной обратной связи уменьшается, а при последовательной – увеличивается.
9. Устойчивость усилителя можно определять по критерию Найквиста - в соответствии с ним усилитель с ОС устойчив, если годограф вектора возвратного отношения  $T(jf)$  не охватывает точки с координатами  $(-1,0)$  в области изменения частоты от 0 до  $\infty$ .

### Контрольные вопросы

1. Что такое «обратная связь» и для чего она используется в усилительных устройствах?
2. Назовите виды обратной связи;
3. Приведите пример реализации ООС параллельной по напряжению;
4. Приведите пример реализации ООС последовательной по току;
5. Приведите пример реализации ООС последовательной по напряжению;
6. Приведите пример реализации ООС параллельной по току;
7. Как влияет последовательная ООС на коэффициенты усиления?
8. Как влияет параллельная ООС на коэффициенты усиления?
9. Как влияет комбинированная ООС на коэффициенты усиления?
10. Как влияет последовательная ООС на входное сопротивление?

11. Как влияет параллельная ООС на входное сопротивление?
12. Как влияет комбинированная ООС на входное сопротивление?
13. Как влияет ООС по току на выходное сопротивление?
14. Как влияет ООС по напряжению на выходное сопротивление?
15. Как влияет комбинированная ООС на выходное сопротивление?
16. Приведите формулу Блекмана и пример ее применения;
17. Как влияет ООС на стабильность усиления? Приведите примеры.
18. Как влияет ООС на АЧХ и ФЧХ усилителя?
19. Как влияет ООС величину помех и нелинейные искажения?
20. Приведите примеры схем применения частотнозависимой ОС;
21. Как с помощью критерия Найквиста определить устойчивость усилителя?
22. Назовите основные меры по обеспечению устойчивости усилителя.

## 19. Усилители на биполярных транзисторах

### 19.1. Основные свойства транзисторов, включенных по схемам с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором

Рассмотрим указанные схемы по таким показателям, как коэффициенты передачи по току, напряжению, мощности и способности инвертировать входной сигнал.

#### 19.1.1. Основные свойства транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Для схемы с общим эмиттером (рис.19-1) входной ток  $I_{вх} = I_b$ ; выходной ток  $I_{вых} = I_c$ ;

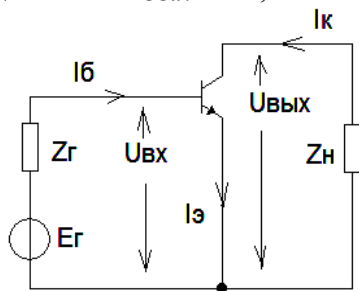


рис.19-1

1) Коэффициент передачи по току:

$$K_{iоэ} = \frac{I_{вых}}{I_{вх}} = \frac{I_c}{I_b} = \beta = h_{21э} \gg 1$$

2) Коэффициент передачи по напряжению

$$K_{иоэ} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{I_{вых} \cdot Z_H}{I_{вх} \cdot Z_{вхоэ}} = K_{иоэ} \cdot \frac{Z_H}{Z_{вхоэ}}$$

Если  $Z_H \approx Z_{вхоэ}$  (одного порядка), то  $K_{иоэ} \gg 1$ , т.е. схема с общим эмиттером является хорошим усилителем как по току, так и по напряжению.

1) Коэффициент передачи по мощности:

$$K_{роэ} = K_{иоэ} \cdot K_{иоэ} \gg 1$$

4) Рассмотрим вопрос инвертирования входного сигнала, для чего представим схему усиления с ОЭ (рис.19-2):

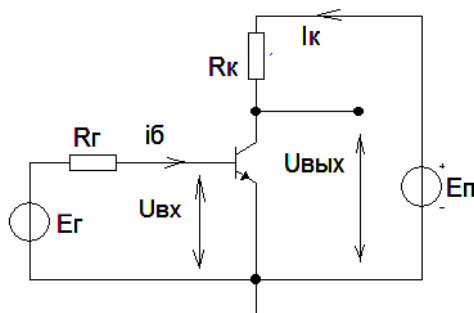


рис.19-2

На рис 19-3 показаны входная, выходная и нагрузочная характеристики для переменного входного и выходного сигналов, из которых видно, что выходное напряжение  $U_k$  находится в противофазе с входным сигналом.

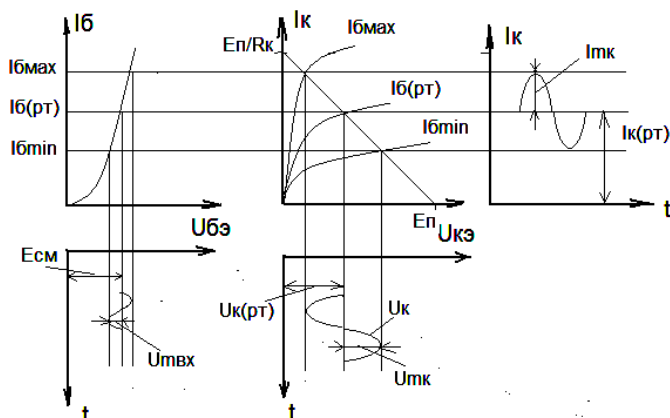


рис 5-3

Для схемы рис.19-2 можно записать:

$$U_{вых} = E_{пит} - I_k \cdot R_k,$$

т.е. изменение выходного напряжения

$$\Delta U_{вых} = -I_k \cdot R_k,$$

что так же подтверждает инвертирующие свойства схемы с общим эмиттером.

### 19.1.2. Основные свойства транзистора, включенного по схеме с общей базой

Для схемы с общей базой (рис.19-4) входной ток  $I_{вх} = I_{э} = I_{б} + I_{к}$ ; выходной ток  $I_{вых} = I_{к}$ ;

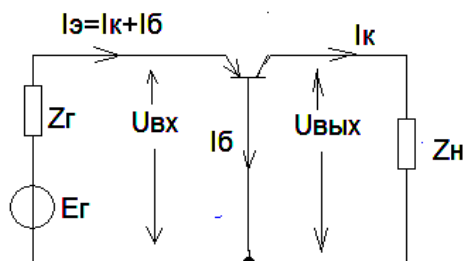


рис.19-4

1) Коэффициент передачи по току:

$$K_{iоб} = \frac{I_{вых}}{I_{вх}} = \frac{I_k}{I_э} = \frac{I_k}{I_б + I_k} = \alpha = h_{21б} \leq 1,$$

т.е. схема с общей базой не усиливает ток.

2) Коэффициент передачи по напряжению:

$$K_{uоб} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{I_k \cdot Z_n}{I_э \cdot Z_{вхоб}} = \frac{I_k \cdot Z_n}{(I_б + I_k) \cdot Z_{вхоб}} = K_{iоб} \cdot \frac{Z_n}{Z_{вхоб}}.$$

Сравним входные сопротивления схем с общим эмиттером и общей базой:

- для схемы с общим эмиттером

$$Z_{вхoэ} = \frac{U_{вх}}{I_б};$$

- для схемы с общей базой

$$Z_{вхоб} = \frac{U_{вх}}{I_б + I_k} \ll Z_{вхoэ}$$

или



$$Z_{вхоб} = \frac{U_{вх}}{I_{б} + I_{к}} = \frac{U_{вх}}{I_{б}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{I_{к}}{I_{б}}\right) + 1} = \frac{Z_{вхоэ}}{1 + h_{21э}}$$

Тогда коэффициент передачи по напряжению

$$K_{иоб} = K_{иоб} \cdot (1 + h_{21э}) \cdot \frac{Z_{н}}{Z_{вхоэ}}.$$

Так как  $K_{иоб} \leq 1$ , а  $Z_{н}$  и  $Z_{вхоэ}$  - одного порядка, то  $K_{иоб} \gg 1$ , т.е. схема с общей базой является хорошим усилителем напряжения.

3) Коэффициент передачи по мощности:

$K_{роб} = K_{иоб} \cdot K_{иоб} \gg 1$ , но меньше, чем для схемы с общим эмиттером.

4) Для оценки инвертирующих свойств схемы с общей базой представим ее в виде рис.19-5:

Как видно из особенности построения схемы с общей базой, она не инвертирует входной сигнал (входной и выходной токи совпадают по фазе).

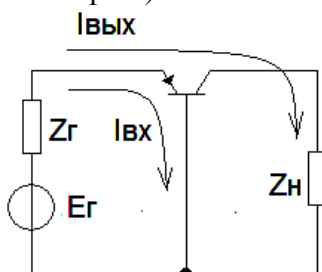


рис.19-5

### 19.1.3. Основные свойства транзистора, включенного по схеме с общим коллектором

Для схемы с общим коллектором (рис.19-6) входной ток  $I_{вх} = I_{б}$ ; выходной ток  $I_{вых} = I_{э} = I_{б} + I_{к}$ ; входное напряжение  $U_{бэ} + U_{вых}$ .

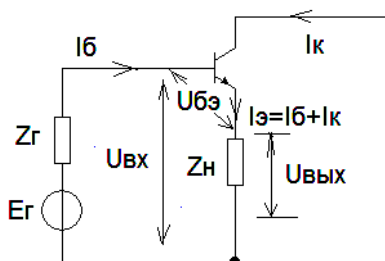


рис.19-6

1) Коэффициент передачи по току:

$$K_{ток} = \frac{I_{вых}}{I_{вх}} = \frac{I_{б} + I_{к}}{I_{б}} = 1 + h_{21э} \gg 1,$$

т.е. схема с общим коллектором является хорошим усилителем тока.

2) Коэффициент передачи по напряжению ( $U_{бэ}$ , как правило, меньше  $U_{вых}$ ):

$$K_{уок} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вых}}{U_{бэ} + U_{вых}} \leq 1,$$

т.е. схема с общим коллектором не усиливает напряжение.

3) Коэффициент передачи по мощности:

$K_{рок} = K_{ток} \cdot K_{уок} \gg 1$ , но меньше, чем для схемы с общим эмиттером.

4) Для оценки инвертирующих свойств схемы с общим коллектором представим ее в виде рис.19-7:

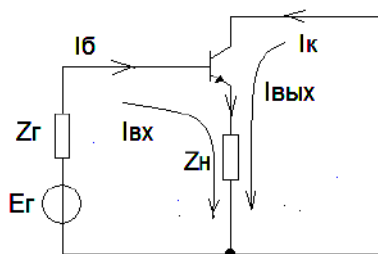


рис.19-7

Как видно из особенности построения схемы с общим коллектором, она не инвертирует входной сигнал (входной и выходной токи совпадают по фазе).

## 19.2. Принцип электронного усиления

Рассмотрим исходное положение при отсутствии сигнала на входе транзистора  $U_{вх} = 0$  (рис.5-8). При этом напряжение на базе равно напряжению смещения  $E_{см}$ , а на коллекторе в рабочей точке (по постоянному току)

$$U_k(pt) = E_{пит} - R_k \cdot I_k(pt)$$

При подаче на вход переменного напряжения

$$U_{вх} = U_{mвх} \cdot \sin \omega t$$

в первый полупериод входное напряжение на базе будет дополнительно открывать транзистор, а во второй полупериод – закрывать.

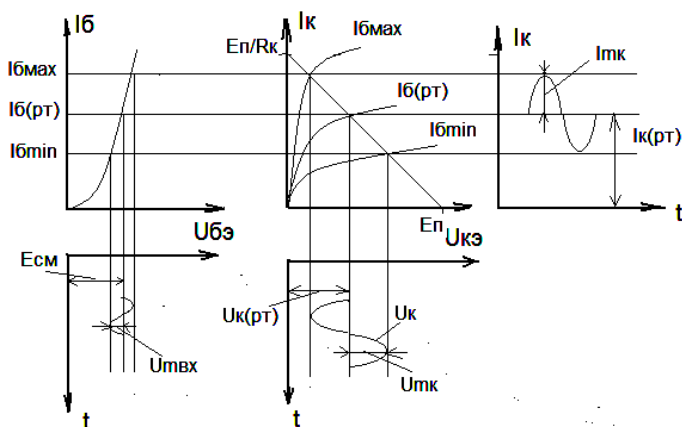


рис. 19-8

В результате ток коллектора будет изменяться:

$$i_k = I_k(pm) + I_{mk} \cdot \sin \omega \cdot t$$

Переменное напряжение на коллекторе:

$$U_{кэ} = U_k(pm) - U_{mk} \cdot \sin \omega \cdot t,$$

где  $U_{mk} = I_{mk} \cdot R_k$  - амплитуда его переменной составляющей.

При достаточно большом  $R_k$  амплитуда  $U_{mk} > U_{mvx}$ , т.е. каскод усиливает по напряжению. Процесс управления током транзистора может быть рассмотрен как результат изменения его внутреннего сопротивления, в результате чего происходит непрерывное перераспределение напряжения источника питания между транзистором и нагрузкой, а управление осуществляется за счёт изменения

### 19.3 Режимы работы усилительных элементов

**Режим А** (рис.19-9) характеризуется тем, что рабочая точка **А** выбирается на линейном участке характеристики при сравнительно большом токе.

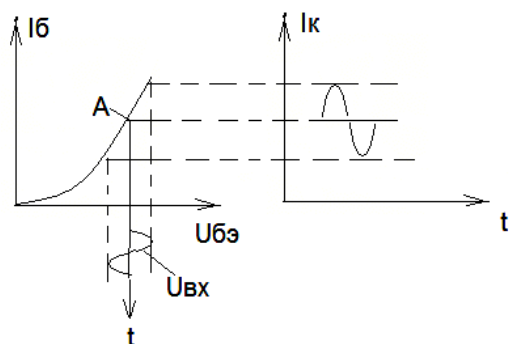


рис. 19-9

Ток коллектора не прерывается в течение всего периода входного колебания. В этом режиме обеспечиваются минимальные нелинейные искажения. Данный режим применяется только в каскадах предварительного усиления из-за низкого коэффициента полезного действия. Половина длительности импульса выходного сигнала, выраженная в радианах (или градусах) текущей фазы, называется углом отсечки  $\Theta$ . Для данного режима  $\Theta = 180^\circ$ .

**Режим В.** Рабочая точка совмещается с началом входной характеристики (точка 0, рис.19-10).

В отсутствие сигнала  $I_k = 0$ , что делает режим покоя экономичным. Ток  $I_k$  протекает в течение положительной половины каждого периода входного сигнала.

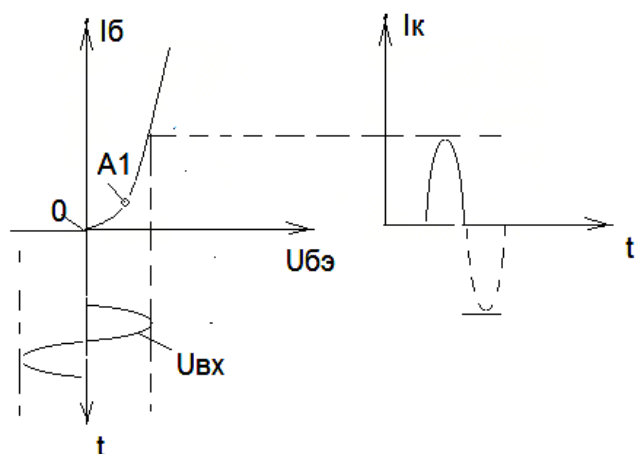


рис.19-10

Вторая полуволна не пропускается данным транзистором. Для ее усиления ставится другой транзистор - получается двухтактный усилитель. Для данного режима  $\Theta = 90^\circ$ .

В режиме В получается высокий КПД.

Однако из-за кривизны начального участка появляются искажения выходного тока. Из-за прерывистости тока возникают дополнительные искажения, обусловленные переходными процессами.

**Режим АВ.** Рабочая точка  $A_1$  устанавливается примерно по середине криволинейного участка входной характеристики (рис. 19-10). В результате импульсы выходного тока оказываются шире половины периода и угол отсечки  $\Theta > 90^\circ$ . Этот режим - основной для двухтактных каскадов. Здесь потребляется некоторый ток покоя, но КПД несколько ниже, чем в режиме В. Преимущество - лучшая линейность (меньше искажений).

**Режим С.** Рабочая точка  $A_1$  (рис. 19-11) находится в области запираения;  $\Theta < 90^\circ$ .

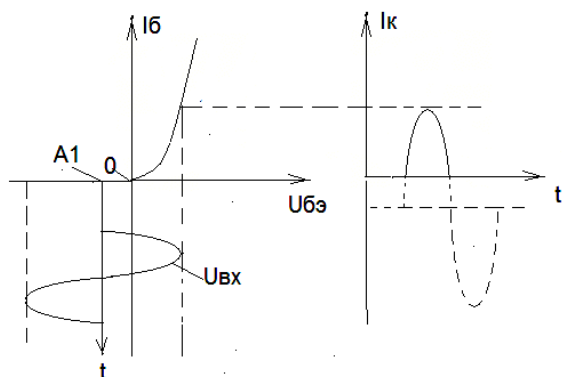


рис.19-11

Этот режим применяется в основном в радиопередающих устройствах и специальных усилителях с повышенным КПД.

**Режим Д** - ключевой режим; его особенность состоит в том, что на вход транзистора подают прямоугольные импульсы большей амплитуды, полностью запирающие или отпирающие транзистор. Последний используется в качестве ключа: или полностью открыт или полностью закрыт. В первом случае напряжение  $U_{КЭ} = 0$ , во втором  $I_K = 0$ , поэтому потери энергии в транзисторе практически отсутствуют.

Режим Д позволяет получить очень высокий КПД. Кроме мощных ключевых усилителей данный режим используется также в цифровых устройствах.

## 19.4. Схемы межкаскадных связей

Обычно усилители - многокаскадные, так как один каскад не обеспечивает требуемого коэффициента усиления. Простейший вид межкаскадной связи - **непосредственная связь (или гальваническая, рис.19-12).**

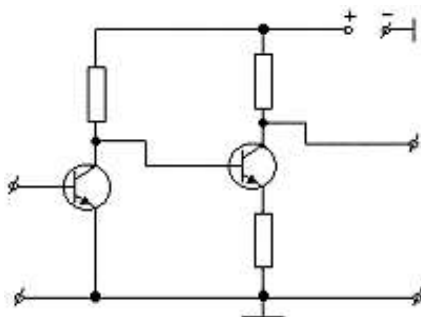


рис.19-12

Её достоинство – предельная простота, широкополосность, возможность передачи постоянных напряжений. Её недостаток – передача медленных изменений, т.е. сказывается нестабильность питающих напряжений, которая усиливается следующим каскадом; непосредственная связь используется в УПТ, в интегральных микросхемах.

**Резистивно-емкостная связь:** через резистор  $R_2$  и конденсатор  $C_2$  (рис.19-13).

Конденсаторы  $C_2$  и  $C_3$  разделяют по постоянному току один каскад от другого, благодаря чему режим транзистора  $T_2$  не зависит от режима транзистора  $T_1$ .



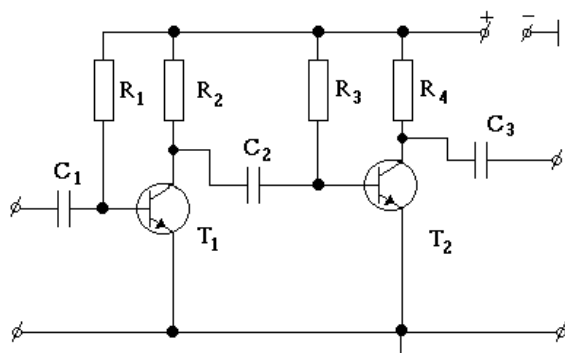


рис. 19-13

Схема проста, широкополосная. Каскад с резистором  $R_2$  в цепи выходного электрода называется резисторным. Недосток - наличие габаритных конденсаторов  $C_2$ , что является ограничением в применении для интегральных микросхем.

**Дроссельно-конденсаторная связь.** Вместо резистора  $R_2$  устанавливается дроссель. Полоса частот значительно сужается из-за наличия собственной ёмкости дросселя и снижения сопротивления дросселя  $X_{Lop} = \omega \cdot L_{op}$  на низких частотах.

Достоинство – высокий КПД каскада.

Недосток – узкая полоса, большие габариты, чувствительность к магнитным наводкам. Большая масса и размеры усилителя.

**Трансформаторная связь** (рис.19-14).

Резистор  $R_1$  задает смещение на  $T_2$ ; конденсатор  $C_1$  – для связи по переменному току с эмиттером  $T_2$ . Трансформатор обеспечивает развязку каскадов по постоянному току.

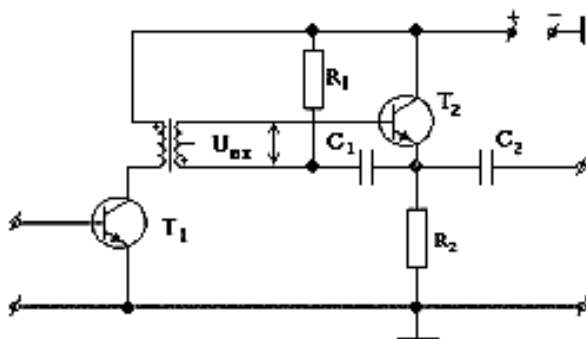


рис.19-14

Выбором коэффициента трансформации обеспечивается оптимальная (по мощности или по напряжению) нагрузка транзистора  $T_1$ .

Трансформаторный каскад имеет хороший КПД. Недостатки - большие размеры, масса, неширокая полоса пропускания, высокая чувствительность к наводкам магнитных полей. Большие фазовые сдвиги на ВЧ.

### 19.5. Динамические и нагрузочные характеристики

Динамическая характеристика – связь между мгновенными значениями тока и напряжения при наличии нагрузки  $R_H$ .

По ней выбирают рабочую точку, определяют выходную мощность  $P_{\text{вых}}$ , КПД, нелинейные искажения.

Для схемы (рис.19-15) постоянное напряжение на кол-

лекторе  $U_K = E_{\text{пит}} - i_K \cdot R_K$  - это формула нагрузочной характеристики или линии нагрузки для постоянного тока.

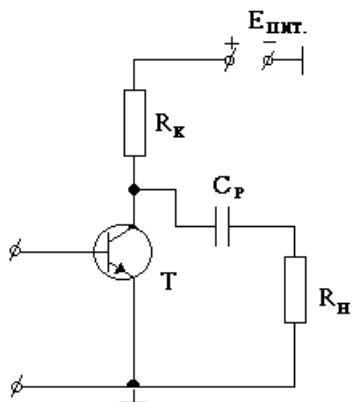


рис.19-15

Линия нагрузки по постоянному току представлена на рис.19-16 – это линия ВС, с точками  $E_{ПНТ}/R_K$  и  $E_{ПНТ}$  по осям координат.

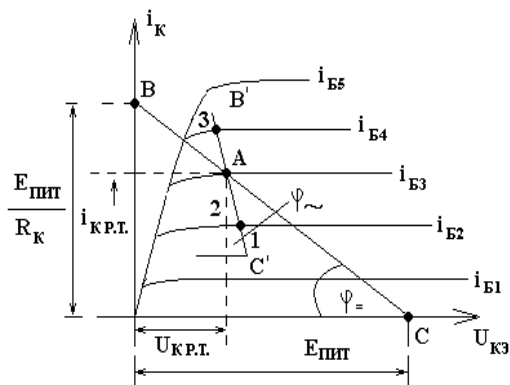


рис.19-16

Угол наклона её  $\text{tg}\varphi = (-1/R_K)$ . Однако проще строить её по указанным точкам В и С.

Задавая смещение, устанавливают рабочую точку А на прямой ВС. Её координаты:

$$I_{K(P.T.)} \text{ и } U_{K(P.T.)} = E_{\text{ПИТ}} - R_K I_{K(P.T.)}.$$

Для переменной составляющей линия нагрузки будет другой. Так как сопротивление разделительного конденсатора  $C_p$  выбирается  $X_{C_p} = \frac{1}{\omega \cdot C_p} \approx 0$ , то для переменной составляющей коллекторного тока сопротивления  $R_K$  и  $R_H$  соединены параллельно и составляют

$$R_{H\text{транз.}} = R_K \parallel R_H$$

При мгновенном изменении  $\Delta i_K$  напряжение на коллекторе уменьшится на величину

$$\Delta U_{KЭ} = -\Delta i_K \cdot R_{H\text{транз.}}$$

- это уравнение нагрузки для переменного тока.  
Угол её наклона:

$$\text{tg } \varphi \sim (-1/R_{H\text{транз.}}).$$

С помощью линий нагрузок определяют рабочую точку,  $i_{k\text{max}}$ ,  $U_{k\text{max}}$  и т.д. Если  $R_H$  чисто активное, то линия нагрузки – прямая В'С'.

### 19.6. Резисторный апериодический предварительный усилитель напряжения

Предварительный усилитель (ПУ) предназначен для усиления сигналов до уровня, достаточного для управления оконечным или предоконечным каскадом. В ПУ

уровни сигналов малы, и параметры транзисторов можно считать постоянными, а нелинейные искажения очень малыми.

Принципиальные (полные) схемы приведены на рис.19-17: а) - схема с общим эмиттером и б) – схема с общей базой.

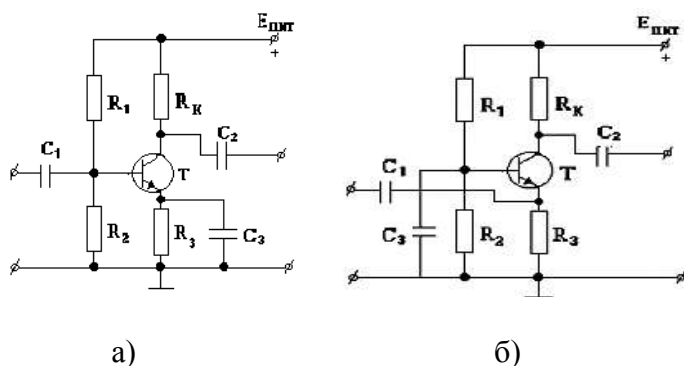


рис.19-17

По постоянному току – схемы одинаковы: они построены по схеме с эмиттерной стабилизацией. По переменному току в первой схеме эмиттер «закорочен» конденсатором  $C_3$ , а входное напряжение подаётся на базу через конденсатор  $C_1$ . Во второй схеме блокировочный конденсатор  $C_3$  «закорачивает» на землю базу, а входное напряжение подаётся через конденсатор  $C_1$  на  $R_3$  в цепь эмиттера.

Выходное напряжение снимается через конденсатор  $C_2$ . Каскад с ОЭ – инвертирующий Каскад с ОБ – не даёт усиления по току.

### 19.6.1. АЧХ резисторного каскада на биполярном транзисторе

Для упрощения по рис.19-17 а):

1) не принимаем во внимание блокировочные конденсаторы  $C_1$  и  $C_3$ , так как

$$X_{c1} = X_{c3} = \frac{1}{\omega \cdot C_3} \approx 0$$

2) нагрузка - только  $R_H C_H$  (включая ёмкость монтажа). Тогда упрощенная схема будет иметь вид (рис.19-18):

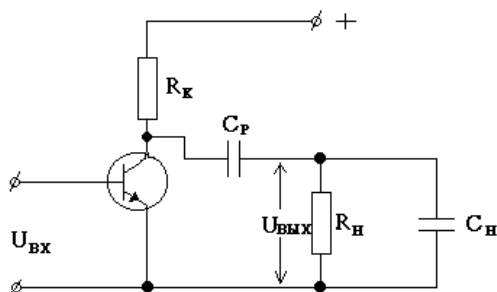


рис. 19-18

#### а) область верхних частот:

Заменяем транзистор эквивалентным двухполюсником (рис.19-19):

Здесь:  $R_{HT} = R_K \parallel R_H$ ;  $X_{C_P} = \frac{1}{\omega \cdot C_P} \approx 0$ .

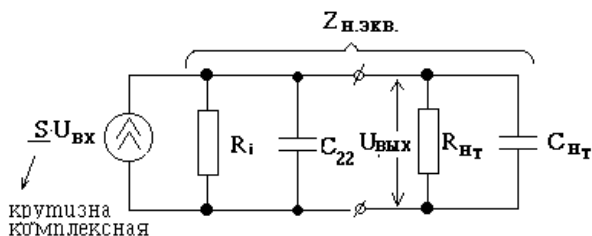


рис. 19-19

Обозначим:

$$\begin{cases} R_{H.ЭКВ.} = R_i \parallel R_{HT} \\ C_{H.ЭКВ.} = C_H + C_{22} \end{cases}$$

$C_{22}$  – выходная ёмкость транзистора

$$C_{22} = C_K \cdot (1 + K_0)$$

$$C_{22} \Big|_{R_F=0} = C_K \cdot (1 + S \cdot r_\delta)$$

$$C_{22} \Big|_{R_F=\infty} = C_K \cdot (1 + \beta)$$

Тогда

$$z_{H.ЭКВ.} = \frac{R_{H.ЭКВ.}}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau_{H.ЭКВ.}},$$

где  $\tau_{H.ЭКВ.} = R_{H.ЭКВ.} \cdot C_{H.ЭКВ.}$  – постоянная времени цепи нагрузки генератора на эквивалентной схеме.

Кроме того, учтём крутизну транзистора:

$$\underline{S} = \frac{S_0}{1 + j\omega \cdot \tau_S},$$

где  $S_0$  – значение крутизны на низкой частоте,  $\tau_S$  – постоянная времени крутизны.

Тогда нормированный комплексный коэффициент передачи на ВЧ:

$$\underline{y}_e = \frac{K_e}{K_0} = \frac{1}{(1 + j\omega \cdot \tau_S) \cdot (1 + j\omega \cdot \tau_{H.ЭКВ.})}$$

где  $K_0 = S_0 R_{H.ЭКВ.}$  – это коэффициент усиления на средних частотах.

Учитывая, что  $\omega^2 \tau_S \tau_{H.ЭКВ.} \ll 1$ ,  
получаем

$$\underline{y}_e \cong \frac{1}{1 + j\omega \cdot \tau_e},$$

где  $\tau_e = \tau_S + \tau_{H.ЭКВ.}$  – постоянная времени каскада на ВЧ.  
Модуль нормированного коэффициента передачи

$$y_e = \frac{K_e}{K_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot \tau_e^2}}$$

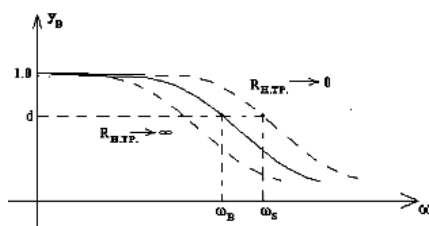


рис. 19-20

Спад характеристики (рис.19-20) обусловлен уменьшением крутизны  $S$  и сопротивления  $Z_{H.ЭКВ.}$  из-за наличия  $S_{H.ЭКВ.}$ .

При уровне отсчёта  $d$  на граничной частоте  $\omega_B$  ( $y_B = d$  на  $\omega = \omega_B$ )



$$\omega_{\theta} = \frac{1}{\tau_{\theta}} \cdot \sqrt{\frac{1}{d^2 - 1}}$$

В частности при  $d = 1/\sqrt{2} = 0.707$

$$\omega_{\theta} = \frac{1}{\tau_{\theta}} \cdot$$

При  $R_{н.т.} \rightarrow 0$ , то в  $\tau_B = \tau_S + \tau_{н.экв.}$  в нуль обращается только  $\tau_{н.экв.}$  и  $\omega_B$  увеличивается до величины

$$\omega_S = \frac{1}{\tau_S}$$

( $\omega_S$  - частота, на которой  $S=0,707S_0$ )

**б) область нижних частот.** Упрощенная схема для рис.19-17 а) остаётся прежней. Однако сопротивлением разделительного конденсатора нельзя пренебрегать, так как оно сильно влияет на частотную характеристику. Поэтому эквивалентная схема для НЧ (рис.19-21):

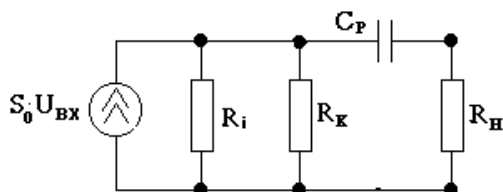


рис. 19-21

Ёмкости  $C_{22}$  и  $C_н$  не учитываются ввиду малости влияния их сопротивлений. Они, (сопротивления) очень

велики и слабо шунтируют нагрузку. Крутизна транзистора на НЧ не является комплексной и равна  $S_0$ . Так как  $C_p$  и  $R_H$  последовательны, то можно представить эквивалентную схему (левая часть тоже последовательна – рис.19-22).

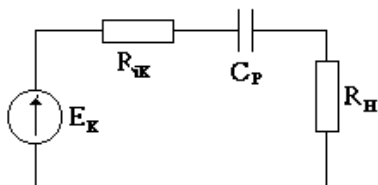


рис. 19-22

где  $R_{iK} = R_i \parallel R_K$ ;  $E_K = S_0 U_{BX} R_{iK}$ .

Тогда комплексный коэффициент передачи на НЧ:

$$\underline{K}_H = \frac{\underline{U}_{B\Delta X}}{\underline{U}_{BX}} = \frac{K_0}{1 + 1/j\omega \cdot \tau_H},$$

где  $K_0 = S_0(R_{iK} \parallel R_H) = S_0 R_{H.ЭКВ.}$  – коэффициент усиления в области средних частот,  $\tau_H = C_p(R_{iK} + R_H)$  – постоянная времени каскада на НЧ.

Нормированная АЧХ или модуль относительного усиления (рис.19-23):

$$y_H = \frac{K_H}{K_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 \tau_H^2}}}$$

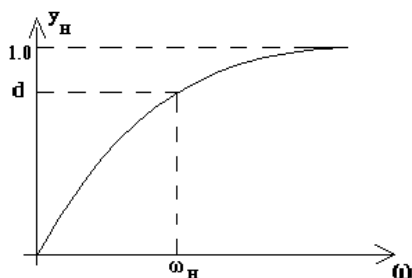


рис.19-23

Спад характеристики в области НЧ (рис.19-23) обусловлен влиянием емкости  $C_p$ . В пределе ( $\omega \rightarrow 0$ ,  $K_H = 0$ ,  $y_H = 0$ ).

Если  $y_H = d$ , то

$$\omega_H = \frac{1}{\tau_H \sqrt{\frac{1}{d^2} - 1}}.$$

В частности при  $d = 0,707$

$$\omega_H = \frac{1}{\tau_H}.$$

Тогда требуемое значение

$$C_p = \frac{1}{\omega_H \cdot (R_{ik} + R_H) \cdot \sqrt{M_H^2 - 1}}$$

где  $M_H = \frac{1}{y_H} = \frac{1}{d}$  - коэффициент частотных искажений

на частоте  $\omega_H$ .

Выражение для АЧХ во всей полосе -  $y = y_H \cdot y_B$   
(рис.19-24):

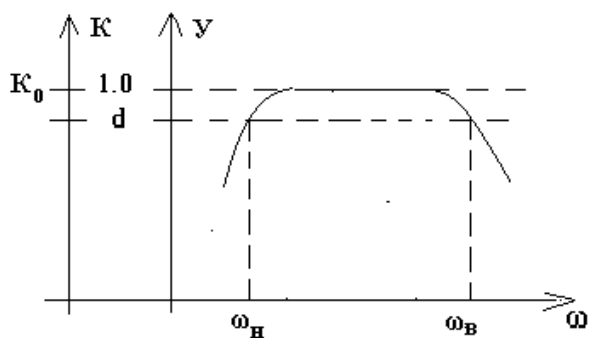


рис.19-24

### 19.6.2. Фазочастотная характеристика резисторного каскада

а) для нижних частот: сдвиг составляет:

$$[\text{из } K_H = \frac{U_{BbIX}}{U_{BX}} = \frac{K_0}{1 + 1/j\omega \cdot \tau_H}]:$$

$$\varphi_H = \arctg(1/\omega \cdot \tau_H)$$

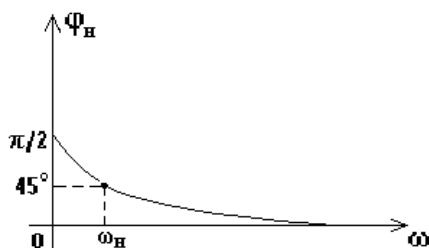


рис.19-25

На нижней граничной частоте  $\omega_H$  (рис.19-25) при стандартном уровне отсчёта  $0,707 \varphi_H = 45^\circ$ .

Увеличение  $\varphi_H$  с уменьшением  $\omega$  обусловлено разделительным конденсатором  $C_P$ , который и обуславливает фазовый сдвиг.

б) для высоких частот:

Приближённая величина  $\varphi_B = -\arctg \omega \tau_B$  - кривая 1 на рис.19-26 (из  $U_B = 1/(1+j\omega\tau_B)$ ).

Отрицательные значения  $\varphi_B$  обусловлены комплексностью крутизны транзистора и сопротивления нагрузки эквивалентного генератора тока.

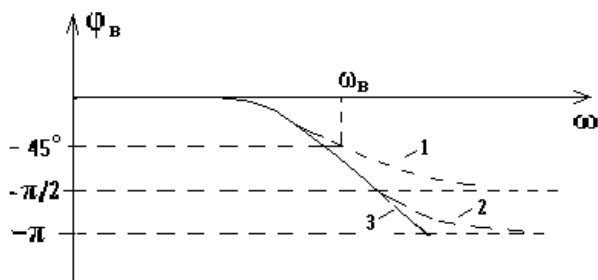


рис. 19-26

Более точная величина  $\varphi_B = -(\arctg \omega t_S + \arctg \omega t_{HЭКВ.})$  для неё – см. кривая 2 на рис.19-26. Предельное значение составляет  $\varphi_{B, \text{ПРЕДЕЛ.}} = 180^\circ$ .

Более точно  $\varphi_S = -\arctg (\omega t_S + m \omega t_\alpha)$ , где  $t_\alpha = 1/\omega_\alpha$  – постоянная времени коэффициента передачи по току транзистора в схеме с ОБ – кривая 3 на рис.19-26. Здесь  $m \approx 0.2 \div 0.8$  (коэффициент Кремера).

Полная ФЧХ (во всем диапазоне) получается суммированием ФЧХ на НЧ и ВЧ.

На верхней граничной частоте  $\omega_B$  значение  $\varphi_B = -45^\circ$ .

## Выводы по теме

1. Процесс усиления транзистора (процесс управления током  $i_k$  транзистора) может быть рассмотрен как результат изменения его внутреннего сопротивления  $R_i$ , в результате чего происходит непрерывное перераспределение напряжения источника между транзистором и нагрузкой, а управление  $R_i$  осуществляется за счёт  $U_{вх}$ .

2. Режим А (рис.19-9) характеризуется тем, что рабочая точка выбирается на линейном участке характеристики при сравнительно большом токе. Для данного режима  $\Theta = 180^\circ$ . В этом режиме обеспечиваются минимальные нелинейные искажения. Данный режим применяется только в каскадах предварительного усиления из-за низкого коэффициента полезного действия.

3. Рабочая точка в режиме В совмещается с началом входной характеристики. Для данного режима  $\Theta = 90^\circ$ . В режиме В получается высокий КПД. Из-за кривизны начального участка появляются искажения выходного тока. Из-за прерывистости тока возникают дополнительные искажения, обусловленные переходными процессами.

4. Режим АВ. Рабочая точка  $A_1$  устанавливается примерно по середине криволинейного участка входной характеристики. Угол отсечки  $\Theta > 90^\circ$ . КПД несколько ниже, чем в режиме В. Преимущество - лучшая линейность (меньше искажений).

5. Режим С. Рабочая точка  $A_1$  находится в области запираания;  $\Theta < 90^\circ$ . Этот режим применяется в основном в радиопередающих устройствах и специальных усилителях с повышенным КПД.

6. Режим Д - ключевой режим; его особенность состоит в том, что на вход транзистора подают прямоугольные импульсы большей амплитуды, полностью запирающие или отпирающие транзистор. Режим Д позволяет получить очень высокий КПД. Кроме мощных ключевых усилителей данный режим используется также в цифровых устройствах.

7. Предварительный усилитель (ПУ) предназначен для усиления сигналов до уровня, достаточного для управления оконечным или предоконечным каскадом. В ПУ уровни сигналов малы, и параметры транзисторов можно считать постоянными, а нелинейные искажения очень малыми.

8. Спад амплитудно-частотной характеристики и увеличение фазовых искажений усилителя в области ВЧ обусловлен уменьшением крутизны  $S$  и сопротивления  $Z_{н.экв.}$  из-за наличия выходной емкости транзистора, емкости нагрузки, включая емкость монтажа.

9. Спад характеристики и увеличение фазовых искажений в области НЧ обусловлен влиянием разделительной емкости  $C_p$ .



## Контрольные вопросы

1. Объясните принцип электронного усиления на биполярном транзисторе.
2. Приведите основные режимы усиления и их особенности.
3. Приведите схему и особенности гальванической (непосредственной) межкаскадной связи.
4. Приведите схему и особенности резистивно-емкостной межкаскадной связи.
5. Приведите схему и особенности дроссельно-конденсаторной межкаскадной связи.
6. Приведите схему и особенности трансформаторной межкаскадной связи.
7. Что такое нагрузочная характеристика по постоянному току? Приведите пример ее построения.
8. Приведите пример построения динамической характеристики усилителя.
9. Чем определяется поведение амплитудно-частотной характеристики усилителя в области низких частот?
10. Чем определяется поведение амплитудно-частотной характеристики усилителя в области высоких частот?
11. Чем определяется поведение фазочастотной характеристики усилителя в области низких частот?
12. Чем определяется поведение фазочастотной характеристики усилителя в области высоких частот?

## 20. Усилители на полевых транзисторах. Коррекция усилителей

Отличительной чертой полевых (униполярных, канальных) транзисторов является высокое входное сопротивление, поэтому они управляются напряжением, а не током (как биполярные транзисторы). Один из важнейших параметров полевого транзистора - крутизна:

$$S = \frac{\partial I_c}{\partial U_3} \text{ (мА/В)}.$$

### 20.1. Особенности анализа каскадов на полевых транзисторах

На рис.20-1 приведена принципиальная схема резисторного каскада с общим истоком (ОИ) на полевом транзисторе с управляющим р-п переходом и каналом п-типа

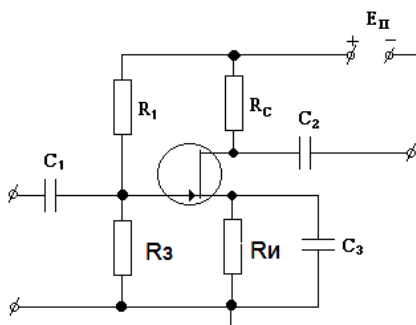


рис.20-1

Стабилизация рабочей точки – истоковая (внешне – не отличается от схемы стабилизации с ОЭ). Для переменного тока сопротивление

$X_{C3} = \frac{1}{\omega \cdot C_3} = 0$ , и упрощенная

схема по постоянному току представляется (рис.20-2):

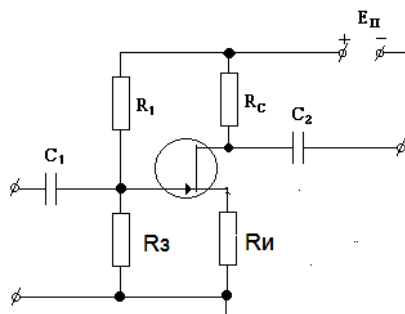


рис. 20-2

Отличие анализа работы усилителя на полевом транзисторе от усилителя на биполярном транзисторе (для АЧХ и ФЧХ):

1. Огромное (десятки МОм) входное сопротивление транзистора; поэтому  $i_{ВХ}$  отсутствует, выходное сопротивление  $R_{ВЫХ}$  не зависит от  $R_{Г}$ .
2. Полевой транзистор на частотах примерно до 100 МГц (иногда выше) можно считать безынерционным усилителем, т.е. постоянная времени крутизны  $\tau_S = 0$ ;  $S = S_0$ . Соответственно  $\phi_S = 0$  и фазовый сдвиг на ВЧ

$$\phi_B = - \arctg \omega \tau_{Н.ЭКВ}.$$

не превышает  $\leq 90^\circ$ . ФЧХ приведена на рис.19-2.

## 20.2. Широкополосные (импульсные) каскады.

### Площадь усиления

а) Широкополосные усилители (ШПУ) отличаются от усилителей звуковой частоты следующими особенностями:

1) в ШПУ требуется усиливать сигналы в очень низкой полосе частот от единиц и десятков Гц до нескольких десятков МГц. Как правило, это – резисторные каскады со специальными корректирующими цепями; такие каскады имеют наилучшие частотные, ФЧХ и ПХ.

2) ШПУ используют как для усиления гармонических каскадов, так и для импульсных сигналов.

3) Для ШПУ используют специальные транзисторы и лампы, имеющие высокую предельную частоту коэффициента передачи, малые входные и выходные ёмкости, большую крутизну характеристики - как правило, полевые транзисторы.

4) Как правило, транзисторы в ШПУ включают по схеме с ОЭ, ОИ (общим истоком).

Как было показано на рис.5-19 и стр. 101 для увеличения полосы (увеличения  $\omega_B$ ) нужно уменьшать  $R_{HT} = R_K \parallel R_H$ . Но с уменьшением  $R_{HT}$  снижается коэффициент усиления (передачи). Малое значение  $u_B$  (коэффициента передачи) невыгодно, так как увеличивается количество каскадов усиления, что приводит к усложнению и удорожанию.

б) Импульсные усилители должны воспроизводить форму сигнала с минимальными искажениями. Обычно спектр импульсных сигналов простирается от единиц Гц до нескольких десятков МГц. Поэтому импульсные усилители – это широкополосные усилители, для которых и более. Обеспечение малых искаже-

ний характеристик достигается включением специальных корректирующих цепей.

Чем шире полоса в области ВЧ, тем точнее воспроизводится фронт импульса (уменьшаются искажения в области малых времён).

Чем шире полоса в области НЧ, тем лучше воспроизводится плоская вершина импульса. В импульсных усилителях применяют, как правило, резисторные усилители, имеющие лучшие частотные и переходные характеристики.

Важным показателем ШПУ является площадь усиления каскада:

$$\Pi = K_0 \cdot f_B$$

( $f_B$  - частота, на которой коэффициент передачи уменьшается в  $\sqrt{2} = 0,707$  раз), который характеризует способность усилителя создавать усиление в широкой полосе частот.

В области высоких частот имеем:

$$\Pi = K_0 \cdot f_B = S_0 \cdot R_{ЭКВ} \cdot f_B = \frac{S_0}{2 \cdot \pi \cdot C_{ЭКВ}},$$

т.е. площадь усиления зависит от крутизны и  $C_{ЭКВ}$  и не зависит от  $R_{ист.}$  и  $R_{н.}$ . Т.о., для увеличения площади усиления  $\Pi$  (полосы пропускания) необходимо брать УЭ с большей крутизной и малыми величинами  $C_{ЭКВ}$ .

Это справедливо только для полевых транзисторов и ламповых усилителей, у которых  $R_{BX}$  велико и напряжением  $U_{BX}$  является ЭДС источника  $E_{г.}$

Для каскада на биполярном транзисторе

$$\Pi_{max} = \frac{f_T}{(1 + \sqrt{2\pi \cdot f_T \cdot C_K \cdot r_{\delta'}})^2},$$

где  $f_T = h_{21Э} f_{h21Э}$ ;  $C_K$  - ёмкость между базой и коллектором (барьерная) -  $C_{БК}$ ;  $r_{\delta'}$  - объёмное сопротивление базы ( $r_{\delta'} \approx 100$  Ом).  $f_{h21Э}$  - граничная частота, на которой

$h_{21Э} = 0,707$  от своего значения на НЧ.  $f_T$  - частота, на которой  $h_{21Э} = 1$  (частота единичного усиления).

Т.е., при малых  $R_H (\approx 10 \text{ Ом и менее})$  вследствие влияния  $r_B$ , верхняя граничная частота  $f_B$  растёт медленнее, чем падает усиление и поэтому площадь усиления  $\Pi$  уменьшается при уменьшении  $R_H$ .

Цепи, изменяющие ЧХ в области НЧ и ПЧ в области больших времён, называют цепями НЧ коррекции; цепи, изменяющие ЧХ в области ВЧ и ПЧ в области малых времён, называют цепями ВЧ коррекции.

### 20.3. Низкочастотная коррекция

Коррекцию применяют для получения ЧХ специальной формы (например, подъём ЧХ), чтобы скомпенсировать снижение усиления в других каскадах; кроме того, при заданных искажениях коррекция позволяет применить конденсаторы меньшей ёмкости.

#### 20.3.1. НЧ коррекция с помощью цепочки $R_\Phi C_\Phi$

Принципиальная схема каскада приведена на рис.20-3; эквивалентная схема на НЧ показана рис.20-4. Цепочка  $R_\Phi C_\Phi$  одновременно:

1. Защищает от паразитной обратной связи через общий источник питания;
2. Сглаживает пульсации ИП.

Конденсатор  $C_\Phi$  берут такой величины, чтобы на средних частотах и на ВЧ его сопротивление было много меньше  $R_k$ , величина которого определяет усиление каскада.

При уменьшении частоты сопротивление цепочки  $R_\Phi C_\Phi$  возрастает и, соответственно, напряжение  $U_{вых}$  будет возрастать, и, соответственно, будет увеличиваться коэффициент усиления на НЧ.

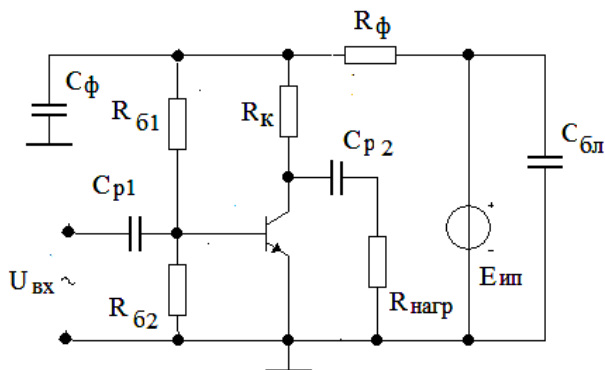


рис.20-3

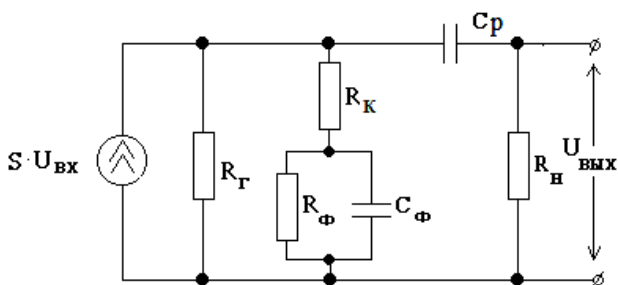


рис.20-4

Т.о., будет компенсировано снижение  $K_{НЧ}$  из-за увеличения сопротивления конденсатора  $C_p$ .

При правильном выборе  $R_{Ф}$   $C_{Ф}$  можно уменьшить  $\omega_{н.гр.}$  в  $5 \div 10$  раз и устранить спад плоской части импульса в области больших времён.

Схема хорошо работает при  $R_{Г} \gg R_{К} \ll R_{Н}$  (при высокоомных нагрузках), например, в схемах с полевыми транзисторами. Для биполярных транзисторов коррекция хорошо работает в схемах с высокими  $R_{Н}$ .

Расширение АЧХ вниз (по частоте) тем больше, чем меньше коэффициент НЧ коррекции

$$\sigma = \frac{R_{\kappa}}{R_{\phi}}.$$

При этом ЧХ изменяется при изменении параметра коррекции

$$m = \frac{C_{\phi} \cdot R_{\kappa}}{C \cdot R_{\pi}}.$$

Нормированная ЧХ (рис.20-5):

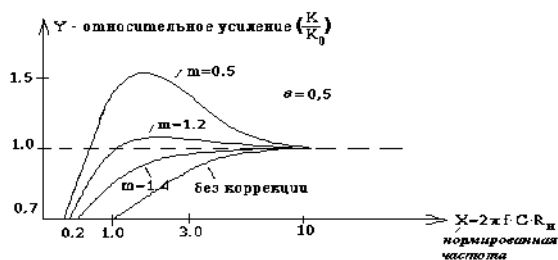


рис. 20-5

Влияние цепочки RфCф на форму выходного импульса показано на рис. 20-6:

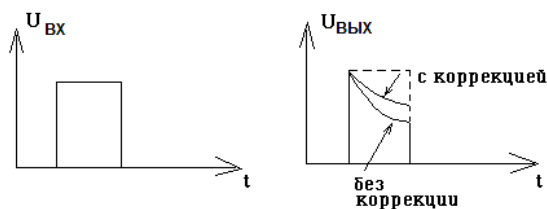


рис. 20-6



Критическое для ЧХ значение  $m = 1,4$  обеспечивает получение минимальное значение  $\omega_{\text{граниж.}}$  без подъема ЧХ. Если  $C_{\text{ф}}$  меньше  $C_{\text{ф.крит}}$ , то появляются подъёмы ЧХ в области НЧ.

### 20.3.2. НЧ коррекция с помощью ОС

Из-за большого разброса параметров транзисторов и сильного их изменения при изменении температуры, напряжения  $E_{\text{пит.}}$ , старении и т.д. обычные схемы коррекции малоэффективны. Поэтому применяют ООС (рис.20-7):

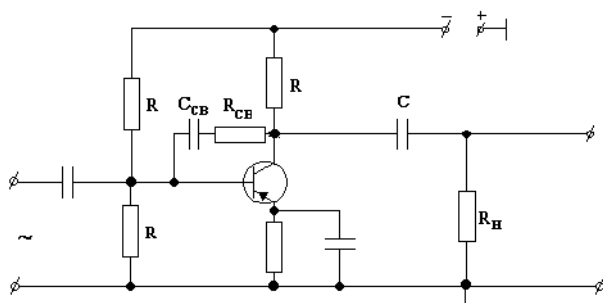


рис. 20-7

Цепочка  $C_{\text{CB}} \cdot R_{\text{CB}}$  дает ООС по напряжению, снижение  $K_{\text{УС}}$ , стабилизацию режима и улучшение характеристик.  $R_{\text{CB}}$  - обеспечивает нужную глубину ОС.  $C_{\text{CB}}$  - выбирают из условия  $X_{\text{CB}} < R_{\text{CB}}$  на СЧ и ВЧ.

При понижении частоты  $X_{\text{CB}}$  возрастает и глубина ОС уменьшается, что приводит к увеличению коэффициента усиления схемы.

Здесь 
$$m = \frac{C_{\text{CB}} \cdot R_{\text{CB}}}{C \cdot R_{\text{H}}};$$

## 20.4. Высоочастотная коррекция

### 20.4.1. Схема ВЧ коррекции с параллельной индуктивностью

Принципиальная схема каскада приведена на рис.20-8; эквивалентная схема на ВЧ показана рис.20-9.

Корректирующая индуктивность  $L$  образует с емкостью  $C_H$  параллельный резонансный контур (рис.20-9).

В результате в области ВЧ полное сопротивление нагрузки возрастает и расширяется верхняя граничная частота  $\omega_B$ , улучшаются ЧХ и ПХ.

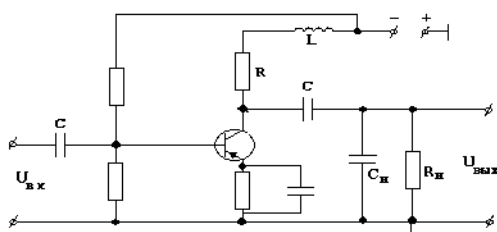


рис.20-8

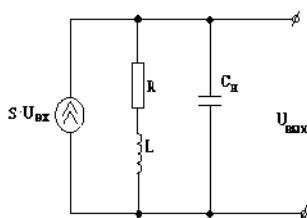


рис. 20-9

Индуктивность  $L$  берут достаточно малой, чтобы она влияла только на ВЧ.

Схема хорошо работает при  $R_{\Gamma} \gg R \ll R_H$ .

Схема проста, удобна, легко настраивается и увеличивает полосу частот в 1,7 раза.

Недостаток – эту схему нельзя применять в интегральных микросхемах из-за нереализуемости (из-за её размеров).

ЧХ и ПХ определяются коэффициентом ВЧ коррекции:

$$a = \frac{L}{C_H \cdot R^2} \cdot$$

При расчете каскадов усиления импульсных сигналов с параллельной индуктивностью значение коэффициента коррекции «а» следует выбирать наибольшим исходя из заданного (допустимого) выброса. При этом время установления будет минимальным

Нормированная ЧХ (рис.20-10):

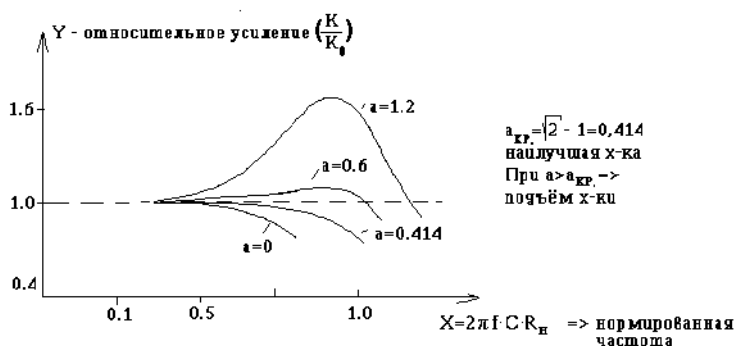


рис. 20-10

### 20.4.2. ВЧ коррекция с ООС

Принципиальная схема каскада приведена на рис.20-11; вариант (фрагмент) показан на рис.20-12.

Величина емкости  $C_{\text{КОР.}}$  выбирается такой, чтобы действие ООС в целом сказывается только на НЧ и СЧ. На ВЧ действие ООС из-за  $C_{\text{КОР.}}$  ослабляется, компенсируя «завал» АЧХ (рис.20-13).

Характеристика 1 (рис.20-13) соответствует значению  $C_{\text{ЭКВ}} = \infty$  ( $X_{\text{ЭКВ}} = 0$ ), т.е. нет ООС, нет коррекции -

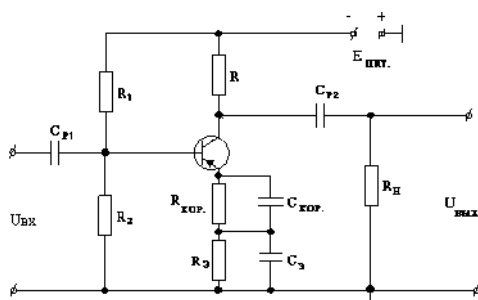


рис. 20-11

или вариант

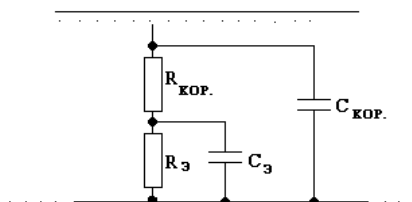


рис. 20-12

обычный резисторный каскад без коррекции. Верхняя граничная частота равна  $\omega_{В1}$ .

Характеристика 2 соответствует значению  $C_{\text{ЭКВ}} = 0$

( $X_{C_{ЭКВ}} = \frac{1}{\omega \cdot C_{ЭКВ}} = \infty$ ), т.е. имеется 100 % ООС по переменному току. Коэффициент усиления и полоса немного шире (на уровне  $\sqrt{2}$ ); верхняя граничная частота равна  $\omega_{В2}$ .

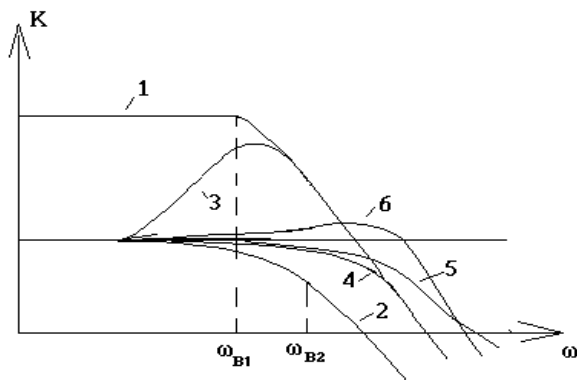


рис.20-13

Характеристика 3 соответствует значению  $0 < C_{ЭКВ} < \infty$ , т.е. при малых  $C_{ЭКВ}$  она совпадает с характеристикой 2, а при больших  $C_{ЭКВ}$  - с характеристикой 1.

Уменьшая  $C_{ЭКВ}$  можно дойти до характеристики 4, у которой площадь усиления  $\Pi$  как у характеристики 1, но полоса на уровне  $\sqrt{2}$  раз шире (за счёт снижения коэффициента усиления  $K$ ).

Подбирая  $C_{ЭКВ}$  можно получить кривую 5 и кривую 6. Характеристика 5 - это оптимальная АЧХ (максимально плоская). Выигрыш по полосе  $\approx 1,6$  раза.

## Выводы по теме

1. Отличие анализа работы усилителя на полевом транзисторе от усилителя на биполярном транзисторе - огромное (десятки МОм) входное сопротивление транзистора; выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$  не зависит от  $R_{\text{г}}$ . Полевой транзистор на частотах примерно до 100 МГц (иногда выше) можно считать безынерционным усилителем.

2. Импульсные усилители это широкополосные усилители, для которых  $\frac{\omega_B}{\omega_H} = 10^2 \div 10^4$  и более. Обеспечение малых искажений характеристик достигается включением специальных корректирующих цепей.

3. Расширение полосы пропускания необходимы для улучшения показателей импульсного усилителя. Важным показателем ШПУ является площадь усиления каскада

$$П = K_0 * f_B,$$

которая характеризует способность усилителя создавать усиление в широкой полосе частот.

4. Коррекцию применяют для получения ЧХ специальной формы (например, подъём ЧХ на НЧ или ВЧ), чтобы скомпенсировать снижение усиления в других каскадах; кроме того, при заданных искажениях коррекция позволяет применять в схемах конденсаторы меньшей ёмкости.

5. Для схемы НЧ коррекции при правильном выборе  $R_{\text{ф}} C_{\text{ф}}$  можно уменьшить нижнюю граничную частоту в  $5 \div 10$  раз и устранить спад плоской части импульса в области больших времён.

6. Схемы ВЧ коррекции расширяют верхнюю граничную частоту, улучшают ЧХ и ПХ. Возможно увеличение полосы частот  $\cong$  в 1,7 раза.

## Контрольные вопросы

1. В чем заключаются особенности анализа каскадов на полевых транзисторах?
2. В чем заключаются особенности широкополосных усилителей (ШПУ) в отличие от усилителей звуковой частоты?
3. Как взаимосвязаны АЧХ усилителя с параметрами импульса при усилении импульсных сигналов?
4. Что характеризует показатель ШПУ - «площадь усиления каскада»?
5. Какие параметры импульсного усилителя влияют на площадь усиления ШПУ?
6. Приведите схему НЧ коррекции с помощью цепочки  $RfCf$  и объясните принцип ее работы.
7. Приведите параметры НЧ коррекции и объясните их влияние на ЧХ и ПХ.
8. Приведите схему НЧ коррекции с помощью ООС и объясните принцип ее работы.
9. Приведите схему ВЧ коррекции с помощью параллельной индуктивности и объясните принцип ее работы.
10. Приведите схему ВЧ коррекции с помощью последовательной индуктивности и объясните принцип ее работы.
11. Приведите схему ВЧ коррекции с помощью ООС и объясните принцип ее работы.

## 21. Анализ и схемотехника выходных мощных каскадов усиления

Усилителем мощности называют усилитель, предназначенный для обеспечения заданной мощности нагрузки  $P_n$  при заданном сопротивлении нагрузки  $R_n$ . Усилитель мощности является примером устройств силовой электроники. Основная цель при разработке таких устройств состоит в том, чтобы отдать нагрузке заданную мощность.

В противоположность устройствам силовой электроники при проектировании устройств информативной (информационной) электроники основная цель состоит в том, чтобы выполнить заданную обработку сигнала и получить выходные сигналы, содержащие ту или иную информацию о входных. В качестве примера можно назвать устройства, определяющие, в какой момент времени входной сигнал принимает максимальное значение. В устройствах информативной электроники, как правило, стремятся снизить мощность обрабатываемых сигналов до такого уровня, при котором помехоустойчивость устройства еще приемлема. В устройствах силовой электроники такую задачу в соответствии с изложенным нельзя ставить в принципе. Реальное устройство может содержать черты как силовой, так и информативной электроники, но об указанном различии следует постоянно помнить. Необходимо отметить, что функции устройств информативной электроники все чаще берут на себя микропроцессоры. Но микропроцессоры, естественно, не в состоянии выполнять функции устройств силовой электроники.

На усилитель мощности, как правило, приходится подавляющая часть мощности, потребляемая тем устройством, составной частью которого он является. Поэтому всемерное внимание уделяется повышению коэффициента



полезного действия усилителя мощности. Другой важной проблемой является уменьшение габаритных размеров и веса усилителя мощности, так как они часто определяют габаритные размеры и вес всего устройства. Проблемы повышения коэффициента полезного действия и уменьшения габаритных размеров тесно связаны, потому что габаритные размеры и вес усилителя сильно зависят от габаритных размеров и веса охладителей. Чем больше коэффициент полезного действия, тем меньше габаритные размеры и вес усилителя.

Транзисторы усилителей мощности работают в режиме большого сигнала, когда амплитуды переменных составляющих токов и напряжений достаточно велики. При этом заметно проявляются нелинейные свойства транзисторов и возникают нелинейные искажения входного сигнала. С другой стороны, обычно не допускается, чтобы выходной сигнал был сильно искаженным.

Уровень нелинейных искажений и КПД усилителя мощности существенно зависят от начального режима работы, причем нелинейные искажения обуславливаются нелинейностью не только входных, но и выходных характеристик транзисторов, так как они работают в режиме большого сигнала. Минимально возможный уровень нелинейных искажений можно обеспечить в режиме класса А, а максимально возможный КПД — в режиме классов В или АВ /1/. Основная особенность работы выходных каскадов — высокий уровень сигналов, что накладывает на них ряд специфических требований.

### **21.1. Требования к оконечным усилительным каскадам**

Назначение выходного каскада — обеспечить:

1) при заданном значении сопротивления нагрузки требуемый уровень сигнала. Если нагрузка активна, то необходимо обеспечить требуемую  $P_{\text{вых}}$ ; если нагрузка содержит реактивность, то необходимо обеспечить требуемое значение напряжения  $U_{\text{вых}}$ .

2) требуемый уровень сигнала на выходе должен обеспечиваться при допустимых линейных и нелинейных искажениях.

Кроме того:

3) необходимо обеспечить минимум потребления от ИП или

4) максимум КПД.

При этом

5) необходимо обеспечить минимум потери на УЭ и, соответственно,

6) обеспечить требуемый температурный режим УЭ.

Обычно в оконечных каскадах применяются мощные УЭ.

При этом необходимо

7) максимально использовать УЭ (по мощности, по току - для минимизации потерь на нем). Рекомендуется выбирать менее мощный с максимумом его использования по допустимым параметрам.

## 21. 2. Схемы выходных каскадов

Существуют следующие виды практических схем усилителей:

- 1) Простая схема;
- 2) Двухтактная схема;
- 3) Трансформаторная схема;
- 4) Дроссельная схема.

Как было рассмотрено в лекциях 5и 6, в зависимости от типа схемы выходного каскада используются один из вариантов схем включения УЭ.

Транзисторы в трансформаторных схемах мощного усиления обычно включают по схеме с ОЭ или ОБ.

При включении по схеме с ОЭ получают максимум усиления по мощности; при этом требуется минимум мощности от предоконечного каскада, что удешевляет схему.

При включении по схеме с ОБ получают минимум коэффициента гармоник и хорошую стабильность каскада при изменении температуры, нестабильности источника питания, старении. Но при этом велик входной ток, приходится «умощнять» предоконечный каскад.

Включение по схеме с ОК в трансформаторных схемах применяют редко — не имеет преимуществ по сравнению с ОБ.

Достоинство простой схемы непосредственного включения нагрузки  $R_H$  — ее простота, отсутствие дополнительных деталей, потерь мощности в выходном устройстве, широкая полоса частот.

Недостатки — протекание постоянной составляющей тока через нагрузку; высокий потенциал  $E_P$  на  $R_H$ ; невысокий КПД  $\leq 20\%$  для транзисторных усилителей ( $\leq 12\%$  для тетродов;  $\leq 7\%$  для триодов ламповых). Схема редко используется в выходных каскадах.

Схема выходного каскада с RC-цепью (рис.21-1):

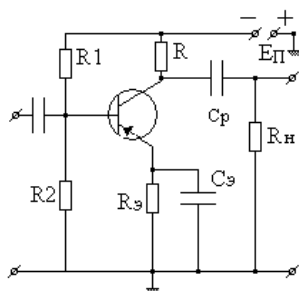


рис.21-1

Ток питания не проходит через сопротивление нагрузки  $R_H$ . Нагрузка соединена с землей одним концом, что часто удобно. Достоинство схемы – ее простота. Недостатки — низкий КПД  $\leq 5\div6\%$  для транзисторных;  $\leq 2\div3\%$  для ламповых каскадов. Применяют при уровне  $(10\div100)$  милливатт выходной мощности.

Трансформаторные (дрессельные) выходные каскады (рис.21-2) имеют более высокий КПД.

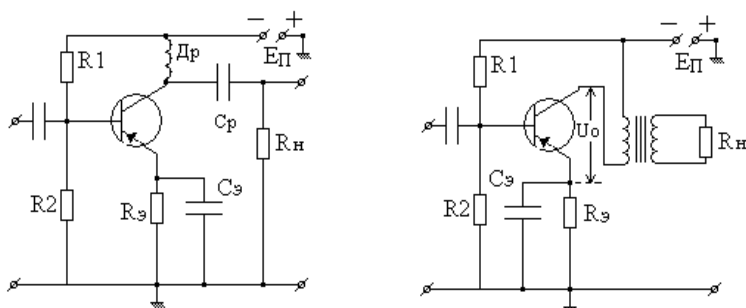


рис.21-2

Ток питания не течет через нагрузку. Максимальный КПД в два раза выше, чем у резисторного каскада с непосредственным включением и приблизительно в 6 раз больше, чем у каскада с RC-цепью.

Однако полоса усиливаемых частот у дроссельного каскада меньше, чем у резисторного. У трансформаторного — еще меньше. А стоимость и габариты — больше.

Трансформаторные каскады могут работать практически на любое, достаточно низкое сопротивление  $R_H$ .

Особенности анализа: способ расчета зависит от схемы каскада, типа УЭ, его режима; выбора  $E_P$ ,  $R_H$ ,  $R_{BX}$ ,  $U_{BX}$  и других условий.

При расчете необходим учет заданного коэффициента нелинейных искажений.

## 21. 3. Трансформаторный каскад мощного усиления в режиме А

### 21.3.1. Общие соотношения

Мощность полезного сигнала  $P_{\sim}$ , которую должен отдать усилительный элемент (УЭ), должна быть больше выделяемой мощности в нагрузке  $P_H$ , так как часть мощности теряется в выходном трансформаторе:

$$P_{\sim} = \frac{P_H}{\eta_{TP}},$$

где для расчетов  $\eta_{TP}$  определяется из табл.21-1:

табл.21-1

| тип трансформатора                                        | к.п.д. $\eta$ трансформатора |                           |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
|                                                           | в стационарных устройствах   | в портативных устройствах |
| Входные (до 1 Вт) - межкаскадные, выходные малой мощности | 0,7 ÷ 0,8                    | 0,6 ÷ 0,75                |
| Межкаскадные и выходные до 10 Вт                          | 0,75 ÷ 0,85                  | 0,7 ÷ 0,8                 |
| Выходные                                                  | 0,84 ÷ 0,93                  | 0,75 ÷ 0,85               |
| от 10 до 100 Вт                                           | 0,92 ÷ 0,96                  | 0,85 ÷ 0,9                |
| от 100 Вт до 1 кВт                                        | 0,95 ÷ 0,98                  | —                         |
| от 1 до 10 кВт                                            | ≥ 0,97                       | —                         |
| выше 10 кВт                                               |                              |                           |

Так как точка покоя в режиме А находится на середине прямолинейной части нагрузочной характеристики, то форма выходного тока и напряжения при синусоидальном входном сигнале близка к синусоиду (рис.21-3).

При этом (для идеального трансформатора его сопротивление по постоянному току  $R_{\Sigma} = 0$ ), напряжение покая  $U_0$  равно напряжению питания  $E_0$  (пренебрегая падением напряжения, например, на сопротивлении  $R_{\Sigma}$ ). Для этого случая:

максимальная отдаваемая мощность УЭ:

$$P_{\sim \max} = 0,5 U_{\text{выхн}} \cdot I_{\text{выхн}} = 0,5 \cdot \xi \cdot \psi \cdot U_0 \cdot I_0$$

где  $\xi = \frac{U_{\text{выхн}}}{U_0}$  — коэффициент использования напряжения

питания;

$\psi = \frac{I_{\text{выхн}}}{I_0}$  — коэффициент использования тока покая.

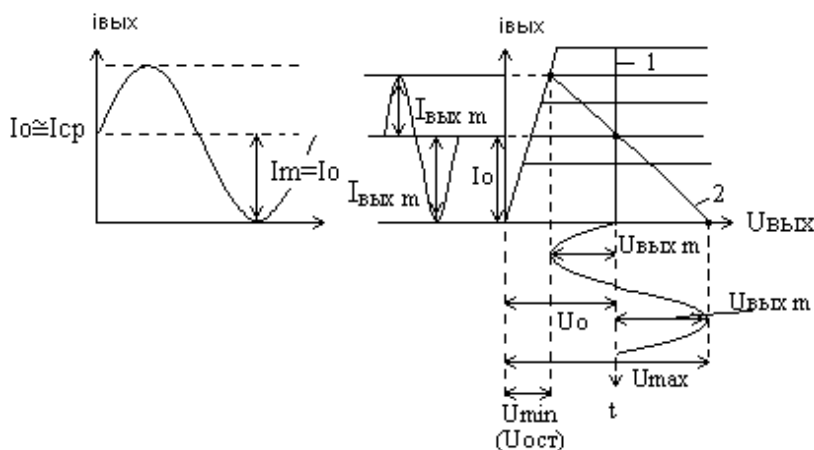


рис.21-3

1 — нагрузочная характеристика для постоянного тока для  $R_{\Sigma} = 0$ ;

2 — нагрузочная характеристика для переменного тока  $R_{\Sigma}$ .

При этом среднее значение выходного тока УЭ равно току покоя УЭ:

$$I_{CP} \approx I_0.$$

Сопротивление нагрузки по переменному току (при синусоидальном входном сигнале):

$$R_{\sim} = U_{\text{выхн}} / I_{\text{выхн}} = \xi \cdot U_0 / \psi \cdot I_0$$

Потребляемая выходной цепью мощность (от источника питания):

$$P_0 = I_{CP} \cdot E = I_0 \cdot U_0$$

(без учета потерь на  $R_{\text{акт}}$  обмотки трансформатора).  
Максимальное КПД трансформаторного каскада в режиме А:

$$\eta_{A \max} = P_{\sim \max} / P_0 = \frac{0,5 \cdot \psi \cdot \xi \cdot U_0 \cdot I_0}{U_0 \cdot I_0} = 0,5 \cdot \psi \cdot \xi,$$

и при  $\psi \cdot \xi \cong 1$

$$\eta_{A \max} \cong 50\%.$$

Как видно из рис.21-3 - при синусоидальном сигнале  $U_{\max} \approx$

в 2 раза больше напряжения источника питания. Это объясняется тем, что при убывании тока  $U_{\max}$  складывается из  $U_0$  и противоэдс в индуктивности  $L_1$  обмотки трансформатора, стремящейся поддержать убывающий ток.

При импульсных сигналах с крутыми фронтами может быть

$$U_{\max} \approx (5 \div 10) E.$$

Поэтому для трансформаторных каскадов, особенно транзисторных, берут  $U_0 \approx (0,3 \div 0,4) U_{\text{доп}}$  транзистора.

Мощность, выделяемая на электродах УЭ:

$$P = P_0 - P_{\sim}$$

Для режима А при отсутствии сигнала ( $P_{\sim} = 0$ ) выделяемая на УЭ мощность максимальна  $P = P_0$ . Поэтому выбирают:

$$P_0 = U_0 \cdot I_0 \leq P_{\max} \text{ (справочное),}$$
$$I_0 \leq P_{\max} / U_0 \text{ (справочное).}$$

Радиатор рассчитывают по  $P_0$ .

### **21.3.2. Расчет однотактного транзисторного каскада мощного усиления в режиме А**

1. Выбор схемы и выбор способа включения УЭ.
2. Определяют отдаваемую транзистором мощность

$$P_{\sim} = P_H / \eta_{\text{ТР-Р}}.$$

3. Выбирают транзистор с допустимой мощностью рассеяния на коллекторе транзистора  $P_{K \max} \geq 3 P_{\sim}$ .

Напряжения  $U_0$  и ток  $I_0$  определяются по допустимой  $P_{K \max}$  (желательно, чтобы они были максимальны, так как при этом обеспечивается минимум нелинейных искажений). Для схемы с ОЭ при этом минимальна входная мощность  $P_{\text{вх}}$ . Выбирается

$$U_0 \approx (0,3 \div 0,4) U_{\text{доп. max}} \text{ (справочное).}$$

4. Определяют

$$R_{\sim} = \frac{\xi \cdot U_0}{\psi \cdot I_0} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}} = \frac{U_{\text{вых}}^2}{2P_{\sim}}$$

5. Минимально допустимый ток покоя:



$$I_0 = \frac{1}{\psi} \cdot \frac{2P_{\sim}}{(U_0 - U_{\text{ост}})} = \frac{2P_{\sim}}{(1 \div 0.95) \cdot (U_0 - U_{\text{ост}})}$$

6. Коэффициент трансформации определяют:

$$n = \sqrt{\frac{R_H}{\eta_{\text{ТР-Р}} \cdot R_{\sim}}},$$

где

$$R_H \leq \frac{1}{3\omega_B \cdot C_0} \cong \frac{1}{20f_B \cdot C_0},$$

а  $f_B$  — верхняя рабочая частота каскада,

$$C_0 = C_H + C_M + C_{\text{ТР-Р}}.$$

( $C_{\text{ТР-Р}}$  — собственная емкость трансформатора,  $C_M$  — емкость монтажа);

$C_{\text{ТР-Р}} = 15 \div 40$  пФ для маломощных трансформаторов,

$C_{\text{ТР-Р}} = 40 \div 150$  пФ для трансформаторов средней мощности (расчету не поддается; или измеряется, или определяется из таблиц — справочное);

$C_M \approx 10 \div 30$  пФ.

7. Верхняя точка нагрузочной прямой — на верхнем изгибе характеристики; нижняя точка — на уровне  $(0.01 \div 0.05)I_0$ .

По характеристикам уточняют отдаваемую  $P_{\sim}$ :

$$P_{\sim} = 0.125(I_{\text{ВЫХ max}} - I_{\text{ВЫХ min}})^2 R_{\sim} = 0.125(2U_{\text{ВЫХ max}} \cdot 2I_{\text{ВЫХ min}}).$$

8. По входной характеристике определяют напряжение смещения  $U_{0\text{ВХ}}$  и амплитуду входного сигнала

$$2U_{mBX} = U_{BX \max} - U_{BX \min}.$$

9. Необходимая амплитуда входного тока:

$$I_{BXm} = \frac{I_{BbXm}}{h_{21Э \min}} \quad \text{— для схемы с ОЭ.}$$

Ток покоя:

$$I_{0BX} = (1.02 \div 1.05) I_{BXm}.$$

(если схема с ОБ, то необходимо использовать соответствующие параметры  $h_{21Б \min}$ ,  $h_{21Э}$ ,  $h_{21Б}$ ).

10. Определяют:

$$P_{BX\sim} = 0.125(2 I_{BXm} \cdot 2U_{BXm}).$$

$$R_{BX \text{ транз}} = 2U_{BXm} / 2 I_{BXm};$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_m = \frac{P_H}{P_{BX\sim}}.$$

11. Определяют методом 5 ординат коэффициент гармоник.

12. Определяют параметры стабилизации рабочей точки.

13. Мощность, рассеиваемая на УЭ:  $P_0 = I_0 \cdot U_0$

14. Рассчитывают параметры радиатора.

15. Необходимое напряжение источника питания:

$$E = U_0 + I_0 \cdot r_1 + I_{0Э} R_{Э},$$

где

$$I_{0Э} = I_{0К} + I_{0Б},$$

$r_1$  — активное сопротивление обмотки трансформатора.

16. Выполняется электрический расчет трансформатора, включая расчет частотной характеристики трансформатора.

17. Выполняется расчет блокировочных элементов.

### **21.3.3. Особенности расчета двухтактного каскада мощного усиления в режиме А**

Особенности двухтактного каскада мощного усиления:

1. Компенсация четных гармоник позволяет применять режим В, как более экономичный; применение режима В позволяет лучше использовать УЭ, получая большую мощность при том же уровне  $K_T$ ;

2. Компенсация помех и фона, поступающих от синфазных источников;

3. Большой динамический диапазон;

4. Компенсация постоянного подмагничивания сердечника выходного трансформатора, следовательно, меньше габариты, масса и стоимость трансформатора;

5. Компенсация синфазных наводок сигнала в ИП, что обеспечивает уменьшение паразитных межкаскадных связей через ИП, проще в изготовлении сетевые фильтры и фильтры ИП.

Двухтактный каскад — это каскад, содержащий два генератора, работающих на общую нагрузку (рис. 21-4):

- схема с ОЭ и предыдущим резисторным каскадом (рис.21-4а);

- схема с ОБ и предыдущим трансформаторным каскадом (рис. 21-4б).

Расчет ведут на одно плечо, на половину заданной мощности (как для однотактного каскада).

При этом необходимо учитывать следующие особенности:

1) Мощность, которую должен отдать усилительный элемент:

$$P_{\sim} = \frac{P_H}{2\eta_{TP-PA}}.$$

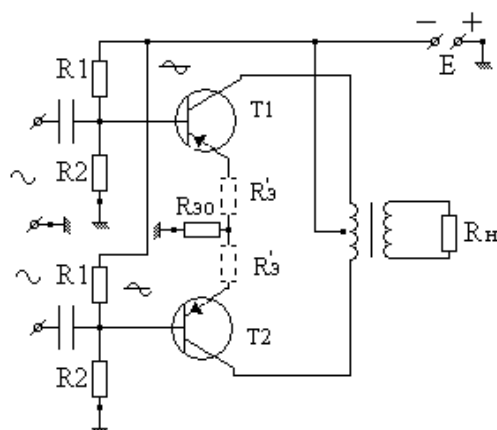


рис.21-4 а)

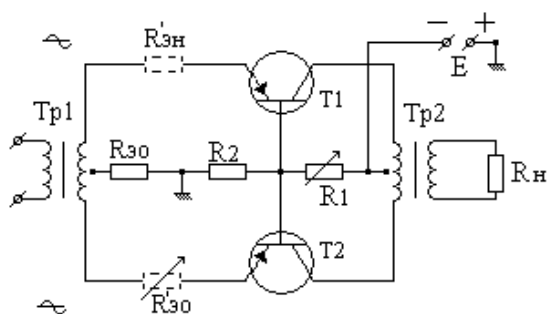


рис. 21-4 б)

2) Сопротивление нагрузки  $R_{\sim}$  определяют как в предыдущем случае.

В идеальном случае (полная симметрия) четные гармоники отсутствуют.

В реальности — учитывается коэффициент асимметрии, который зависит от способа включения транзистора, от соотношения

$$\epsilon = R_{BX} / R_{ГЕН}.$$

Для схемы с ОБ и  $R_{iГ} \gg R_{BX}$  обычно “ $\epsilon$ ”  $\leq 0,05$ ;

при  $R_{iГ} \approx R_{BX}$  “ $\epsilon$ ”  $\approx 0,15 \div 0,25$ .

Для схем с ОЭ транзисторы в плечах подбирают по  $h_{21Э}$ . При отношении  $h'_{21Э} / h''_{21Э}$  (для плеч каскада) = 1,2 обычно “ $\epsilon$ ”  $\approx 0,1$ .

При этом коэффициент гармоник, рассчитываемый по методу 5 ординат, составляет:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{(\epsilon \cdot I_{2m})^2 + I_{3m}^2 + (\epsilon \cdot I_{4m})^2}}{I_{1m}}.$$

где  $I_{1m}$ ,  $I_{2m}$ , ...,  $I_{4m}$  — амплитуды соответствующих гармоник, “ $\epsilon$ ” — коэффициент асимметрии.

3) Два плеча не только отдают удвоенную мощность, но и потребляют удвоенные ток и мощность.

4) Электрический расчет выходного трансформатора в режиме А ведут также, но нужна замена:

$$R_{\sim} \text{ на } 2R_{\sim}; R_i \text{ на } 2R_i; R_{KB} \text{ на } 2R_{KB}.$$

Напряжение источника питания определяют, заменяя  $r_{1на}$   $r_{1ПЛЕЧА} = 0,5 \cdot r_1$ .

5) Эмиттерная стабилизация осуществляется или с индивидуальными делителями подачи напряжения смещения, или с общим делителем (при входном трансформаторе). Для уменьшения разбалансировки плеч или при нагреве транзисторов в эмиттеры плеч нередко ставят резисторы (пунктир на схемах) величиной  $(0,1 \div 1)R_{Э0}$ , включенные в общий провод. Для выравнивания плеч иногда один из резисторов делителя делают регулируемым.

#### 21.4. Трансформаторный каскад в режиме В

В режиме В плечи двухтактного каскада работают поочередно, каждое — в течение полупериода сигнала, когда ток в выходной цепи одного УЭ достигает максимума, другой УЭ в этот момент заперт, и наоборот. Полпериода в режиме В плечо как бы отключено. Поэтому расчет каскада ведется для половины периода по семействам характеристик УЭ одного плеча, получая при этом данные по всему каскаду за весь период сигнала.

Из рисунка 21-5 видно, что в режиме В УЭ полностью используется при сопротивлении нагрузки выходной цепи плеча по переменному току:

$$R_{\sim \text{плеча}} = \frac{U_{\text{выхм}}}{I'_{\text{мах}}} = \frac{\xi \cdot U_0}{I'_{\text{мах}}},$$

где  $\xi = \frac{U_{\text{выхм}}}{U_0}$  — коэффициент использования напряжения питания.

Мощность, отдаваемая одним плечом за полупериод, и соответственно, всем каскадом за период:

$$P_{\sim \text{мах}} = 0.5 I_{\text{мах}}^2 R_{\sim \text{п}} = 0.5 I'_{\text{мах}} \cdot U_{\text{Вых м}}$$

Среднее значение тока выходной цепи одного плеча в режиме В при максимальном сигнале:

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{\pi} \cdot I'_{\text{мах}} = 0.318 \cdot I'_{\text{мах}},$$

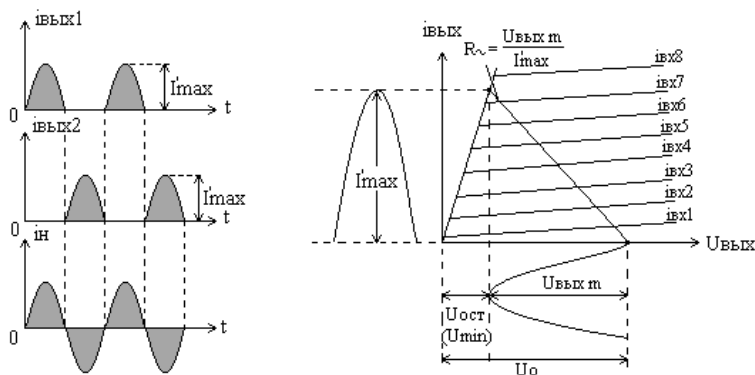


рис.21-5

а среднее значение потребляемого каскадом тока

$$I_{cp} = \frac{2}{\pi} \cdot I'_{\max}.$$

Потребляемая мощность:

$$P_0 = \frac{2}{\pi} \cdot I'_{\max} \cdot U_0;$$

КПД

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\sim \max}}{P_0} = \frac{\pi}{4} \cdot \xi = 0.785 \cdot \xi,$$

что примерно в 1,5 раза выше, чем в режиме А.

Выделяемая (рассеиваемая) на электродах УЭ мощность (рис.21-6):

$$P = 0.5(P_0 - P_{\sim}) = 0,318 I_{\max}^2 \cdot U_0 - 0,25 I_{\max}^2 R_{\sim \text{плеча}}.$$



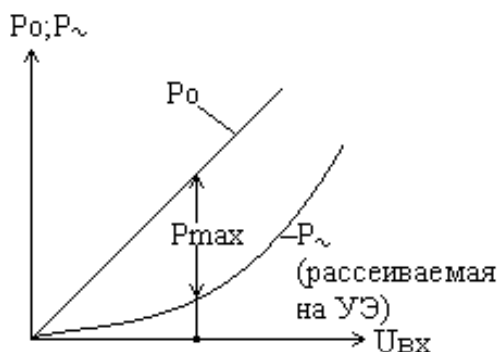


рис.21-6

1-я составляющая выражения для  $P$  — 1<sup>я</sup> степень амплитуды  $U_{BX}$ ; 2-я составляющая — 2<sup>я</sup> степень (см. рис.21-6). Таким образом (из рис.21-6),  $P_{РАССЕИВ}$  равна максимуму при определенном значении  $U_{BX}$ , а не при  $U_{BX} = 0$ .

$$P_{РАС\ max} = 0.101U_0^2 / R_{\sim\text{плеча}} , \quad \text{при } \xi = 0.637.$$

а значение  $\xi$  зависит от схемы включения УЭ и типа УЭ. У транзисторов и экранированных ламп обычно при  $U_{BX\ max}$

$$\xi > 0.637.$$

Поэтому расчет радиаторов производят по формуле:

$$P_{РАСС\ max} = 0.101U_0^2 / R_{\sim\text{плеча}} \text{ (т. е. для } \xi = 0.637).$$

Если каскад работает при  $\xi < 0.637$  при  $U_{BX\ max}$ , то расчет ведут по  $P_{РАСС}$ .

Внимание! В режиме А, если нагрузка  $R_H$  не активна, ее уменьшение до 0 (короткого замыкания) не приводит к увеличению  $P_{РАСС}$  по сравнению с режимом покоя.

В режиме В — все выше приведенные соотношения справедливы только при активной  $R_H$ .

Если нагрузка имеет комплексный характер, или  $R_H = 0$ , то мощность, рассеиваемая на электродах, равна потребляемой мощности от источника, что может привести к перегреву УЭ. Поэтому применяют специальные схемы защиты от перегрева.

Эмиттерную стабилизацию в транзисторных каскадах, работающих в режиме В, использовать нельзя. Смещение необходимо подавать от низкоомного делителя.

Расход энергии в режиме В значительно ниже, чем в режиме А, так как в режиме молчания практически нет потребления.

## **21.5. Бестрансформаторные двухтактные каскады мощного усиления**

Включение  $R_H$  непосредственно в выходную цепь УЭ без выходного трансформатора позволяет устранить вносимые трансформатором частотные, фазовые и нелинейные искажения. Но при этом в обычных однотактных схемах непосредственное включение  $R_H$  не оправдано из-за протекания тока  $I_0$  через  $R_H$  — падает КПД, растет мощность, рассеиваемая на электродах УЭ. Указанные недостатки отсутствуют в схемах бестрансформаторных двухтактных каскадов.

### **21.5.1. Двухтактный бестрансформаторный каскад с параллельным (несимметричным) выходом**

На рис.21-7 а) представлена схема с двумя ИП (или одним, со средней точкой). На рис.21-7б) представлена схема с од-

ним ИП и разделительным конденсатором (на обоих рис.21-7 не показаны цепи смещения, стабилизации).

Каскады рис.21-7 а) и рис.21-7 б) требуют подачи на вход

двух равных напряжений сигнала противоположной полярности (от инверсного каскада).

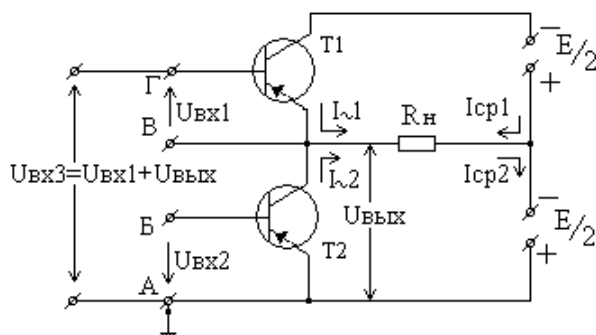


рис.21-7 а)

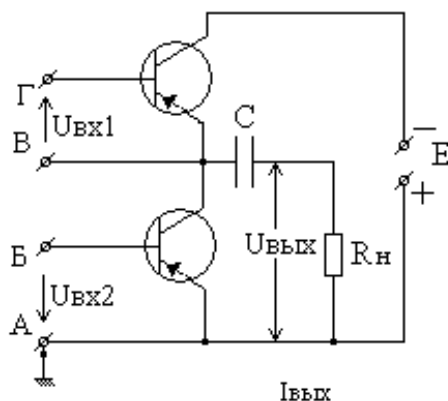


рис.21-7 б)

При одинаковых УЭ в плечах по схеме рис.21-7 а) постоянная составляющая, протекающая через  $R_H$   $I_0 = 0$  ( $I_{cp1}$  и  $I_{cp2}$  взаимно уничтожаются). Переменная составляющая  $I_{\Sigma 1}$  и  $I_{\Sigma 2}$  проходят через  $R_H$  и суммируются.

В схемах рис.21-7 а) и рис.21-7 б) УЭ по постоянному току включены последовательно; по отношению к  $R_H$  УЭ включены параллельно.

Напряжение  $E$  и режим УЭ выбирают таким образом, чтобы заданное  $R_H$  обеспечивало полное использование транзисторов как по току, так и по напряжению.

Если в схеме рис.21-7 а) подавать сигнал  $U_{BX2}$  в т. А и Б, а

второй сигнал между т. А и Г ( $U_{BX3}$ ) от предоконечного каскада с разделенной нагрузкой, то Т2 будет работать по схеме с ОЭ и давать большое усиление по току и напряжению. Верхний Т1 будет включен по схеме с ОК, так как между его эмиттером и общим проводом включено все выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$ . Поэтому для симметричной работы необходимо подавать  $U_{BX3} = U_{BX} + U_{ВЫХ} \gg U_{BX2}$ .

При трансформаторном предоконечном каскаде и равенстве  $U_{BX1}$  и  $U_{BX2}$  — оба транзистора будут работать по схеме с ОЭ с одинаковыми режимами и давать одинаковое усиление.

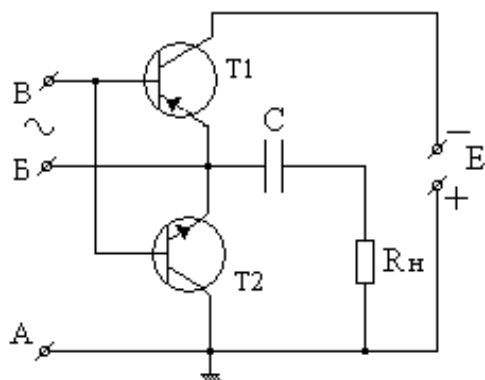
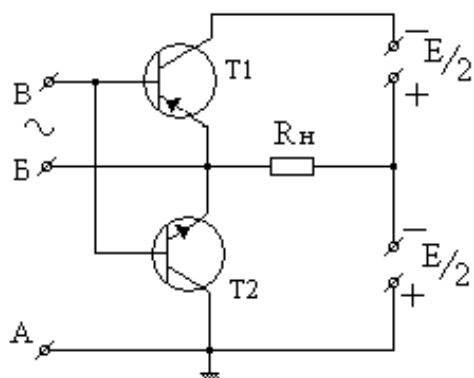
Схемы рис.21-7 а) и рис.21-7 б) можно упростить, используя

транзисторы разной проводимости (рис.21-8):

- рис.21-8 а) с двумя источниками питания;
- рис.21-8б) с одним источником питания.

Предоконечный каскад может быть неинверсным: при подаче одного напряжения на входы Т1 и Т2 один транзистор будет открываться, другой — закрываться. Схема работает как двухтактная.

Здесь также по постоянному току Т1 и Т2 включены последовательно, а по переменному току — параллельно  $R_H$ . Это «каскады с несимметричным входом и выходом» или «двухтактные каскады с дополнительной симметрией».



Каскады рис. 21-7 и рис.21-8 могут работать как в режиме А,  
так и в режиме В.

В режиме А  $\eta_{\max} = 50\%$ , в режиме В  $\eta_{\max} = 78,6\%$ . Реально — к.п.д. выше, чем у трансформаторных, т. к. нет потерь в трансформаторах.

На схемах рис.21-8 если подавать  $U_{BX}$  в т. А и В от обычно-

го резисторного предыдущего каскада, то оба транзистора работают по схеме с ОК, вследствие чего  $U_{BX}$  должно быть  $U_{BX} > U_{ВЫХ}$ .

Но, если подавать  $U_{BX}$  в т. Б или В (от трансформаторного предыдущего каскада), то оба транзистора будут работать по схеме с ОЭ и давать одинаковое усиление.

Это были двухтактные каскады с параллельным управлением. Для них необходимо подбирать пары р-п-р и п-р-п транзисторов или иметь инверсный предоконечный каскад. Свободен от этих недостатков двухтактный каскад с последовательным управлением.

### 21.5.2. Двухтактный каскад с последовательным управлением

В этой схеме (рис.21-9) все транзисторы одного типа - п-р-п.

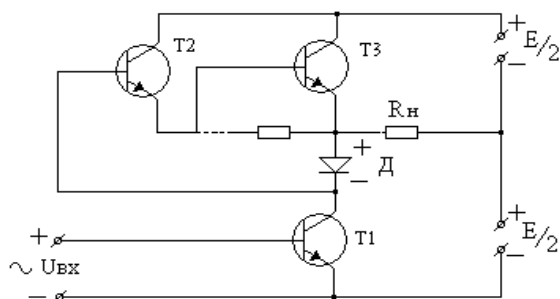


рис.21-9

Транзистор Т1 — ведущее плечо; транзисторы Т2 ÷ Т3 представляют собой составной транзистор, ведомое плечо. Т1 — включен по схеме с ОЭ и работает в режиме В через Д на нагрузку  $R_H$  (с малыми токами).

В 1-й полупериод открыты Т1 и диод Д. В это время составной транзистор Т2-Т3 заперт напряжением на диоде (он работает в режиме В с малыми токами).

Во время 2-го полупериода Т1 и диод Д заперты; напряжение на диоде открывает Т2 и Т3, которые работают на  $R_H$ .

Пунктиром показан резистор —  $R$ , который ставится для улучшения свойств Т2 и Т3.

На схеме не показаны цепи смещения и стабилизации. Для улучшения линейности в схему вводят глубокую ООС.

### 21.5.3. Расчет бестрансформаторных двухтактных каскадов

Особенность расчета(рис.21-10):

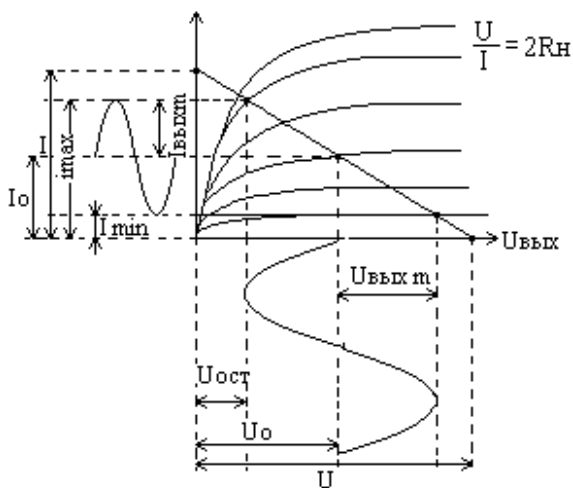


рис.21-10

при заданном сопротивлении нагрузки  $R_H$  и заданной мощности  $P_H$  для получения максимального значения  $\eta_{\max}$  значение  $E$  должно быть строго определенным.

Для бестрансформаторных двухтактных каскадов (рис.21-7,

21-8) при работе в режиме А сопротивлением нагрузки плеча является удвоенное  $2R_H$ , так как в режиме А оба плеча работают последовательно. Нагрузочную прямую строят для  $R_{\sim} = 2R_H$ .

При этом напряжение питания выбирается:

$$E = 2(\sqrt{2R_H P_H} + U_{OCT}),$$

Напряжение  $U_0$  в рабочей точке

$$U_0 = U_{\text{БЫХм}} + U_{OCT} = 0.5E,$$

Ток  $I_0$  в рабочей точке и максимальное значение  $I_{\max}$ :

$$I_0 = \sqrt{\frac{P_H}{2R_H}} + I_{\min}, \quad I_{\max} = \sqrt{2P_H R_H} + I_{\min}.$$

Если задано  $E$ , то для достижения максимального КПД значение  $R_H$  определяется:

$$R_H = (0.5E - U_{OCT})^2 / 2P_H.$$

Для схем рис.21-7, рис.21-8 в режиме В сопротивление на-

грузки  $R_{\sim}$  плеча равно  $R_H$ , т. к. плечи работают на нагрузку поочередно, необходимое значение  $E$  для обеспечения  $\eta_{\max}$  при заданном  $R_H$ , или необходимое  $R_H$  при заданном  $E$  определяются (рис.21-11):



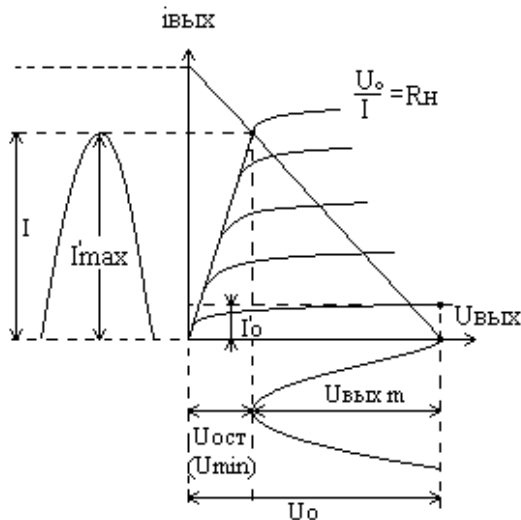


рис.21-11

$$E = 2\left(\sqrt{2R_H P_H} + U_{OCT}\right), \quad R_H = \frac{(0.5E - U_{OCT})^2}{2P_H},$$

$$U_0 = U_{ВВХ m} + U_{OCT} = 0.5E,$$

$$I'_{\max} = \sqrt{\frac{2P_H}{R_H}}.$$

Обычно берут  $I'_0 = (0,04 \div 0,07) I'_{\max}$ .

Значения  $I_{\max}$  и  $I'_{\max}$  не должны превышать допустимых паспортных значений.

Напряжение  $E$  не должно превышать  $(0,8 \div 0,9) U_{КЭ \max}$ . Остальные расчеты — выполняются как для трансформаторных каскадов.

#### 21.5.4. Двухтактный усилитель мощности с операционным усилителем

Рассмотрим двухтактный усилитель мощности с операционным усилителем (рис. 21-12). В схеме использована общая отрицательная обратная связь (резисторы  $R_1$  и  $R_2$ ), охватывающая оба каскада (на операционном усилителе и на биполярных транзисторах), благодаря которой схема создает настолько малые нелинейные искажения, что часто не требует дополнительных цепей смещения для каскада

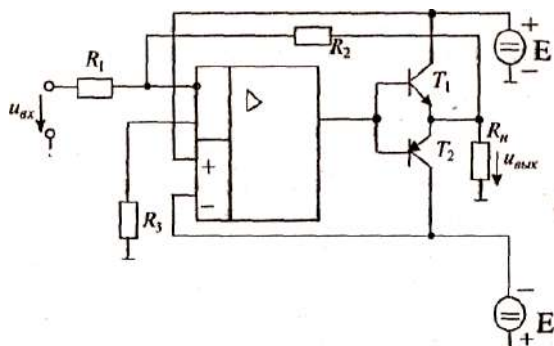


рис. 21-12

на транзисторах  $T_1$  и  $T_2$ . Поскольку напряжение на нагрузке  $R_H$  примерно равно напряжению на выходе ОУ, то мощность на выходе всего усилителя ограничивается выходным напряжением ОУ /1/.

#### Выводы по теме:

1. Усилителем мощности называют усилитель, предназначенный для обеспечения заданной мощности нагрузки  $P_H$  при заданном сопротивлении нагрузки  $R_H$ . Усилитель мощности является примером устройств силовой электроники. Основная цель при разработке таких устройств состоит в том, чтобы от-

дать нагрузке заданную мощность. Усилитель мощности является примером устройств силовой электроники.

2. В устройствах информативной (информационной) электроники, как правило, стремятся снизить мощность обрабатываемых сигналов до такого уровня, при котором помехоустойчивость устройства еще приемлема.

3. Функции устройств информативной электроники все чаще берут на себя микропроцессоры. Но микропроцессоры, естественно, не в состоянии выполнять функции устройств силовой электроники.

4. При разработке мощных усилителей всемерное внимание уделяется повышению коэффициента полезного действия. Другой важной проблемой является уменьшение габаритных размеров и веса усилителя мощности, так как они часто определяют габаритные размеры и вес всего устройства.

5. Уровень нелинейных искажений и КПД усилителя мощности существенно зависят от начального режима работы, причем нелинейные искажения обуславливаются нелинейностью не только входных, но и выходных характеристик транзисторов, так как они работают в режиме большого сигнала. Минимально возможный уровень нелинейных искажений можно обеспечить в режиме класса А, а максимально возможный КПД — в режиме классов В или АВ.

6. Основная особенность работы выходных каскадов — высокий уровень сигналов, что накладывает на них ряд специфических требований.

7. При включении УЭ по схеме с ОЭ получают максимум усиления по мощности; при этом требуется минимум мощности от предоконечного каскада, что удешевляет схему. При включении по схеме с ОБ получают минимум коэффициента гармоник и хорошую стабильность каскада при изменении температуры, нестабильности источника

питания, старении. Но при этом велик входной ток, приходится «умощнять» предоконечный каскад. Включение по схеме с ОК в трансформаторных схемах применяют редко — схема не имеет преимуществ по сравнению с ОБ.

8. Особенности двухтактного каскада мощного усиления:

- компенсация четных гармоник позволяет применять режим В, как более экономичный; применение режима В позволяет лучше использовать УЭ, получая большую мощность при том же уровне  $K_T$ ;
- компенсация помех и фона, поступающих от синфазных источников;
- больший динамический диапазон;
- компенсация постоянного подмагничивания сердечника выходного трансформатора, следовательно, меньше габариты, масса и стоимость трансформатора.

9. Включение  $R_H$  непосредственно в выходную цепь УЭ без выходного трансформатора позволяет устранить вносимые трансформатором частотные, фазовые и нелинейные искажения.

### Контрольные вопросы:

1. Что такое усилитель мощности? Его назначение?
2. В чем различие силовой электроники и мощных устройств информативной (информационной) электроники?
3. Могут ли микропроцессоры выполнять функции устройств силовой электроники?
4. Какие специфические требования предъявляются к выходным каскадам?
5. Перечислите основные виды схем выходных каскадов.
6. Приведите простую схему выходного каскада с RC-цепью. В чем заключаются ее особенности?
7. Приведите схему трансформаторного (дроссельного) выходного каскада. В чем заключаются его особенности?

## 22. Операционные усилители

Операционный усилитель (ОУ) — это высококачественный усилитель, предназначенный для усиления как постоянных, так и переменных сигналов. Ранее такие усилители использовали главным образом в аналоговых вычислительных устройствах для выполнения математических операций (сложения, вычитания и т. д.). Это объясняет происхождение термина «операционный». В настоящее время очень широко используются операционные усилители в виде полупроводниковых интегральных схем. Эти схемы содержат большое число (десятки) элементов (транзисторов, диодов и т. д.), но по размерам и стоимости приближаются к отдельным транзисторам. Оказалось, что операционные усилители очень удобно использовать для решения самых различных задач преобразования и генерирования маломощных сигналов, поэтому эти усилители очень широко используются на практике. При инженерной разработке электронных устройств на основе операционных усилителей полезно иметь представление о внутренней структуре операционных усилителей, особенно об устройстве входных и выходных каскадов, что помогает правильно решать вопросы согласования операционных усилителей с источниками входных сигналов и приемниками преобразованных сигналов. Однако во многих случаях нет необходимости учитывать особенности электронной схемы, реализованной в том или ином операционном усилителе. При этом операционный усилитель рассматривается как «черный ящик», который описывается характеристиками и параметрами, соответствующими токам и напряжениям только внешних выводов. Особенности электрических процессов во внутренних цепях операционного усилителя при таком подходе не учитыва-

ются. Именно поэтому начальные сведения по операционным усилителям даются в начальном разделе курса электроники, в котором изучают электронные приборы (диоды, транзисторы и т. д.).

Вообще следует отметить, что при обращении к тому или иному объекту как электроники, так и других областей науки и техники всегда можно выделить следующие две тенденции. Первая тенденция состоит в стремлении как можно подробнее изучить и учесть внутреннюю структуру и внутренние процессы объекта, а вторая — в стремлении охарактеризовать объект так, чтобы эта структура и эти процессы учитывались как можно меньше. В отношении операционного усилителя можно сказать, что представление его в форме «черного ящика» значительно упрощает анализ электронных схем и обычно дает вполне приемлемые практические результаты /1/.

## 22.1. Операционные усилители. Определения. Структура

В отечественной и зарубежной литературе приняты два варианта определения операционного усилителя:

I. Операционным усилителем (ОУ) называется многокаскадный УПТ с дифференциальным входным каскадом, большим усилением и несимметричным выходом, предназначенный для работы с глубокой ООС.

II. Операционный усилитель — модульный многокаскадный усилитель с дифференциальным входом, по своим характеристикам приближающийся к идеальному усилителю со свойствами:

- 1) Бесконечно большой коэффициент усиления по напряжению ( $K_U = \infty$ );
- 2) Бесконечно большое входное сопротивление ( $Z_{вх} = \infty$ );
- 3) Бесконечно малое выходное сопротивление ( $Z_{вых} = 0$ );
- 4) Равенство  $U_{вых} = 0$  при  $U_{вх1} = U_{вх2}$ ;

5) Бесконечно большая полоса пропускания частот (отсутствие задержки прохождения сигнала).

Практически можно получить достаточно близкое приближение к идеальным параметрам.

Согласно ГОСТ 2-759-82 схема ОУ обозначается прямоугольником (рис.22-1), в верхней части которого изображается равнобедренный треугольник, указывающий направление передачи.

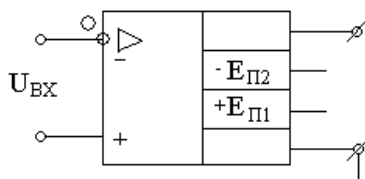


рис.22-1

Другое обозначение  
(рис.22-2):

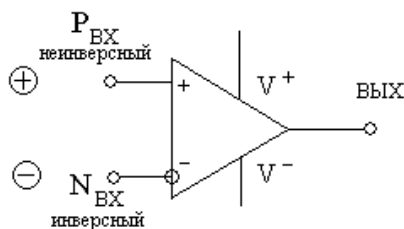


рис.22-2

Оба вывода входов - слева, выход – с противоположной стороны. Один вывод - инвертирующий, обозначается кружком. Другой - неинвертирующий (прямой); с этого

входа сигнал на выход передается без изменения фазы сигнала.

Прямоугольник может быть разграничен на основное поле и дополнительное, на котором показывают назначения выводов (например, питание, коррекции, балансировки нуля и т.д.).

Сигналы могут подаваться не обязательно на оба входа (может быть подан сигнал только на один вход).

Как правило, питание подается от двух ИП с общей точкой.

В операционных усилителях применяется очень глубокая ООС. Чаще всего используют инвертирующий вход.

Структурная схема любого ОУ приведена на рис.22-3:

Первый каскад – всегда дифференциальный усилитель (ДУ) - им определяется входное сопротивление  $R_{вх}$  и другие точностные параметры.

Операционные усилители различаются по числу каскадов (до выходных):

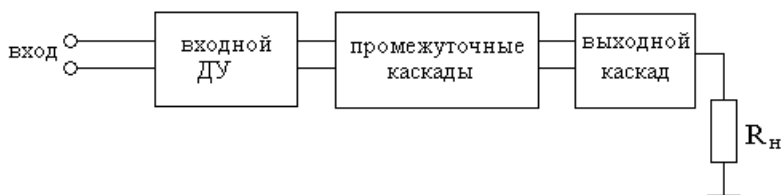


рис.22-3

- двухкаскадные ОУ – один входной ДУ и один промежуточный каскад;

- трехкаскадные ОУ – один входной и два промежуточных - это более совершенные ОУ.

Выходной каскад строится обычно по схеме мощного усилителя в режиме В, обеспечивающей заданную мощность на заданной нагрузке  $R_n$ . При этом, как было показано



в лекции 7, обеспечивается требуемый  $\eta$  и требуемый коэффициент гармоники  $K_r$ .

Вспомогательные (промежуточные) каскады содержат элементы для коррекции ЧХ, каскады сдвига уровня и т.д..

Упрощенная схема ОУ представлена на рис.22-4:

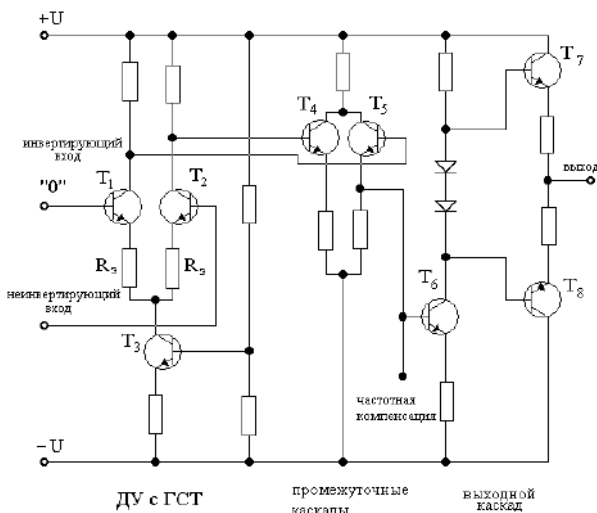


рис.22-4

Резисторы в цепях эмиттеров  $T_1$  и  $T_2$  повышают входное сопротивление  $Z_{вх}$ . Токи коллекторов  $T_1$  и  $T_2$  невелики; входные токи так же малы. Малое усиление, которое при этом получается, восполняется в промежуточных каскадах. Замечания:

1) синфазные сигналы - это сигналы, действующие одновременно и в одной фазе на оба входа.

2) Напряжение сдвига - это некоторое напряжение на выходе при  $U_{вх1} = U_{вх2} = 0$  из-за неточного согласования внутри ДУ, например, напряжений эмиттер – база входных транзисторов (или неточного равенства элементов схемы).

Для снижения чувствительности схемы к синфазным сигналам токи эмиттеров  $T_1$  и  $T_2$  задаются ГСТ (транзистор  $T_3$ ), который имеет высокое  $R_{\text{вых}}$ , поэтому коэффициент усиления ДУ по синфазному сигналу очень мал.

Для уменьшения входного тока  $I_{\text{вх}}$  (и, соответственно, увеличения  $R_{\text{вх}}$ ) в качестве  $T_1$  и  $T_2$  используют пары Дарлингтона или полевые транзисторы. ДУ с полевыми транзисторами имеет более высокое напряжение сдвига, сильно зависящее от температуры, чем у ДУ на биполярных транзисторах. Этот недостаток устраняется за счет ООС.

По «историческому» периоду различают три поколения ОУ:

1) трехкаскадные ОУ - в основном на биполярных транзисторах (далекие от идеальных параметров);

2) трехкаскадные; входные каскады – на составных транзисторах по схеме Дарлингтона (более лучшие показатели);

3) двухкаскадные ОУ на компланарных структурах, на полевых транзисторах - они содержат меньшее число каскадов для увеличения устойчивости.

В первой половине 60<sup>х</sup> годов широко применялась аналоговая вычислительная техника, в которой применялись ОУ для выполнения математических операций: сложение, вычитание, умножение, дифференцирование - отсюда «традиционное» название – ОУ.

Первые промышленные модели ОУ разрабатывались для широкого применения: в них обеспечивался запас по всем параметрам, обеспечивалась универсальность их применения, многоцелевое назначение. Но это давало плохое приближение к идеальным параметрам.

Поэтому сейчас применяются специализированные ОУ (за счет ухудшения одних параметров получают лучшие другие параметры): большое усиление за счет уменьшения полосы; прецизионные (высокоточные) ОУ; малые шумы и

сдвиги нуля; высокое  $R_{вх}$  и т.д.; быстродействующие (скоростные) ОУ;

Отдельный класс ОУ – представляют компараторы.

## 22.2 Схемотехника ОУ

### 22.2.1. Элементарная (упрощенная) схема входного каскада

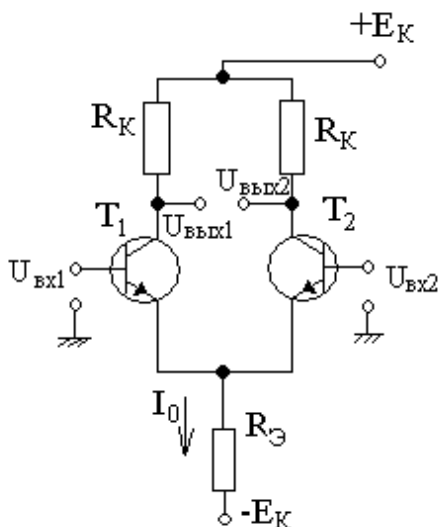


рис.22-5

Схема (рис.22-5) позволяет получить два входа, входное сопротивление  $R_{вх}$  невелико.

Выходные напряжения

$$U_{вых1} = U_{вых2} \cong E_K - \frac{I_0 \cdot R_K}{2}$$

тоже невелики, как и коэффициент усиления  $K_{yc}$ :

$$K_{yc \text{ Дифф}} = -R_k \cdot S_T ;$$

где  $S_T = \frac{I_0}{2 \cdot U_{np-pa}}$ ,

и 
$$K_{yc \text{ синф}} = -\frac{R_K}{\frac{1}{S_T} + R_3}.$$

В схеме сопротивление  $R_3 \approx \infty$  по переменному току и  $K_{\text{синф}} \approx 0$  (симметричный вход) - эти параметры обеспечивает ГСТ.

### **22.2.2. Упрощенная типовая схема входного каскада ОУ первого поколения**

Упрощенная типовая схема входного каскада ОУ 1<sup>го</sup> поколения приведена на рис. 22-6:

Здесь  $R_3, T_3, T_5, R_6$  - это ГСТ, который служит источником смещения. Так как токи транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  малы, падения напряжения на  $R_1$  и  $R_2$  малы. Для сохранения нормального  $U_{\text{вых}}$ , чтобы не применять большие величины  $R_1$  и  $R_2$ , применяется эмиттерный повторитель на транзисторе  $T_4$ .

Усиление этого входного каскада невелико ( $\approx 30 \div 40$  дБ) и необходимы еще дополнительные (промежуточные) каскады.

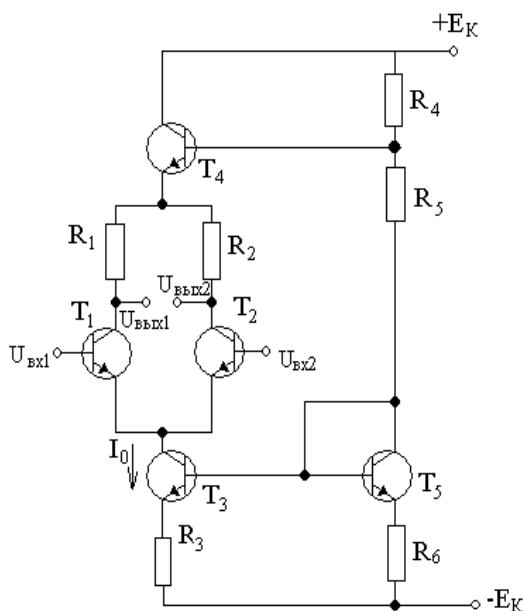


рис.22-6

### 22.2.3. Схема входного каскада ОУ второго поколения

Для увеличения входного сопротивления и улучшения стабильности показателей ОУ разработаны схемы второго поколения, где транзисторы  $T_1$  и  $T_2$  заменяют составными, включенными по схеме Дарлингтона (рис.22-7): Транзисторы  $T_1, T_3$  и  $T_2, T_4$  эквивалентны (каждая пара) одному транзистору с коэффициентом усиления по току:

$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_3 = \beta_2 \cdot \beta_4$$

Входное сопротивление  $R_{вх}$  увеличивается до  $10 \div 20$  МОм при входных токах  $5 \div 10$  наноампер. В этой схеме

недостаточно высокое согласование базовых токов и напряжений.

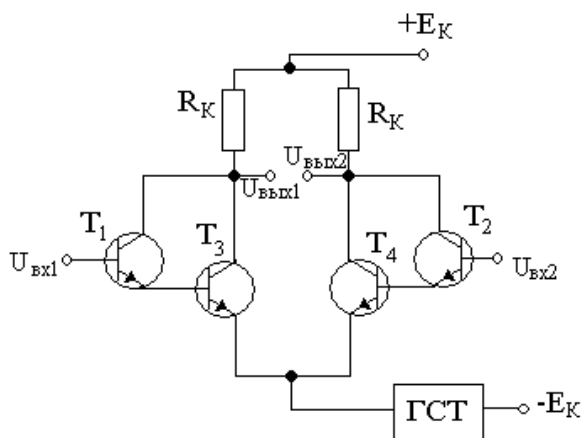


рис.22-7

По этой причине увеличиваются, соответственно, напряжение смещения и температурный дрейф; кроме того, с повышением температуры изменяется значение входного сопротивления.

#### 22.2.4. Схема входного каскада ОУ третьего поколения

- вместо биполярных транзисторов (рис.22-8)

применяются

полевые транзисторы:

$T_1$  и  $T_2$  – полевые транзисторы с р-каналом.  $T_4$  и  $T_5$  – активная нагрузка для  $T_1$  и  $T_2$  (ГСТ);  $R_{ВХ} \approx 10^9 \text{ Ом}$ ;  $I_{ВХ}$  – несколько пикоампер.

Недостатки - плохое согласование характеристик транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ .

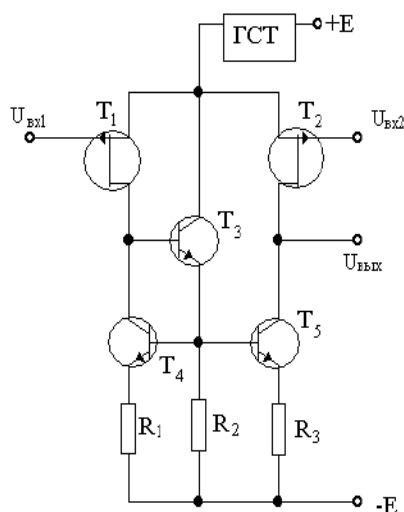


рис. 22-8

### 22.2.5. Промежуточные каскады

- такие же, как и входные, по схемам ДУ.

Отличие: отсутствие ГСТ; симметричный вход и несимметричный выход; их задача - обеспечение уровней сдвига предыдущих каскадов к уровням последующих; дать необходимое усиление.

### 22.2.6. Выходные каскады

К выходным каскадам предъявляются требования:

- большой выходной ток  $I_{вых}$ ;
- большое выходное напряжение  $U_{вых}$ ;
- низкое выходное сопротивление  $R_{вых}$ ;
- малая рассеиваемая мощность в режиме покоя.

Кроме того, выходной каскад должен иметь защиту от короткого замыкания любого из зажимов питания  $E_{\Pi}$  (выходных транзисторов).

Выходные каскады первого поколения - однотактные; второго и третьего поколения - двухтактные, в режиме В. Схема выходного каскада широкого применения приведена на рис.22-9:

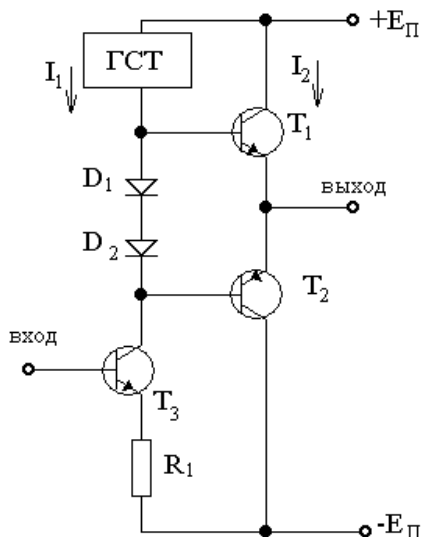


рис.22-9

В режиме покоя ток  $I_2$  протекает через оба транзистора  $T_1$  и  $T_2$  (режим АВ).

При положительной полуволне входного сигнала ток  $I_H$  протекает от источника  $-E_{\Pi}$  через транзистор  $T_2$ .

При обратном направлении входного сигнала транзистор  $T_2$  закрыт, и ток  $I_H$  протекает от источника  $+E_{\Pi}$  через тран-



зистор  $T_1$ . Схема не защищена от короткого замыкания транзисторов  $T_1$  или  $T_2$ .

Схема выходного каскада широкого применения с защитой от короткого замыкания транзисторов  $T_1$  или  $T_2$  приведена на рис.22-10.

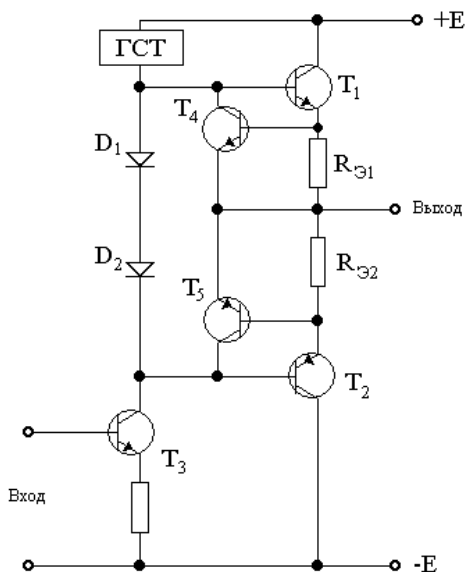


рис.22-10

При нормальной работе транзисторы  $T_4$  и  $T_5$  закрыты: они открываются только при коротком замыкании транзисторов  $T_1$  или  $T_2$  (за счет увеличения их токов и увеличения напряжения на резисторах  $R_{Э1}$  или  $R_{Э2}$ ). При этом часть базового тока транзисторов  $T_1$  или  $T_2$  ответвляется через транзисторы  $T_4$  или  $T_5$  до безопасной величины.

### 22.3. Основные параметры ОУ

ОУ имеют десятки параметров.

Основные:

1) Коэффициент усиления дифференциального напряжения:

$$K_{\text{д}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх д}}}$$

где  $\Delta U_{\text{вх д}} = U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}$  - изменение (разность) входных напряжений (между двумя входами).

Коэффициент усиления дифференциального напряжения идентичен коэффициенту усиления по напряжению ОУ без обратной связи. Это объясняется тем, что при усилении дифференциальных сигналов ООС за счет резистора эмиттерной связи в дифференциальном каскаде (ДК) не возникает (т.к. переменная составляющая эмиттеров протекает по  $R_{\text{Эс}}$  в противоположных направлениях).

2) Коэффициент усиления синфазного напряжения:

$$K_{\text{сф}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх сф}}},$$

где  $\Delta U_{\text{вхсф}}$  - это изменение  $\frac{\Delta(U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}})}{2}$  при  $U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх2}}$ .

$K_{\text{сф}}$  обычно невелик, так как токи эмиттеров входных транзисторов протекают по  $R_{\text{Э}}$  в одном направлении (для синфазных сигналов) и возникает глубокая ООС, снижающая  $K_{\text{сф}}$  во много раз.

3) Коэффициент относительного ослабления синфазных сигналов (КОСС):

$$K_{оос}(дБ) = 20 \cdot \lg(K_{д}/K_{сф})$$

– основной параметр ДК, входящего в состав ОУ, характеризующий способность ослаблять (не усиливать) сигналы, приложенные к обоим входам одновременно (синфазные).

Для коэффициента усиления синфазного напряжения  $K_{сф}$  условие  $U_{вх1} = U_{вх2}$  в абсолютном значении не выполняется, так как резисторы, транзисторы не подобраны точно, и появляется разность коллекторных напряжений  $U_{к1}-U_{к2}$ . Этот эффект минимизируется, но никогда не устраняется. Соответственно, при несимметричном выходе всегда будет  $U_{вых} \neq 0$  при  $U_{вх1} = U_{вх2}$  (даже при симметричном входе). Усиленная разность и характеризуется  $K_{сф}$ , который должен быть минимален (а  $K_{оос}$ , соответственно, должен быть максимален).

4) Входное напряжение сдвига  $U_{сдв}$  – следствие неточного согласования напряжений базы – эмиттер входных транзисторов. В результате появляется напряжение на выходе (при  $U_{вх1} = U_{вх2}$ ). Обычно  $U_{сдв}$  составляет несколько милливольт.

5) Входной ток смещения  $I_{см}$  – это требуемый ток базы, который должен быть обеспечен для работы входного транзистора.

6) Входной ток сдвига  $I_{сдв}$  – это разность токов смещения из-за не идентичности входных транзисторов.  $I_{сдв} = I_{см1} - I_{см2}$  (обычно  $1 \div 10$  наноампер) или  $I_{сдв} = (I_{см1} + I_{см2})/2$ .

7) Входное сопротивление  $> 10 \div 100$  МОм.

а) дифференциальное сопротивление  $R_{вх}$  между входами «вх1» и «вх2»;

б) синфазное сопротивление  $R_{вх}$  – это сопротивление между входом «вх1» (или «вх2») и корпусом (землей):

$$R_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вхсф}} / \Delta I_{\text{вхсф}}.$$

8) Выходное сопротивление  $R_{\text{вых}} \approx$  несколько ( $10^1 - 10^2$ ) Ом.

9) Ширина полосы пропускания – диапазон частот, на которых коэффициент усиления по напряжению ОУ уменьшается на 3дБ (0,707) по отношению к коэффициенту по постоянному току. Различается ширина полосы: с ООС и без ООС (вторая значительно меньше первой).

10) Частота единичного усиления  $f_u$  – это частота, на которой  $K_d = 1$  (без ООС). Обычно  $f_{uT} \cong 1 \div 10$  МГц.

11) Переходная характеристика выражается через время установления  $t_y$  от 0,1 до 0,9 при подаче на вход единичного сигнала (или время нарастания, или время установления выходного сигнала).

12) Коэффициент неустойчивости источника питания; величина потребляемого тока; рабочий диапазон температур; температурные коэффициенты и т.д.

Параметры разделяют:

- точностные (определяются входными каскадами);
- входные и выходные параметры;
- энергетические (токи, мощность);
- частотные;
- предельно допустимые.

## 22.4. Схемы сдвига уровней

Схемы сдвига уровней (рис.22-11) применяют для межкаскадных связей. Так как ИМС выполняются без разделительных конденсаторов, то в цепях межкаскадных связей иногда требуется гасить уровень напряжения на некоторую величину (для согласования). В то же время, эта цепь

должна передавать полезный сигнал (переменную составляющую).

Простая схема сдвига - стабилитрон. Однако он приводит к уменьшению входного сопротивления, а его фиксированное напряжение  $U_{\text{порог}}$  нарушает работоспособность при изменении напряжения питания  $E_{\text{п}}$ .

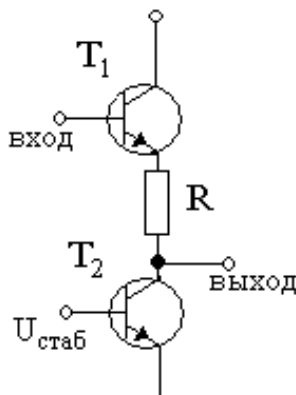


рис.22-11

Наиболее распространенная схема - рис.22-11: транзистор  $T_1$  - эмиттерный повторитель, который обеспечивает большое увеличение входного сопротивления. В его эмиттерную цепь включен делитель  $R$ ,  $T_2$ ; транзистор  $T_2$  - это ГСТ; его внутреннее сопротивление  $R_i \gg R$ , т.е. делитель незначительно ослабляет напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$ , зато получается необходимое согласование уровней «вход - выход».

### Выводы по теме

1. Операционный усилитель – модульный многокаскадный усилитель с дифференциальным входом, по своим характеристикам приближающийся к идеальному усилителю

со свойствами: бесконечно большой коэффициент усиления по напряжению ( $K_U = \infty$ ); бесконечно большое входное сопротивление ( $Z_{вх} = \infty$ ); бесконечно малое выходное сопротивление ( $Z_{вых} = 0$ ); равенство  $U_{вых} = 0$  при  $U_{вх1} = U_{вх2}$ ; бесконечно большая полоса пропускания частот (отсутствие задержки прохождения сигнала). Практически можно получить достаточно близкое приближение к идеальным параметрам.

2. Первый каскад – всегда дифференциальный усилитель - им определяется входное сопротивление и другие точностные параметры.

3. Промежуточные каскады строятся по тем же схемам, что и входные, по схемам ДУ. Отличие: отсутствие ГСТ; симметричный вход и несимметричный выход; их задача - обеспечение уровней сдвига предыдущих каскадов к уровням последующих; дать необходимое усиление.

4. Выходной каскад строится обычно по схеме мощного усилителя в режиме В, обеспечивающей заданную мощность на заданной нагрузке.

5. Для увеличения входного сопротивления и улучшения стабильности показателей ОУ разработаны схемы второго поколения, где входные транзисторы заменяют составными, включенными по схеме Дарлингтона.

6. К выходным каскадам предъявляются требования: большой выходной ток; большое выходное напряжение; низкое выходное сопротивление; малая рассеиваемая мощность в режиме покоя. Кроме того, выходной каскад должен иметь защиту от короткого замыкания любого из зажимов питания  $E_{П}$  (выходных транзисторов).

Выходные каскады первого поколения - одноктактные; второго и третьего поколения - двухтактные, в режиме В.

7. Схемы сдвига уровней применяют для межкаскадных связей. Так как ИМС выполняются без разделительных конденсаторов, то в цепях межкаскадных связей иногда

требуется гасить уровень напряжения на некоторую величину (для согласования).

### Контрольные вопросы

1. Приведите два варианта определения операционного усилителя;
2. Приведите варианты условного обозначения операционного усилителя;
3. Приведите структурную схему ОУ;
4. Чем отличаются структурные схемы ОУ? Какие требования предъявляются к каскадам ОУ?
5. Приведите упрощенную схему ОУ;
6. Какие «исторические» периоды различают в развитии схемотехники ОУ и дайте им характеристику;
7. Приведите элементарную (упрощенную) схему входного каскада;
8. Приведите упрощенную типовую схему входного каскада ОУ первого поколения;
9. Приведите схему входного каскада ОУ второго поколения;
10. Приведите схему входного каскада ОУ третьего поколения;
11. Чем отличаются схемы промежуточных каскадов?
12. Какие требования предъявляются к выходным каскадам ОУ?
13. Приведите схему выходного каскада широкого применения;
14. Приведите схему выходного каскада широкого применения с защитой от короткого замыкания;
15. Приведите основные параметры ОУ;
16. Приведите схему сдвига уровней; ее назначение?

## 23. Схемотехника аналоговых устройств на основе операционных усилителей

Как уже отмечалось, операционные усилители в настоящее время используются в самых различных электронных устройствах. Их широко применяют как в аналоговых, так и в импульсных устройствах электроники. В то же время существуют и часто используются типовые линейные схемы на основе операционных усилителей. Такие типовые схемы должен знать каждый инженер, использующий электронные устройства. Именно такие схемы рассматриваются ниже.

Очень полезно овладеть достаточно простыми приемами ручного анализа электронных схем на основе операционных усилителей. Это значительно облегчит понимание принципа действия конкретных устройств электроники и будет способствовать получению достоверных результатов машинного анализа. Указанные приемы анализа основаны на ряде допущений, принимаемых в предположении, что используемые операционные усилители достаточно близки к идеальным. Практика расчетов показывает, что результаты, получаемые на основе допущений, имеют вполне приемлемую погрешность  $/1/$ .

Примем следующие допущения:

1. Входное сопротивление операционного усилителя равно бесконечности, токи входных электродов равны нулю. Выходное сопротивление операционного усилителя равно нулю, т. е. операционный усилитель со стороны выхода является идеальным источником напряжения.

3. Коэффициент усиления по напряжению (коэффициент усиления дифференциального сигнала) равен бесконечности.



4. В режиме насыщения напряжение на выходе равно по модулю напряжению питания, а знак определяется полярностью входного напряжения.

5. Синфазный сигнал не действует на операционный усилитель.

6. Напряжение смещения нуля равно нулю.

### 23.1. Инвертирующий усилитель

Так как ОУ имеет большой коэффициент усиления  $K_{УС}$ , то даже малое входное напряжение  $U_{ВХ.дифф.}$  из-за асимметрии или из-за нестабильности способно перегрузить ОУ, вызвать смещение или сдвиг постоянного напряжения на выходе  $U_{ВЫХ.}$  от 0 до  $U_{МАХ.}$ , что может привести к режиму насыщения и к потере способности усиления. Вследствие этого в ОУ всегда применяется ООС, которая обеспечивает хорошую стабильность показателей.

Одна из базовых схем ОУ - схема инвертирующего усилителя с внешней ОС (рис.23-1). На основе этой схемы строятся все остальные.

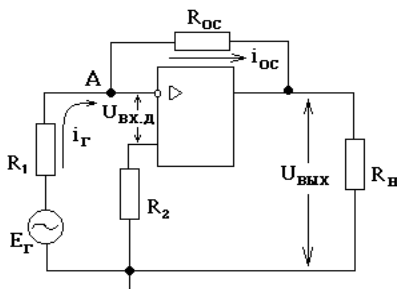


рис.23-1

На схеме не показаны цепи питания и другие дополнительные цепи. Входной сигнал подается на инвертирующий вход. Выходной сигнал  $U_{\text{ВЫХ}}$  находится в противофазе с входным  $U_{\text{ВХ}}$ ;  $R_1$  - внутреннее сопротивление генератора  $E_{\Gamma}$  ( $R_{\Gamma}$ ). Неинвертирующий вход соединен через  $R_2$  с корпусом. Через  $R_{\text{ОС}}$  подается параллельная ООС по напряжению.

Предположим, что ОУ - идеальный:  $\Delta U_{\text{ВХ.Д.}} = 0$ ,  $K_{\text{Д}} = \infty$ ,  $R_{\text{ВХ.Д.}} = \infty$ ,  $R_{\text{ВЫХ}} = 0$ ,  $I_{\text{ВХ.Д.}} = 0$ . Так как  $U_{\text{ВХ.Д.}} = 0$ , то все напряжение от  $E_{\Gamma}$  падает на  $R_1$ ; а  $U_{\text{ВЫХ}}$  - на  $R_{\text{ОС}}$ ; таким образом, точка А - это «точка виртуального нуля», «кажущийся нуль»

Тогда

$$I_{\Gamma} = I_{\text{ОС}}; \text{ или } \frac{E_{\Gamma}}{R_1} = -\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ОС}}},$$

или коэффициент усиления инвертирующего усилителя (с ООС!) по напряжению:

$$K_{U_{\text{ИНВ.}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E_{\Gamma}} = -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}$$

(что соответствует выражению для усилителя с параллельной ООС по напряжению в общем виде), т.е.

$K_{U_{\text{ИНВ.}}}$  зависит только от  $R_{\text{ОС}}$  и  $R_1$  и не зависит от самого ОУ.

Для реального ОУ необходим учёт входного тока  $I_{\text{ВХ}}$  ОУ, т.е. если

$$I_{\Gamma} = I_{\text{ОС}} + I_{\text{ВХ}},$$

то

$$K_{U\text{ инв.}} = \frac{-R_{OC}/R_1}{1 + \frac{1}{K_{UOY}} \cdot \left(1 + \frac{R_{OC}}{R_1} + \frac{R_{OC}}{R_{BXOY}}\right)}$$

где  $K_{UOY}$  - коэффициент усиления ОУ без ООС;  
Т.е. чем больше  $R_{BXOY}$  и  $K_{UOY}$ , тем больше приближение к «идеальному» соотношению

$$K_{U\text{ инв.}} = -\frac{R_{OC}}{R_1}.$$

Например, если  $K_{UOY} = 10^5$ ;  $R_{BXOY} = 10$  кОм;  $R_{OC} = 100$  кОм;  $R_1 = 1$  кОм; погрешность составляет  $< 0.1\%$ .

Номиналы резисторов не должны превышать единицы МОм, иначе проявляется нестабильность из-за утечек в корпусе и т.д. Но расчётное значение  $R_{OC}$  часто требуется более 1 МОм. Для его снижения применяют схему (рис.23-2):

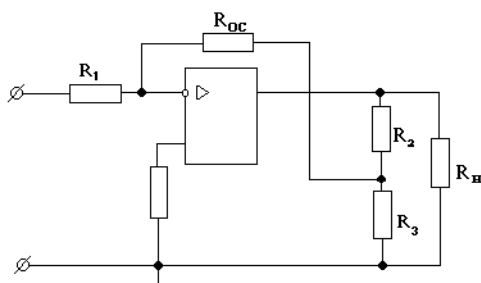


рис.23-2

Для этой схемы

$$R_{OC \text{ ЭКВ.}} = R_{OC} + R_2 \cdot \left(1 + \frac{R_{CB}}{R_3}\right)$$

и большое значение  $R_{OC \text{ ЭКВ.}}$  можно получить при меньшем значении  $R_{OC}$ .

Входное сопротивление  $R_{BX. \text{ ИНВ.}}$  инвертирующего усилителя невелико из-за параллельной ООС.

$$R_{BX. \text{ ИНВ.}} = R_1 + \left[\frac{R_{OC}}{K_{U \text{ ОУ}}} + 1\right] \parallel R_{BX. \text{ ОУ}} \approx R_1,$$

т.е. при больших значениях  $K_{U \text{ ОУ}}$   $R_{BX. \text{ ИНВ.}}$  определяется величиной  $R_1$ . Рекомендуется значение  $R_1 \approx 23 \text{ кОм}$ .

Выходное сопротивление  $R_{ВЫХ. \text{ ИНВ.}}$  невелико и определяется глубиной ООС.

$$R_{ВЫХ. \text{ ИНВ.}} = \frac{R_{ВЫХ. \text{ ОУ}}}{F \text{ (глубина ООС)}}$$

или

$$R_{ВЫХ. \text{ ИНВ.}} = \frac{R_{ВЫХ. \text{ ОУ}} \cdot K_{U \text{ ИНВ.}}}{K_{U \text{ ОУ}} \text{ (без ООС)}}$$

Полоса пропускания ОУ тем шире, чем меньше  $K_{U \text{ ИНВ.}}$  (рис.23-3):

$$f_{B.OC} = \frac{f_T}{K_{U \text{ ИНВ.}}}$$

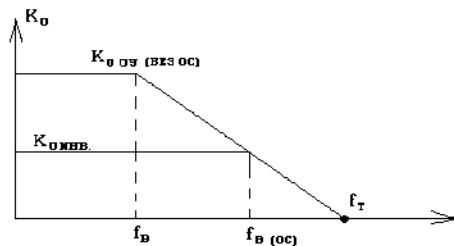


рис.23-3

Из выражения  $K_{U\text{ИНВ}} = -\frac{R_{OC}}{R_1}$  видно, что изменять  $K_{U\text{ИНВ}}$  можно за счёт изменения  $R_1$  и  $R_{OC}$ . Но, так как  $R_1$  определяет  $R_{ВХ}$ , то желательно  $K_{U\text{ИНВ}}$  изменять за счёт  $R_{OC}$ .

## 23.2. Неинвертирующий усилитель

Входной сигнал подается на неинвертирующий вход. ООС подается на инвертирующий вход (рис.23-4). Т.е. ООС является последовательной (по току) по входу и параллельной (по напряжению) по выходу.

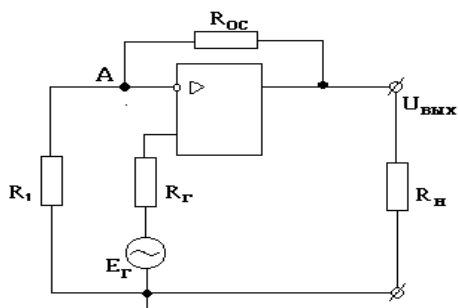


рис.23-4

Для идеального ОУ:

$$U_{BX} = U_{BЫX} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{OC}} ,$$

откуда

$$K_{U\text{НЕИНВ.}} = 1 + \frac{R_{OC}}{R_1} \quad \text{или} \quad K_{U\text{НЕИНВ.}} = 1 + |K_{U\text{ИНВ.}}|$$

- соотношения справедливы при глубокой ОС ( $F > 0$ ), что имеет место практически.

Получение значения  $R_1 + R_{OC} \approx (0,5 \div 1)$  МОм реально. Если  $R_{OC} > 1$  Мом, то необходимо применять Т-образную цепочку включения (см. рис.23-2).

Входное сопротивление  $R_{ВХ.НЕИНВЕР.}$  всегда велико:

$$R_{ВХ.НЕИНВЕР.} = \frac{R_{ВХ.ОУ} \cdot K_{УОУ}}{K_{U\text{НЕИНВЕР.}}}$$

или  $R_{ВХ.НЕИНВЕРТ.} = R_{ВХ.ОУ} F$ .

Обычно  $R_{ВХ.} = n$  ГигаОм. Так как ООС - по напряжению, то  $R_{ВЫХНЕИНВЕРТ.}$  составляет несколько десятков Ом.

### 23.3. Дифференциальный усилитель

Дифференциальный усилитель (ДУ), как и дифференциальный каскад (ДК) предназначен для усиления разности  $\Delta U_{ВХ}$ , но в отличие от ДК он охвачен глубокой ООС (рис.23-5).

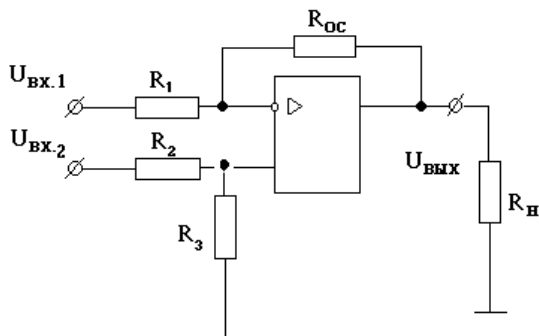


рис.23-5

Входные напряжения  $U_{ВХ.1}$  и  $U_{ВХ.2}$  подаются относительно земли.

Схема является сочетанием инвертирующего и неинвертирующего усилителей, причём для выравнивания коэффициентов усиления напряжение  $U_{ВХ.2}$  подается через делитель  $R_2$  и  $R_3$ , т.е. оба входа имеют входные делители.

Для идеального усилителя  $R_{ВХ.д.} = \infty$ ,  $R_{ВЫХ} = 0$ .

Если

$$\frac{R_{OC}}{R_1 + R_{OC}} = \frac{R_3}{R_3 + R_2} \quad \text{или} \quad \frac{R_1}{R_{OC}} = \frac{R_2}{R_3},$$

то  $K_{U \text{ инв.}} = K_{U \text{ неинв.}}$ .

При этом:

$$U_{ВЫХ} = (U_{ВХ2} - U_{ВХ1}) \cdot \frac{R_{OC}}{R_1}, \text{ т.е. } K_u = \frac{R_{OC}}{R_1}.$$

Отсюда следует, что при  $U_{ВХ.1} = U_{ВХ.2}$  имеем  $U_{ВЫХ} = 0$ , т.е. схема нечувствительна к синфазной помехе (к наводкам).

Для идеального (симметричного) усилителя коэффициент ослабления  $K_{ООС} = \infty$  (для синфазного сигнала).

Для реальной ситуации при  $U_{ВХ.1.} = U_{ВХ.2} = U_{ВХ.СФ.}$

$$K_{ООС} = \frac{R_{ОС.}}{R_1} = \frac{U_{ВХ.СФ.}}{U_{ВЫХ}} \approx \infty$$

(для соединённых вместе входа 1 и входа 2).

## 23.4. Устройства суммирования и вычитания

Устройства аналоговой обработки сигналов и их преобразования находят самое широкое распространение в современной р/электронике.

Практически все устройства - активные, т.е. с применением ОУ и соответствующей цепи ОС.

### 23.4.1. Инвертирующий сумматор

построен на основе инвертирующего усилителя (рис.23-6):

Для идеального ОУ  $K_{д} = \infty$ ,  $R_{ВХ.д.} = \infty$ ; при этом

$$I_{ОС} = I_1 + I_2 + I_3$$

$$\text{или } U_1 / R_1 + U_2 / R_2 + U_3 / R_3 = - \frac{U_{ВЫХ}}{R_{ОС}};$$

$$\text{откуда } U_{ВЫХ} = -R_{ОС} \cdot \left( \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} \right)$$



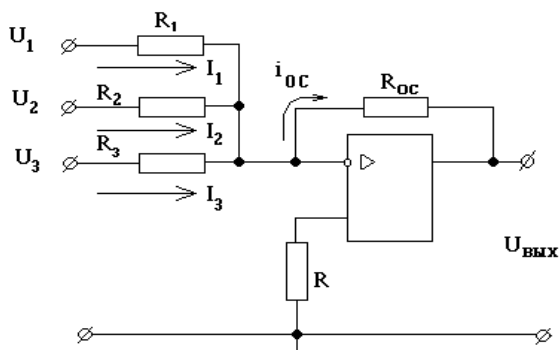


рис.23-6

т.е. на выходе имеем инвертированную сумму входных напряжений, взятых с соответствующими масштабными коэффициентами.

При  $R_1 = R_2 = R_3$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(U_1 + U_2 + U_3) \cdot \frac{R_{\text{OC}}}{R_1}.$$

Резистор R предназначен для компенсации сдвига нуля на выходе ОУ, обусловленного входным током  $I_{\text{ВХ}}$ . Выбирают  $R = [R_{\text{OC}} \parallel R_1 \parallel R_2 \parallel R_3]$ , параллельно соединенные.

#### 23.4.2. Сумматор на основе неинвертирующего усилителя

Для схемы рис. 23-7:

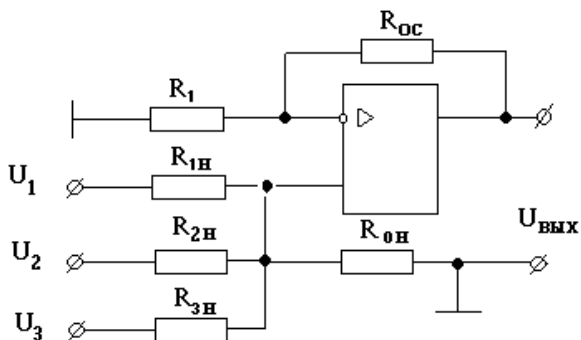


рис.23-7

$$U_{\text{вых}} = K \cdot (K_{1H} \cdot U_1 + K_{2H} \cdot U_2 + K_{3H} \cdot U_3),$$

где

$$K = 1 + \frac{R_{OC}}{R_1}$$

$$K_{1H} = \frac{R_{OCT1}}{R_{1H} + R_{OCT1}} = \frac{R_{\Sigma}}{R_{1H}}, \quad R_{\Sigma} = R_{0H} \parallel R_{1H} \parallel R_{2H} \parallel R_{3H}$$

$R_{OCT.1}$  -это общее сопротивление  $R_{\Sigma}$  параллельного соединения резисторов без  $R_{H1}$ .

### 23.5. Интегрирующий усилитель

Операция интегрирования широко применяется при обработке электрических сигналов.

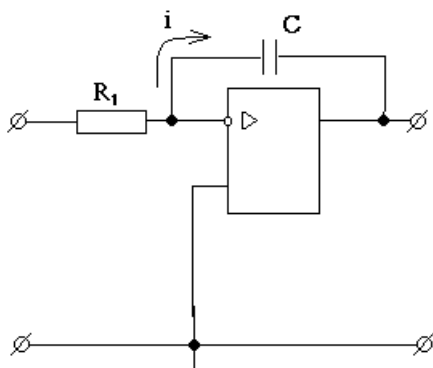


рис.23-8

Вместо  $R_{OC}$  в цепи обратной связи ставится конденсатор (рис.23-8). Для идеального ОУ ( $K_D = \infty$ ,  $R_{BX.D.} = \infty$ ) весь ток  $I_{BX}$  течет через конденсатор  $C$ . Так как  $U_{BX.D.} = 0$ , то

$$i = \frac{U_{BX}}{R_1}; \quad U_{BBLX} = -U_C; \quad U_C = \frac{1}{C} \int_0^t I_C \cdot dt; \quad U_{BBLX} = -\frac{1}{R_1 \cdot C} \int_0^t U_{BX}(t) dt$$

Эквивалентная постоянная времени интегрального усиления  $\tau_{ЭКВ.} = K_D \cdot C \cdot R_1$  в  $K_D$  раз больше, чем  $C \cdot R_1$ ; т.е. наличие ОУ эквивалентно увеличению в  $K_D$  раз величины  $C$ , т.е. фактическую величину  $C$  можно в  $K_D$  раз уменьшить (сказывается *эффект Миллера*).

[примечание: эффект Миллера обусловлен тем, что на вход транзистора действует одновременно и  $U_{BX}$  и  $U_{ВЫХ}$ . При этом увеличивается  $C_{BX} = C_{БЭ} + C_K(1+K_0)$ ].

Такой интегрирующий усилитель называют интегратором Миллера: он состоит из ОУ и резистора  $R_1$  и ёмкости Миллера  $C_M = C \cdot (1 + K_D)$ .

Соответственно

$$U_{\text{ввЛХ Д}} = \frac{1}{R_1 \cdot C_M} \int_0^t U_{\text{вХ}}(t) dt .$$

Если в инвертирующем интеграторе сделать несколько входов с резисторами  $R_1, R_2, R_3$ , то получим интегрирующий сумматор.

### 23.6. Дифференцирующий усилитель

построен на основе инвертирующего усилителя.  
Для идеального ОУ (рис.23-9):

$$U_{\text{вхД}} = 0;$$

$$U_{C1} = U_{\text{вх}}$$

$$I_{\text{вхД}} = 0$$

Тогда 
$$I_{\text{вх}} = I_{c1} = C_1 \cdot \frac{dU_{C1}}{dt},$$

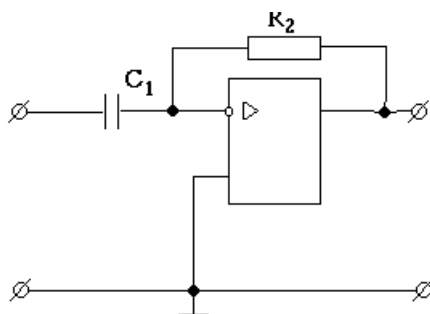


рис.23-9

а выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_2 \cdot i_{\text{ВХ}} = -R_2 \cdot C_1 \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}.$$

Это - формула для пассивной цепи. С учётом усиления ОУ  $R_2$  больше, так как постоянная времени  $\tau_{\text{ЭКВ}} = C_1 R_{\text{ЭКВ}}$ ;

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_2}{1 + K_{\text{Д}}}.$$

Рассмотренная схема имеет недостатки:

1. низкое  $R_{\text{ВХ}}$  на ВЧ из-за  $C_1$ .
2. повышенный уровень шумов из-за большого  $K_{\text{Д}}$ .
3. главный недостаток – склонность к самовозбуждению: из-за цепи  $R_2, C_1$  фаза поворачивается до  $-180^\circ$ . При этом возникает самовозбуждение.

Для устранения недостатков последовательно с  $C_1$  включают дополнительный резистор  $R_1$  (рис.23-10):

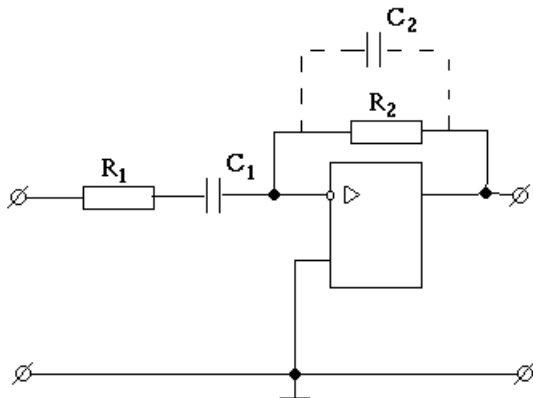


рис.23-10

В результате коэффициент передачи ограничивается

величиной  $R_2/R_1$ . С целью снижения шумов на выходе ОУ параллельно  $R_2$  устанавливают  $C_2$ , в результате чего снижается усиление на ВЧ.

### 23.7. Логарифмический и антилогарифмический усилители

В логарифмическом усилителе  $U_{\text{ВЫХ}}$  (примерно) пропорционально  $\lg U_{\text{ВХ}}$ .

В антилогарифмическом усилителе (экспоненциальном)  $U_{\text{ВХ}}$  (примерно) пропорционально  $\lg U_{\text{ВЫХ}}$ .

Первые применяют для перевода в дБ, сжатия динамического диапазона, которое применяется для регистрации сигналов, уровень которых изменяется в широких пределах.

Вторые (и первые) применяют в быстродействующих устройствах возведения в степень, перемножения и деления сигналов.

Логарифмический и антилогарифмический усилители строят по инвертирующей схеме с применением нелинейной ОС. В качестве нелинейного элемента используют р-п переход, например диод (рис.10-11).

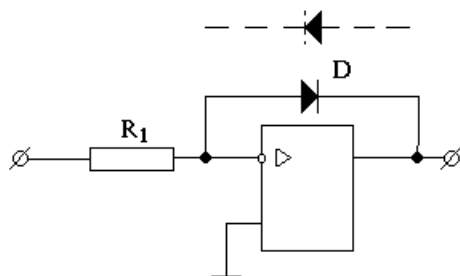


рис.23-11

Ток диода

$$i_{\text{д}} = I_{\text{ОБР}} \cdot \exp\left[\left(\frac{U_{\text{д}}}{\varphi_T}\right) - 1\right],$$

где  $I_{\text{ОБР}}$  - тепловой ток насыщения закрытого перехода;  
 $\varphi_T = kT/q \approx 26$  мВ – температурный потенциал.

Для открытого состояния диода при  $U_{\text{д}} > 100$  мВ,  $i_{\text{д}} > 50 I_{\text{ОБР}}$  можно принять

$$i_{\text{д}} = I_{\text{ОБР}} \cdot \exp\left(\frac{U_{\text{д}}}{\varphi_T}\right),$$

или

$$U_{\text{д}} = \varphi_T \cdot \ln(i_{\text{д}} / I_{\text{ОБР}}).$$

Полагая ОУ идеальным, получаем:  $i_{\text{д}} = U_{\text{ВХ.Д.}} / R_1$ ,  
и тогда

$$U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{д}} = -\varphi_T \cdot \ln\left(\frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1 \cdot I_{\text{ОБР}}}\right).$$

Сплошная характеристика (рис.23-12) – реальная; пунктир – идеальная характеристика. Они совпадают лишь в диапазоне  $U_{\text{ВХ.1}} \dots U_{\text{ВХ.2}}$ , который определяет динамический диапазон логарифмирования

$$D = \frac{U_{\text{ВХ.2}}}{U_{\text{ВХ.1}}}.$$

Для сжатия динамического диапазона знакопеременных входных сигналов применяют двухсторонний логарифмический преобразователь (рис.23-13).

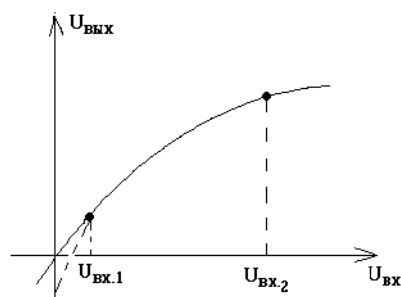


рис.23-12

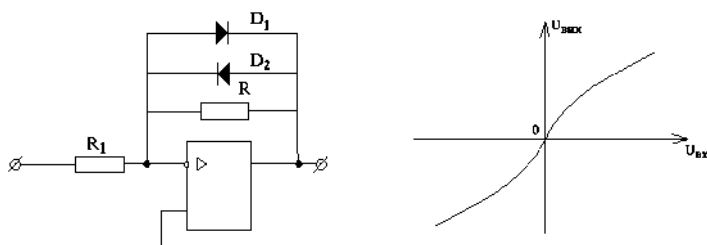


рис.23-13

Его передаточная характеристика симметрична относительно начала координат. Наклон характеристик определяется соотношением  $R_2/R_1$ .  $R_2$  действует на слабых сигналах, когда  $r_d$  велико - уменьшает сдвиг нуля выходного напряжения ОУ и нестабильность усиления, так как увеличивается глубина ООС.

Логарифмирование осуществляется точнее, если вместо диода использовать эмиттерный переход транзистора по схеме с ОБ (рис. 23-14):  $U_{\text{вых}} = U_d(\text{Э-Б})$  (открытый переход). При этом  $i_{\text{Э}} = i_{\text{К}} = i_{R1}$ .



В зависимости от полярности входной сигнала должен быть транзистор или р-п-р или n-р-n типа (рис.23-14):

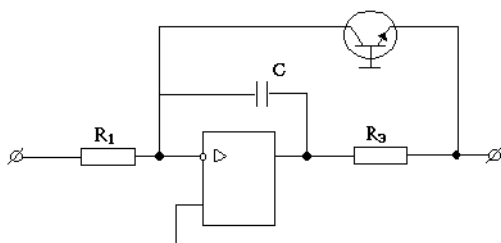


рис.23-14

Коллекторная нагрузка – параллельное соединение резисторов  $R_1 \parallel R_{ВХ.Д.}$ . Резистор  $R_3$  устанавливается для повышения устойчивости ОУ за счет снижения коэффициента усиления в цепи ОС; конденсатор  $C$  устанавливается для компенсации фазовых сдвигов, возникающих за счет  $C_{ВХ}$  ОУ.

Резистор  $R_3$  одновременно защищает ОУ от перегрузки.

В антилогарифмическом усилителе диод или транзистор включают вместо резистора  $R_1$  на входе ОУ (рис.23-15):

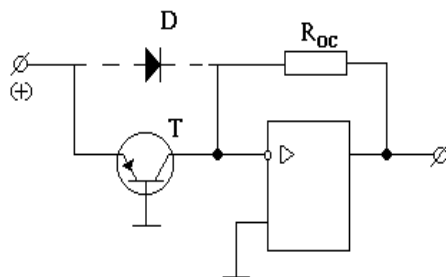


рис.23-15

Для идеального ОУ

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{ОС}} \cdot I_0 \cdot \exp\left(\frac{U_{\text{Д}}}{\varphi_T}\right)$$

- экспонента от  $U_{\text{ВХ}}$ .

Если на входе действует сигнал отрицательной полярности, то транзистор должен быть n-p-n типа (а диод развернут).  $R_{\text{ВХ}}$  антилогарифмического усилителя равно  $r_{\text{диода}}$  открытого перехода, т.е. очень низкое.

## 23.8. Перемножители и делители на ОУ

### 23.8.1. Аналоговый умножитель

- это устройство, в котором выходной сигнал пропорционален произведению двух входных сигналов:

$$Z = K \cdot X \cdot Y,$$

где  $K$  – масштабный коэффициент устройства умножения. В большинстве случаев выбирают так, чтобы

$$Z = \frac{X \cdot Y}{10},$$

т.е.  $K=0,1$ .

Для того, чтобы полярность  $Z$  определялась полярностями  $\pm X$  и  $\pm Y$ , соответствующее построение умножителя называется четырёхквadrантным.

В реальном умножителе величина  $Z$  связана с величинами  $X$  и  $Y$  соотношением

$$Z = K \cdot X \cdot Y + K_X \cdot X + K_Y \cdot Y + K_0,$$

где  $K$  - коэффициент передачи умножителя (масштабный коэффициент);  $K_X$ ,  $K_Y$  - постоянные, определяющие смещения, зависящие от  $X$  и  $Y$ ;  $K_0$  - начальное смещение. Т.о., в умножителе высокой точности должно быть не менее 4-х подстроек для приближения к нулю трех

постоянных, которые характеризуют смещение и установления требуемого коэффициента передачи.

### 23.8.2. Применение аналоговых умножителей

Аналоговый умножитель - это универсальный базовый блок, выполняющий ряд математических операций (умножение, деление, возведение в квадрат, извлечение корня) – рис.23-1.

Функциональные возможности умножителя реализуются путем использования его с ОУ.

Операция деления выполняется путём включения умножителя в цепь ОС ОУ таким образом, чтобы выходной сигнал умножителя совместно с одним из входных сигналов подаётся на суммирующий вход ОУ, благодаря чему выходной сигнал умножителя становится равным этому входному сигналу. Для идеального ОУ в т. А  $i_z = i_{ос}$ . При этом

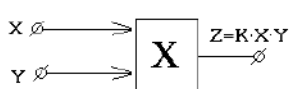
$$i_{ос} = \frac{K \cdot X \cdot Y}{R}, \quad i_z = \frac{Z}{R}; \quad \text{тогда} \quad Y = \frac{Z}{K \cdot X}.$$

Точно также получаем  $Y = \sqrt{\frac{Z}{K}}$  для схемы г) извлечения корня.

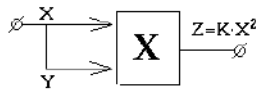
Внимание: 1) схемы делителя и извлечения корня устойчивы, если  $X$  «отрицательно», а  $Z$  – «положительно», т.е. необходимы меры против возникновения ПОС и самовозбуждения;

2) для устройства деления погрешность обратно пропорциональна  $X$ ; отсюда следует, что по мере уменьшения  $X$  погрешность быстро увеличивается, что ограничивает динамический диапазон.

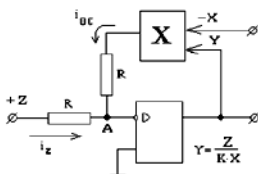
Схема устройства вычисления среднеквадратичного значения (рис.23-16 д) содержит умножитель и интегратор на основе ОУ.



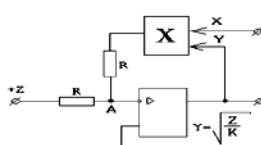
а) умножение



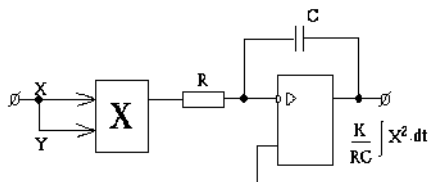
б) квадратор



в) делитель



г) извлечение корня



д) вычисление среднеквадратичного значения

рис.23-16

Помимо указанных операций умножитель может осуществлять преобразование частоты, может быть использован в качестве модулятора, преобразователя частоты, фазового детектора и т.д..

### 23.8.3. Умножитель с переменной крутизной (общий принцип)

Статическая крутизна транзистора:

$$S = \frac{\partial I_k}{\partial U_{\text{бэ}}} = \frac{\partial I_k}{\varphi_T},$$

где  $\varphi_T$  – температурный потенциал.

Рассмотрим ДК (рис.23-17):

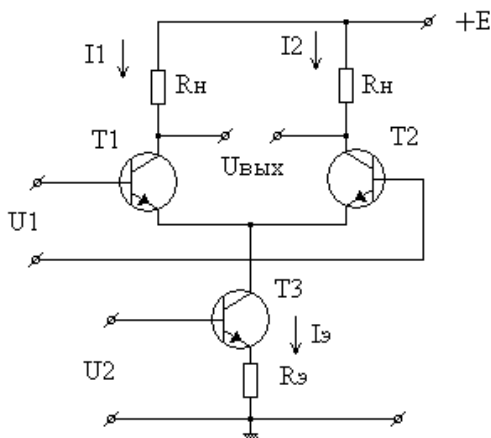


рис.23-17

Для значений

$$U_1 \ll \varphi_T$$

имеем  $U_{\text{вых}} = S \cdot U_1 \cdot R_n$

Крутизну  $S$  можно изменять при помощи  $U_2$ .

Если  $I_э \cdot R_э \gg U_{\text{бэ}}$  (для Т3), то имеем

$$U_2 \cong I_э \cdot R_э \cong I_{K3} \cdot R_э \quad (\text{для транзистора Т3}).$$

Тогда крутизна  $S$  для транзистора Т1 (или Т2) определяется при симметрии ДК:

$$I_{K1} = I_{K2} = I_{K3} / 2 ; \quad S = \frac{U_2}{2 \cdot \varphi_T \cdot R_3},$$

а выходное напряжение ДК:

$$U_{\text{вых}} = S \cdot U_1 \cdot R_n = \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot R_n}{2 \cdot \varphi_T \cdot R_3},$$

то есть  $U_{\text{вых}}$  пропорционально произведению  $U_1$  и  $U_2$ .

### 23.9. Повторитель напряжения

Для схемы рис.23-18

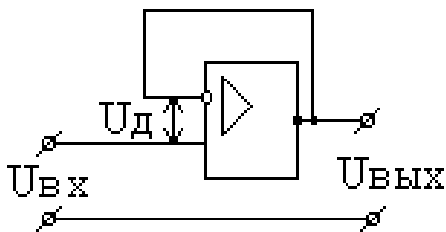


рис.23-18

$$U_{\text{д}} = \frac{U_{\text{вых}}}{K_U} \cong 0,$$

так как  $K_U$  стремится к бесконечности.

Но  $U_{\text{вх}} + U_{\text{д}} = U_{\text{вых}}$ .

И так как  $U_{\text{д}} = 0$ , то  $U_{\text{вх}} = U_{\text{вых}}$ .

В схеме ООС – последовательная, по напряжению (100%); сигнал подается на неинвертирующий вход.

Схема называется «повторитель напряжения», так как  $U_{вх} = U_{вых}$  и по амплитуде и по фазе. Для этой схемы характерный признак:

$$R_{вхОС} \cong \infty; \quad R_{выхОС} \cong 0.$$

$$[\text{так как } R_{вхОС} = R_{вх} \cdot K_U; \quad R_{выхОС} = \frac{R_{вых}}{K_U}; \quad \text{а } K_U \approx \infty].$$

### 23.10. Активные фильтры на основе операционных усилителей

В современной радиоэлектронике все большее применение находят активные RC – фильтры (ARC). Их практическая ценность – отсутствие катушек индуктивностей, что позволяет их применять на очень низких частотах; они могут быть изготовлены методами интегральной микροэлектронной технологии.

Название ARC- фильтры (активные RC-фильтры) связано с тем, что в них применяются активные ОУ и пассивные RC – цепи.

Преимущества ARC – фильтров

1. Отсутствие катушек индуктивностей L – элементов (которые нуждаются в экранировании; LRC фильтры имеют большие габариты, массу и стоимость, нетехнологичны);

2. Дешевы, малогабаритны и технологичны;

3. Параметры RC –фильтров ближе к идеальным;

4. ARC –фильтры дают усиление в полосе пропускания;

5. Использование ОУ дает развязку  $R_{вых}$  от  $R_{вх}$ ;

6. Легче настраивать;



7. Более надежны, чем LC – фильтры.

Недостатки ARC – фильтров.

1. Нуждаются в источниках питания;

2. Рабочий диапазон ограничен максимальной частотой  $f_{\max}$  ОУ (несколько МГц);

3. Параметры элементов ARC – фильтров должны иметь малый разброс и малые температурные коэффициенты, малые временные дрейфы параметров. Для схем фильтров второго порядка допуск должен составлять для конденсаторов  $C \pm 5\%$  и для резисторов  $R \pm 2\%$ . Для схем более высоких порядков должен быть еще меньший допуск.

4. В схемах ARC – фильтров должны быть малошумящие элементы. Из конденсаторов лучше всего применять полистироловые, керамические, слюдяные. Дисковые керамические конденсаторы имеют малое применение, так как у них плохая стабильность по температуре, времени и частоте.

### **23.10.1. Активные RC – фильтры нижних частот первого порядка. Обобщенное описание фильтра НЧ**

Исходная формула коэффициента передачи:

$$\underline{K} = \frac{1}{1 + j\omega RC}.$$

Введем комплексную нормированную переменную

$$p = j\omega + \sigma,$$

где  $\sigma$  - допустимое отклонение АЧХ в полосе пропускания (обычно  $\sigma = \sqrt{M^2 - 1}$ ).

Введем обозначение  $P = \frac{p}{\omega_{cp}}$  (нормированное значение частоты в операторной форме).

Тогда при  $\sigma = 0$  обозначим:

$$P = \frac{j\omega}{\omega_{cp}} = j \left( \frac{f}{f_{cp}} \right) = j\Omega,$$

где  $\Omega$  - нормированная частота.

Так как частота среза  $f_{cp} = 1/2\pi RC$ , то нормированное значение частоты в операторной форме

$$P = p \cdot R \cdot C$$

и коэффициент передачи в операторной форме

$$K(P) = \frac{1}{1 + P}$$

для фильтра первого порядка.

При  $\Omega \gg 1$ , т.е.  $f \gg f_{cp}$ ,  $|K| = 1/\Omega$ , что соответствует снижению  $K$  на 20дБ на декаду (изменению в 10 раз). Для более крутого изменения затухания включают последовательно несколько фильтров. Тогда, в общем случае, коэффициент передачи (передаточная функция) ФНЧ в операторной форме может быть записана:

$$K(P) = \frac{K_0}{\prod_i (1 + a_i P + b_i P^2)},$$

где:

$K_0$  – коэффициент передачи фильтра при  $P = 0$ ;

$a_i, b_i$  – положительные действительные коэффициенты;

$i = 1..n/2$  для четных  $n$ ;

$i = 2..(n+1)/2$  для нечетных  $n$ ;

$n$  – порядок фильтра определяемый степенью  $P$  после перемножения в знаменателе. Порядок фильтра определя-

ет наклон АЧХ после частоты среза  $f_{\text{ср.}}$ . Вид характеристики определяется как порядком, так и типом фильтра (Чебышев, Баттерворт и др.)

Типы фильтров отличаются значениями  $a_i$ ,  $b_i$  в передаточной функции. Их значения можно найти в литературе (например, У.Титце, К.Шенк 1982г., стр. 194-198)

Пример: фильтры шестого порядка имеют следующие примерные характеристики (рис.23-19):

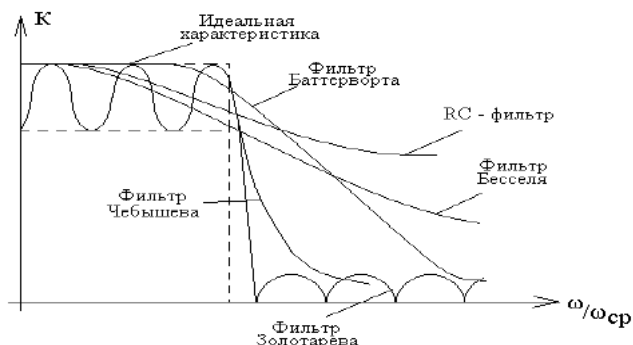


рис.23-19

Создание фильтра начинают с выбора его АЧХ и требований к ней (полоса пропускания; частота среза  $f_{\text{среза}}$ ; скорость спада АЧХ; коэффициент затухания; неравномерность в полосе и иногда за ее пределами). Нужно знать порядок фильтра (число полюсов функции). Обычно число полюсов показывает на скорость спада функции — АЧХ фильтра. Обычно скорость равна  $n \cdot 20$  дБ/декаду. На каждый полюс фильтра обычно приходится один конденсатор фильтра. Число конденсаторов равно порядку фильтра.

Фильтр Баттерворта: АЧХ с максимально плоской характеристикой в полосе, но небольшая скорость спада затухания, что принимают, когда высоки требования к равномерности в полосе пропускания.

Фильтр Чебышева: имеет неравномерность в полосе пропускания, но хороший спад АЧХ за полосой; неравномерность в полосе нужно задавать.

Фильтр Бесселя: АЧХ неважная. Но фильтр максимально без искажений передает форму сигналов, так как у него очень хорошая фазовая характеристика (линейная ФЧХ), что особенно важно для прямоугольных импульсов.

Фильтр Золотарева: имеет максимальный спад за полосой пропускания, но имеет неравномерность как в пределах полосы, так и за полосой пропускания, что нужно регламентировать.

### 23.10.2. Реализация ARC – фильтра нижних частот первого порядка

Передаточная функция имеет вид:  $K(P) = \frac{K_0}{1 + a_1 P}$

где  $a_1 = 1$ ,  $K_0 = 1 + R_2/R_3$ ,  $f_{ср} = 1/2\pi R_1 C_1$ .

Его реализация (рис.23-20):

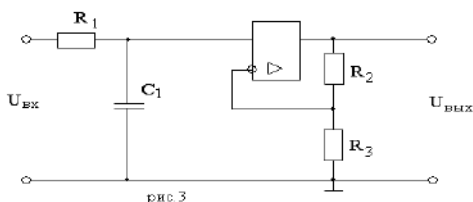


рис.23-20

Для него  $K_0 = 1 + \frac{R_2}{R_3}$ , т.е. не зависит от  $R_n$  (в отличие от пассивного фильтра, где  $K = f(R_n)$ ).

### 23.10.3. Преобразование фильтра НЧ в фильтр ВЧ

Если зеркально отразить АЧХ ФНЧ относительно частоты среза  $f_{ср}$ , то можно перейти от ФНЧ к ФВЧ, заменив  $\Omega$  на  $1/\Omega$ ;  $P$  на  $1/P$ ;  $f_{среза}$  не меняется,  $K_0$  заменяется

на  $K_\infty$  (коэффициент передачи на  $f_\infty$ ). Тогда передаточная функция ФВЧ:

$$K(P) = \frac{K_\infty}{\prod_i \left(1 + \frac{a_i}{P} + \frac{b_i}{P^2}\right)}$$

#### 11.3.4. Реализация ФВЧ на АРС

Нужно заменить  $P$  на  $1/P$ , а в схеме рис.11-5 поменять  $R_1$  и  $C_1$  местами (рис.23-21).

$$K_\infty = 1 + R_2/R_3; \quad a_i = 1; \quad b_i = 0.$$

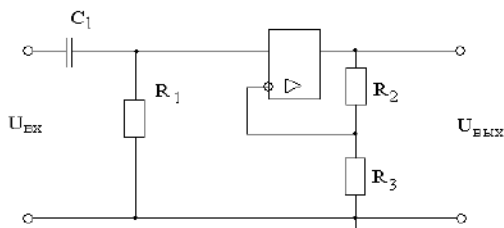


рис.23-21

#### 23.10.5. Реализация АРС – фильтров НЧ и ВЧ второго порядка

Передаточная функция ФНЧ второго порядка может быть записана в общем виде:

$$K(P) = \frac{K_0}{1 + a_1 P + b_1 P^2}.$$

Такие функции характеризуются (второго и более порядков) наличием комплексно-сопряженных полюсов. Такие функции не могут быть реализованы с помощью пассивных элементов RC. Один из способов их реализации -

применение индуктивностей (L элементов) . Другой способ – применение RC – цепей с ОУ.

Реализация ARC – фильтров НЧ и ВЧ обычно выполняется на основе ОУ:

- либо со сложной ООС;
- либо с ПОС (фильтры Саллена – Кея).

Обратная связь используется для формирования комплексно-сопряженных полюсов.

### 23.10.6. Фильтр НЧ со сложной ООС

Фильтр со сложной ООС (многопетлевой ООС) носит название фильтра со структурой Рауха (рис.23-22).

Для ФНЧ Баттерворта  $a_1 = 1,44$ ,  $b_1 = 1$ .

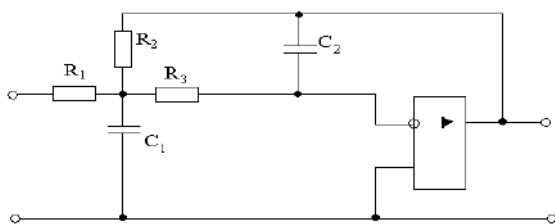


рис.23-22

Для него коэффициент передачи:

$$K(P) = - \frac{\frac{R_2}{R_1}}{1 + \omega_{cp} C_1 (R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}) P + \omega_{cp}^2 C_1 C_2 R_2 R_3 P^2};$$

где  $K_0 = R_2/R_1$ ;

$$a_1 = \omega_{cp} C_1 (R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1});$$

$$b_1 = \omega_{cp}^2 C_1 C_2 R_2 R_3.$$

Для реализации фильтра необходимо условие

$$\frac{C_2}{C_1} \gg \frac{4 \cdot b_1 (1 - K_0)}{a_1^2}.$$

Характеристики фильтра мало зависят от разброса номиналов, и поэтому может быть рекомендован к реализации.

### 23.10.7. ФНЧ на основе положительной обратной связи

Фильтр на основе ПОС (рис.23-23) носит название фильтра с критическим затуханием (фильтр Саллена - Кея).

Для фильтра Баттерворта  $\alpha = 1,586$ ; для фильтра Чебышева  $\alpha = 2,234$ .

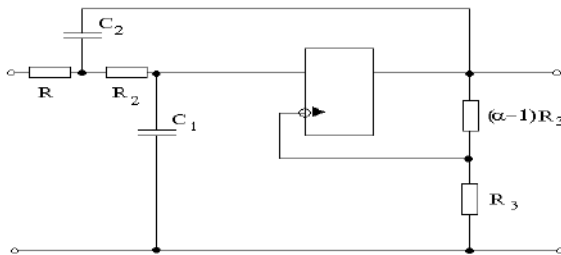


рис.23-24

При  $R_1 = R_2 = R$  и  $C_1 = C_2 = C$  передаточная функция имеет вид:

$$K(P) = \frac{\alpha}{1 + \omega_{cp} RC (3 - \alpha) P + (\omega_{cp} RC)^2 P^2}$$

причем

$$R \cdot C = \frac{\sqrt{b_1}}{2\pi f_{cp}}; \quad \alpha = K_0 = 3 - \frac{a_1}{\sqrt{b_1}}.$$

При  $\alpha = 3$  схема превращается в автогенератор с  $f = 1/2\pi RC$ .

### 23.10.8. Фильтр ВЧ на основе положительной обратной связи

Поменяв местами R и C, получаем фильтр ВЧ (рис.23-24):

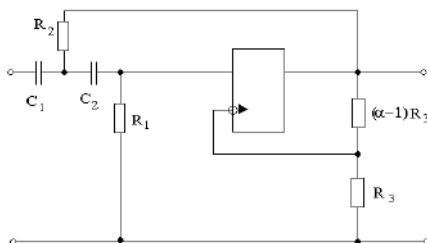


рис.23-24

Передаточная функция имеет вид:

$$K(P) = \frac{\alpha}{1 + \frac{R_2(C_1 + C_2) + R_1 C_2 (1 - \alpha) \cdot 1}{R_1 R_2 C_1 C_2 \omega_{cp} P} + \frac{1 \cdot 1}{R_1 R_2 C_1 C_2 \omega_{cp} P^2}}$$

,

при  $\alpha = 1$  и  $C_1 = C_2 = C$  имеем  $K_\infty = 1$ ,

$$R_1 = \frac{1}{\pi f_{cp} C a_1}, \quad R_2 = \frac{a_1}{4\pi f_{cp} C b_1}.$$



### 23.10.9. Реализация полосовых фильтров второго порядка

Включим ФНЧ и ФВЧ последовательно (рис.23-25):

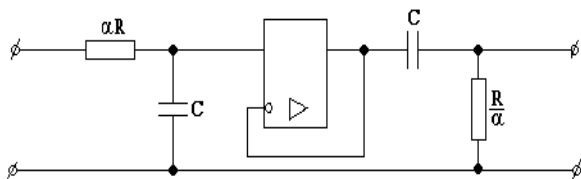


рис.23-25

В результате получаем ПФ с коэффициентом передачи (передаточной функцией) в нормированном виде:

$$K(p) = \frac{\alpha p}{1 + \frac{(1+\alpha)^2}{\alpha} p + p^2}$$

с эквивалентной добротностью  $Q = \frac{\alpha}{(1+\alpha)^2}$  и резонансной частотой

$$f_{PE3} = \frac{1}{RC}$$

При  $\alpha = 1$   $Q_{\max} = 1/2$

[ ( $\alpha$  - постоянная нормирования); для ФНЧ и ФВЧ  $\alpha = K_0K$ ;  $K$  – коэффициент, характеризующий условия реализации фильтров; для ФНЧ и ФВЧ  $\alpha$  и  $K$  должны быть  $< 1$ ].

Для получения большей добротности  $Q$  необходимо иметь в знаменателе функцию, имеющую комплексные сопряжённые корни. Это можно реализовать, применяя ОУ со сложной ООС (рис.23-26):

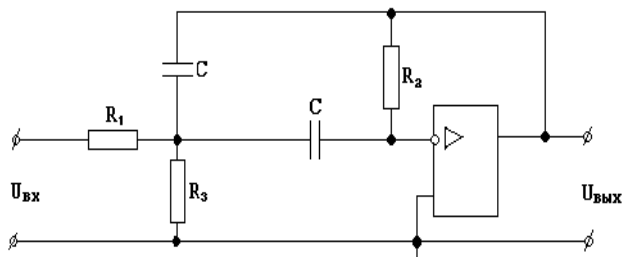


рис.23-26

Передаточная функция этого фильтра:

$$K(p) = \frac{-\frac{R_2 R_3}{R_1 + R_3} C \omega_0 p}{1 + \frac{2R_1 R_3}{R_1 + R_3} C \omega_0 p + \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_3} C^3 \omega_0^2 p^2}$$

где  $f_{PE3} = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_3}{R_1 R_2 R_3}}$  *резонансная частота*

Другие параметры фильтра:

эквивалентная добротность  $Q_{\text{эквив.}} = \pi R_2 C f_{\text{рез}}$  ;

полоса пропускания  $\Pi = 1 / \pi R_2 C$  ;

коэффициент передачи на  $f_{\text{рез}}$  равен  $K_0 = R_2 / 2R_1$  ;

полоса частот не зависит от  $(R_1, R_3)$  ;

$K_0$  не зависит от  $R_3$ , т.е. меняя  $R_3$ , можно менять  $f_{\text{рез}}$ , не изменяя  $K_0$  и полосу пропускаемых частот.

Схема не чувствительна к точности подбора элементов.

## Выводы по теме

1. Операционные усилители в настоящее время используются в самых различных электронных устройствах. Их широко применяют как в аналоговых, так и в импульсных устройствах электроники. В то же время существуют и часто используются типовые линейные схемы на основе операционных усилителей. Такие типовые схемы должен знать каждый инженер, использующий электронные устройства.

2. Приемы анализа ОУ основаны на ряде допущений, принимаемых в предположении, что используемые операционные усилители достаточно близки к идеальным. Практика расчетов показывает, что результаты, получаемые на основе допущений, имеют вполне приемлемую погрешность.

3. Одна из базовых схем ОУ - схема инвертирующего усилителя с внешней ОС. На основе этой схемы строятся все остальные. В схеме инвертирующего усилителя используется параллельная ООС по напряжению.

4. Коэффициент усиления инвертирующего усилителя (с ООС!) по напряжению

$$K_{U \text{ инв.}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E_{\Gamma}} = -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}.$$

5. В схеме неинвертирующего усилителя входной сигнал подается на неинвертирующий вход. ООС подается на инвертирующий вход, т.е. ООС является последовательной по напряжению.

Для идеального ОУ:

$$K_{U \text{ неинв.}} = 1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \quad \text{или} \quad K_{U \text{ неинв.}} = 1 + |K_{U \text{ инв.}}|.$$

6. Дифференциальный усилитель (ДУ), как и дифференциальный каскад (ДК) предназначен для усиления разности  $\Delta U_{ВХ}$ , но в отличие от ДК он охвачен глубокой ООС. Схема является сочетанием инвертирующего и неинвертирующего усилителей. Для идеального (симметричного) усилителя коэффициент ослабления синфазного сигнала  $K_{ООС} = \infty$ .

7. Инвертирующий сумматор построен на основе инвертирующего усилителя. Для идеального ОУ  $K_{Д} = \infty$ ,  $R_{ВХ.Д.} = \infty$ ; при этом

$$U_{ВЫХ} = -R_{ОС} \cdot \left( \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} \right)$$

т.е. на выходе имеем инвертированную сумму входных напряжений, взятых с соответствующими масштабными коэффициентами.

8. Для схемы неинвертирующего сумматора:

$$U_{ВЫХ} = K \cdot (K_{1н} \cdot U_1 + K_{2н} \cdot U_2 + K_{3н} \cdot U_3),$$

где

$$K = 1 + \frac{R_{ОС}}{R_1},$$

$$K_{1н} = \frac{R_{ОС1}}{R_{1н} + R_{ОС1}} = \frac{R_{\Sigma}}{R_{1н}}, \quad R_{\Sigma} = R_{0н} \parallel R_{1н} \parallel R_{2н} \parallel R_{3н}$$

$R_{ОС1}$  - это общее сопротивление  $R_{\Sigma}$  параллельного соединения резисторов без  $R_{1н}$ .

9. Интегрирующий усилитель широко применяется при обработке электрических сигналов. Вместо  $R_{ОС}$  в цепи обратной связи ставится конденсатор. Для идеального ОУ ( $K_{Д} = \infty$ ,  $R_{ВХ.Д.} = \infty$ ):

$$U_C = \frac{1}{C} \int_0^t U_{BX}(t) dt$$

10. Дифференцирующий усилитель построен на основе инвертирующего усилителя. Для идеального ОУ выходное напряжение

$$U_{ВЫХ} = -R_2 \cdot i_{BX} = -R_2 \cdot C_1 \frac{dU_{BX}}{dt}.$$

11. Аналоговый умножитель - это устройство, в котором выходной сигнал пропорционален произведению двух входных сигналов:  $Z = K \cdot X \cdot Y$ , где  $K$  – масштабный коэффициент устройства умножения. В реальном умножителе величина  $Z$  связана с величинами  $X$  и  $Y$  соотношением

$$Z = K \cdot X \cdot Y + K_X \cdot X + K_Y \cdot Y + K_0,$$

где  $K$  - коэффициент передачи умножителя (масштабный коэффициент);  $K_X, K_Y$  - постоянные, определяющие смещения, зависящие от  $X$  и  $Y$ ;  $K_0$  - начальное смещение.

12. В логарифмическом усилителе  $U_{ВЫХ}$  (примерно) пропорционально  $\lg U_{ВХ}$ . В антилогарифмическом усилителе (экспоненциальном)  $U_{ВХ}$  (примерно) пропорционально  $\lg U_{ВЫХ}$ . Первые применяют для перевода в дБ, сжатия динамического диапазона, которое применяется для регистрации сигналов, уровень которых изменяется в широких пределах. Вторые (и первые) применяют в быстродействующих устройствах возведения в степень, перемножения и деления сигналов.

13. Практическая ценность ARC-фильтров – отсутствие катушек индуктивностей, что позволяет их применять на очень низких частотах; они могут быть изготовлены методами интегральной микроэлектронной технологии.

14. В общем случае, коэффициент передачи (передаточная функция) ФНЧ в операторной форме может быть записана:

$$K(P) = \frac{K_0}{\prod_i (1 + a_i P + b_i P^2)},$$

где:

$K_0$  – коэффициент передачи фильтра при  $P = 0$ ;  $a_i, b_i$  – положительные действительные коэффициенты;  $i = 1..n/2$  для четных  $n$ ;  $i = 2..(n+1)/2$  для нечетных  $n$ ;  $n$  – порядок фильтра определяемый степенью  $P$  после перемножения в знаменателе.

15. Создание фильтра начинают с выбора его АЧХ и требований к ней (полоса пропускания; частота среза  $f_{\text{среза}}$ ; скорость спада АЧХ; коэффициент затухания; неравномерность в полосе и иногда за ее пределами). Нужно знать порядок фильтра (число полюсов функции). Обычно число полюсов показывает на скорость спада функции – АЧХ фильтра.

16. Функции, отображающие фильтры второго и более порядков характеризуются наличием комплексно-сопряженных полюсов. Такие функции не могут быть реализованы с помощью пассивных элементов RC. Один из способов их реализации – применение индуктивностей (L элементов). Другой способ – применение RC – цепей с ОУ.

17. Реализация ARC – фильтров НЧ и ВЧ второго и более порядков обычно выполняется на основе ОУ:

- либо со сложной ООС;
- либо с ПОС (фильтры Саллена – Кея).

Обратная связь используется для формирования комплексно-сопряженных полюсов.

## Контрольные вопросы

1. Приведите схему инвертирующего усилителя с внешней ОС. Как влияет учет входного тока  $I_{вх}$  реального ОУ на его коэффициент передачи?
2. Приведите схему неинвертирующего усилителя и его основные параметры.
3. Приведите схему дифференциального усилителя на ОУ и его основные параметры.
4. Приведите схему инвертирующего сумматора на ОУ и его основные параметры.
5. Приведите схему неинвертирующего сумматора на ОУ и его основные параметры.
6. Приведите схему интегрирующего усилителя на ОУ и его основные параметры.
7. Приведите схему дифференцирующего усилителя на ОУ и его основные параметры.
8. Приведите схему логарифмического усилителя на ОУ и его основные параметры.
9. Приведите схему антилогарифмического усилителя на ОУ и его основные параметры.
10. Приведите принцип действия аналоговых умножителей на ОУ и их основные параметры.
11. Приведите схемы умножения и квадратора с применением аналоговых умножителей на основе ОУ.
12. Приведите схему делителя с применением аналоговых умножителей на основе ОУ.
13. Приведите схему извлечения квадратного корня с применением аналоговых умножителей на основе ОУ.
14. Приведите схему вычисления среднеквадратичного значения с применением аналоговых умножителей на основе ОУ.
15. Объясните работу умножителя с переменной крутизной (общий принцип).

16. Приведите схему повторителя напряжения на ОУ и его основные параметры.

17. Приведите схемы перемножителя и делителя на основе управляемых сопротивлений и их основные параметры.

18. Назовите достоинства и недостатки ARC-фильтров.

19. Приведите нормированное значение частоты и коэффициент передачи в операторной форме для фильтра первого порядка.

20. Приведите нормированное значение частоты и коэффициент передачи в операторной форме для фильтра второго порядка.

21. Приведите пример реализации ARC – фильтра нижних частот первого порядка.

22. Приведите пример реализации ARC – фильтра нижних частот второго порядка со сложной ООС.

23. Приведите пример реализации ARC – фильтра нижних частот второго порядка на основе ПОС.

24. Приведите пример преобразования ФНЧ и ФВЧ в полосовой фильтр.

25. Приведите пример реализации ПФ второго порядка.



## 24. Положительная обратная связь. Генераторы на основе операционных усилителей.

### Компараторы на основе операционных усилителей

Различают генераторы синусоидальных колебаний (гармонические), генераторы прямоугольной формы, генераторы импульсов и др.. Существуют генераторы специальной формы (например, генераторы линейно-изменяющихся напряжений).

В общем случае генератор - это автоколебательная система, в которой энергия источника питания преобразуется в энергию электрических колебаний.

Генераторы синусоидальных колебаний обычно содержат усилительный каскад, охваченный ПОС, которая обеспечивает устойчивый режим самовозбуждения на заданной частоте.

Структурная схема генератора в общем виде представлена на рис.24-1:

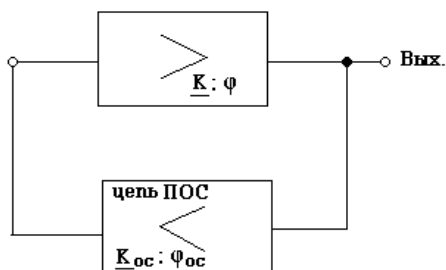


рис.24-1

Коэффициенты передачи основного усилителя и цепи обратной связи  $K$  и  $K_{ос}$  - комплексные, что учитывает их

зависимость от частоты. Для обеспечения режима генерации необходимы два условия:

$$\underline{K}K_{oc} \geq 1 \quad \text{- баланс амплитуд;}$$

$$\varphi + \varphi_{oc} = 2\pi n; \quad n - \text{целое число - баланс фаз.}$$

Условие  $\underline{K} \geq \frac{1}{K_{oc}}$  позволяет первоначальным изменениям токов и напряжений в усилителе при подключении источника питания  $E_{пит}$  осуществить нарастание  $U_{вых}$  и при достижении  $\underline{K}K_{oc} = 1$  наступает установившийся режим генерации, т.е. усиление  $\underline{K}$  компенсируется усилением  $K_{oc}$ .

Баланс фаз определяет, что сигнал ОС должен быть в фазе с входным. На входе происходит их сложение; баланс фаз обеспечивает устойчивую генерацию.

#### 24.1. Применение положительной обратной связи в RC - генераторах на ОУ

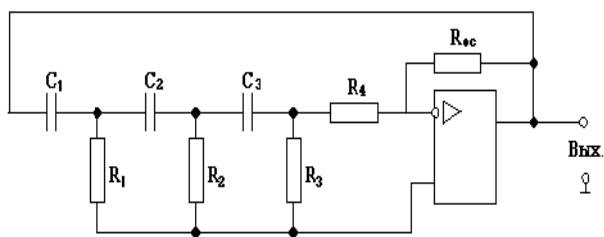
В RC – генераторах в качестве цепей ПОС используют RC – цепи. В усилительных устройствах используются как инвертирующие, так и неинвертирующие сигналы.

Для инвертирующих ОУ необходимо обеспечить поворот фазы на  $180^\circ$ , для неинвертирующих – должен быть поворот фазы  $\varphi_{oc} = 0$ .

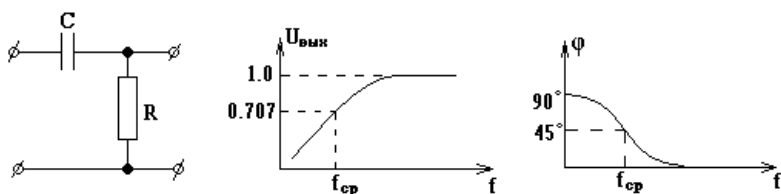
Схема RC – генератора на инвертирующем ОУ с трёхзвенным ФВЧ приведена на рис 24-2 а). АЧХ и ФЧХ для одного звена приведена на рис.24-2 б).

Каждое звено обеспечивает поворот фазы на  $\varphi = 60^\circ$  (ПОС).

Обычно  $C_1 = C_2 = C_3 = C$ ;  $R_1 = R_2 = R_3 = R$ .



а)



б)

рис.24-2

При этом

$$f_{\text{PEЗ}} = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}.$$

Для регулировки коэффициента усиления  $K$  ОУ и улучшения формы сигнала (кроме ПОС через фильтры RC) применена ООС через  $R_{\text{ос}}$ .

Можно вместо ФВЧ применять ФНЧ, но при этом величины  $R$  и  $C$  имеют большие значения, что создает трудности в реализации.

Если неинвертирующий ОУ охватить ПОС (рис.24-3), то автоколебания тоже возникнут и без RC – цепей, но в широком спектре частот (не на одной частоте).

Для осуществления колебаний на одной частоте нужны RC – цепочки, для которых баланс фаз обеспечивается только на одной частоте.

Этим свойством обладает мост Вина в цепи ПОС (рис.24-4).

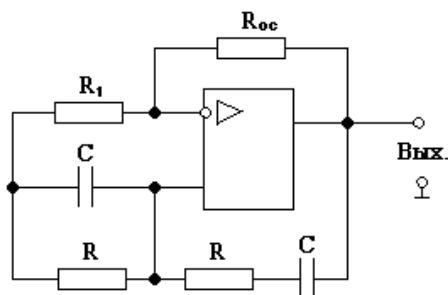


рис.24-3

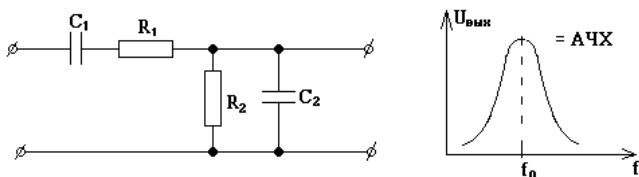


рис.24-4

$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}/3$  на частоте квазирезонанса  $f_0$  при  $R_1 = R_2$  и  $C_1 = C_2$ ;

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} ;$$

причём  $\varphi_{\text{ВХОДА}} = \varphi_{\text{ВЫХОДА}}$  (совпадают) на  $f_0$ .

Для АЧХ:

а) если  $f < f_0$ , то увеличивается  $X_{C1}$  и уменьшается  $U_{\text{ВЫХ}}$ ;

б) если  $f > f_0$ , то уменьшается  $X_{C2}$  и уменьшается  $U_{\text{ВЫХ}}$ .

Так как

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{3}, \text{ то } \underline{R}_{\text{ОС}} = \frac{1}{3};$$

и самовозбуждение (баланс амплитуд) возникает, при  $\underline{K} = 3$ , что соответствует  $R_{\text{ОС}}/R_1 > 2$ .

В общем случае частота генерации  $f_{\text{генерации}}$  зависит и от параметров ОУ, но за счёт глубокой ООС практически этого нет. Поэтому температурная нестабильность  $f_0$  РС – генератора на ОУ определяется только элементами РС и мала. Так как выполнение условия  $\underline{K}_{\text{ОС}} = 1/3$  абсолютно выполнить сложно, то необходима схема автоматической стабилизации амплитуды, воздействующая на цепь ООС ( $\underline{K}_{\text{ОС}}$ ) так, чтобы колебания были стабильны при малых искажениях (рис.24.5)

[при  $\underline{K}_{\text{ОС}} < 1/3$  амплитуда колебаний будет изменяться во времени, появится неустойчивость; при  $\underline{K}_{\text{ОС}} > 1/3$   $U_{\text{ВЫХ}}$  стремится к нулю из-за приращения колебаний].

Контур ПОС имеет одинаковые значения  $R_1 = R_2 = R$  и  $C_1 = C_2 = C$ .

Контур ООС имеет  $\underline{K}_{\text{ОС}} = 2$ , что обеспечивает генерацию колебаний.

Диоды обеспечивают автоматическую стабилизацию  $\underline{K}_{\text{ОС}}$ :

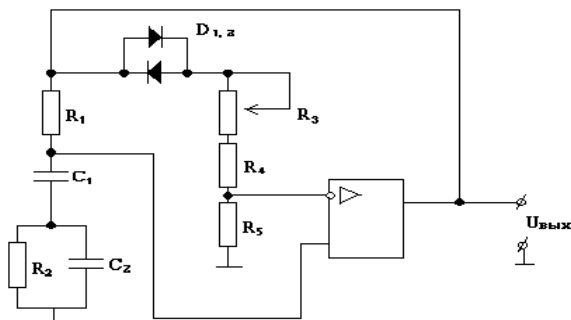


рис.24-5

Если по мере нарастания  $U_{\text{ВЫХ}}$  динамическое сопротивление диодов падает:

$$r_d = \frac{\varphi_T}{I_d} \quad \varphi_T = 26 \text{ мВ}$$

где  $I_d$  - мгновенное значение тока через диод, то это падение  $r_d$  увеличивает  $U_{\text{оос}}$  и рост  $U_{\text{ВЫХ}}$  замедляется; в конечном счёте  $U_{\text{ВЫХ}}$  стабилизируется.  $R_3 \approx (R_4 + R_5)$  используются для установки  $U_{\text{ВЫХ}}$ . В схеме могут быть обеспечены искажения до 0,05 %.

## 24.2. Генератор сигналов прямоугольной формы

представлен на рис. 24-6.  $R_1$  и  $R_2$  устанавливаются для повышения входного сопротивления  $R_{\text{ВХ}}$  ОУ;  $R_5$  - для ограничения тока через стабилитрон;  $R_3$  и  $R_4$  обеспечивают ПОС через неинвертирующий вход ОУ;  $C_{T1}$  и  $C_{T2}$  стабилизируют амплитуду  $U_{\text{ВЫХ}}$  на уровне  $\pm U_{\text{ист}}$  (рис.24-7).

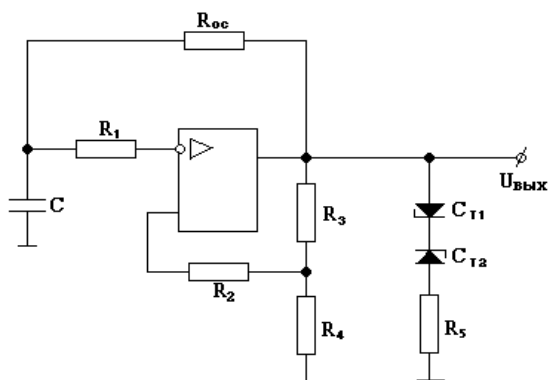


рис.24-6

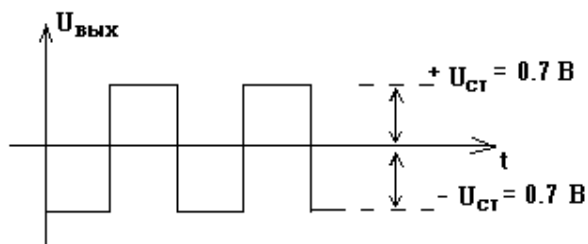


рис.24-7

$R_{oc}$  и  $C$  вместе с ОУ (компаратор) обеспечивают временные соотношения

$$\underline{K}_{oc} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}; \quad \text{при } R_1 \gg (R_3; R_4)$$

Период колебаний

$$\tau = 2R_{oc}C \ln\left(\frac{1+K_{oc}}{1-K_{oc}}\right);$$

Если  $K_{oc}=0,473$ , то

$$\tau = 2R_{oc}C \text{ и } f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{2R_{oc}C}$$

### 24.3. Генератор сигналов треугольной формы

Форма треугольного импульса может быть получена из прямоугольной формы за счёт однократного интегрирования (рис.24-8).

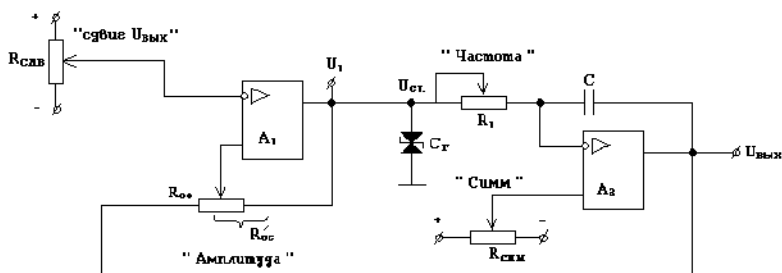


рис.24-8

$A_1$  – компаратор;  $A_2$ ,  $RC$  – интегратор с инвертирующим входом;  $R_1$  обеспечивает регулировку частоты;  $R_{oc}$  обеспечивает регулировку амплитуды.  $R_{сим}$  обеспечивает симметрию формы сигнала (рис.24-9).

Временные соотношения задаются элементами  $R$ ,  $C$ . Напряжение  $U_1$  падает полностью на  $R_1$  (определяется  $U_{стабл.}$ ) и заряд – разряд  $C$  протекает линейно.



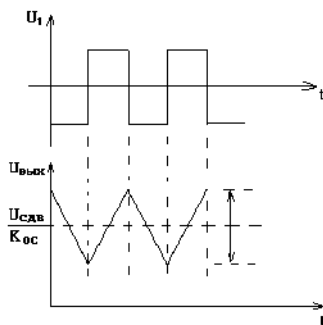


рис.24-9

Выходное напряжение и частота генерации определяются:

$$U_{\text{вых}} = 2U_{\text{СТ}} \left( \frac{1}{K_{\text{OC}}} - 1 \right); \quad f = \frac{U_{\text{СТ}}^2 - U_{\text{СИМ}}^2}{2U_{\text{ВЫХ}} U_{\text{СТ}}} \left( \frac{1}{R_1 C} \right);$$

где

$$K_{\text{OC}} = \frac{R'_{\text{OC}}}{R'_{\text{OC}} + R_{\text{OC}}};$$

#### 24.4. Компараторы напряжения на основе операционных усилителей

В отечественной и зарубежной литературе приняты два определения компараторов:

- компаратор (сравнивающее устройство) служит для определения моментов равенства двух напряжений. Компараторы являются составной частью устройств автоматического контроля, АЦП, ключевых регуляторов, стабилизаторов и т.д.
- компаратор – интегральный ОУ специального назначения, у которого выходные напряжения мгновенно изменя-

ются от максимальных до минимальных значений или обратно при каждом прохождении через нуль разности двух входных напряжений.

#### 24.4.1. Принцип функционирования компаратора

В качестве компаратора на НЧ можно использовать обычный ОУ общего применения без ОС (рис.24-10).

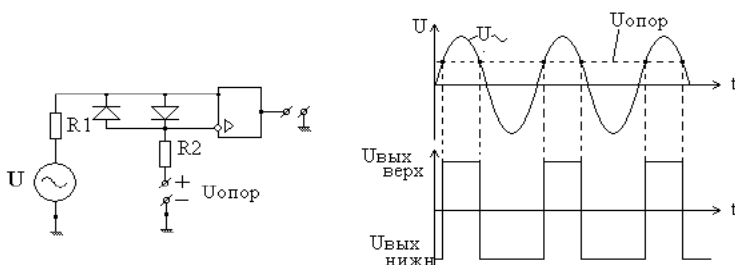


рис.24-10

Опорное напряжение  $U_{\text{оп}}$  подается на инвертирующий вход; изменяющееся напряжение  $U_{\sim}$  - на неинвертирующий. В результате их сравнения на выходе возникают переходы от  $U_{\text{вых min}}$  до  $U_{\text{вых max}}$ . Если входы поменять местами, то полярность напряжения на выходе изменится.

Недостатки данной схемы - шумы, входные токи, ЭДС смещения нуля, наличие синфазных напряжений и др. вносят ошибки в работу компараторов, сдвигая моменты их переключения в ту или иную сторону. Для защиты входов от больших уровней сигналов на входе устанавливаются встречно-параллельно включенные диоды (ограничители  $U_{\text{вх}}$ ).

При опорном напряжении  $U_{\text{оп}} = 0$  получаем нуль-индикатор (детектор нулевого уровня) – рис.24-11:

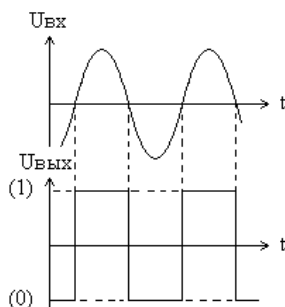


рис.24-11

Для сравнения двух разнополярных сигналов применяется одновходовая схема (рис.24-12):

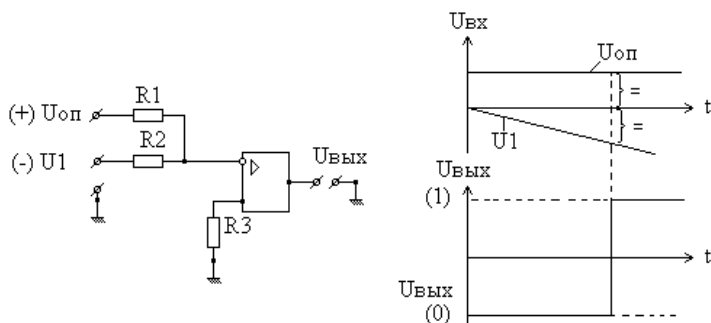


рис.24-12

$R_3 = (R_1 || R_2)$  включен для компенсации ошибки из-за смещения входного тока  $\Delta I_{вх}$ . Если  $R_1 = R_2$  срабатывания происходят при  $U_1 = U_{оп}$ . В схеме нет ошибки от синфазной помехи. Сравнение сигналов любой полярности показано на рис.24-13:

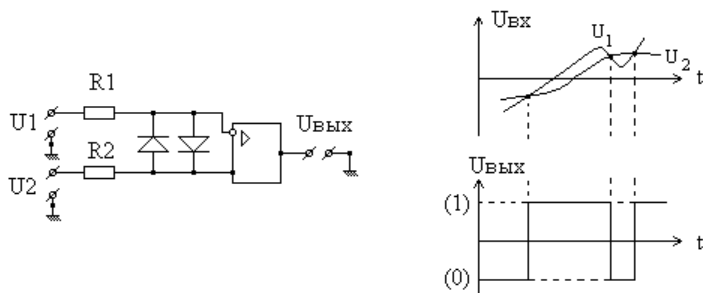


рис.24-13

#### 24.4.2. Включение ПОС в компараторе

Передаточная характеристика инвертирующего компаратора с изменением напряжения от  $-U_{\text{ВЫХmin}}$  до  $+U_{\text{ВЫХmax}}$  имеет вид (1) при условии, что  $K_{oy} = \infty$ . Реально  $K_{oy} \neq \infty$  и характеристика имеет вид (2) с конечным наклоном, что делает  $U_{\text{ВЫХ}}$  в некотором интервале  $U_{\text{ВХ}}$  промежуточным между max и min (рис.24-14).

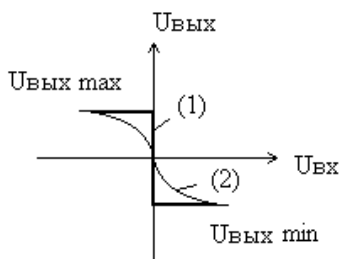


рис.24-14

Как правило, это нежелательно. Поэтому на неинвертирующий вход подают ПОС через  $R_1 R_2$ , что обеспечивает не плавный, а скачкообразный переход от  $U_{\text{ВЫХmin}}$  до  $U_{\text{ВЫХmax}}$ . Кроме того, возникает переход только при достижении  $U_{\text{порог}}$ .

$$U_{порог} = U_{вых} \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

На передаточной характеристике появляется замкнутый контур - так называемая петля гистерезиса (рис.24-15).

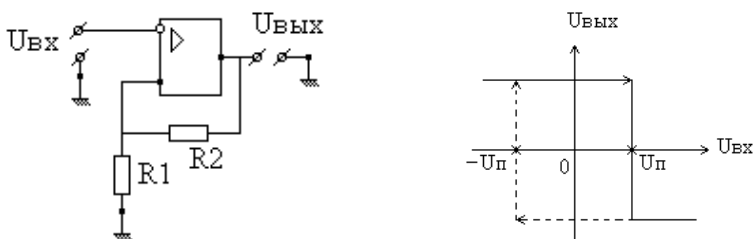


рис.24-15

Схема получается нечувствительной к шумам, которые вызывают случайные переключения (так называемый «дребезг», аналогичный дребезгу реле). Для увеличения скорости переключения и для увеличения устойчивости работы на ВЧ резистор  $R_2$  иногда шунтируют конденсатором  $C$  ( $10 \div 100 \text{ пФ}$ ).

#### 24.4.3. Пороговые уровни компараторов

У современных компараторов  $U_{вых\min} \neq U_{вых\max}$ ; их делают стандартными для цифровых устройств уровнями логической единицы (+3,5В) и логического нуля (от -0,5 до +1,4В), что позволяет их использовать для управления логическими микросхемами. Поэтому пороги  $U_{П\text{ нижн}}$  и  $U_{П\text{ верх}}$

могут быть по входу (по  $U_{ВХ}$ ) неодинаковыми и одного знака - рис.24-16:

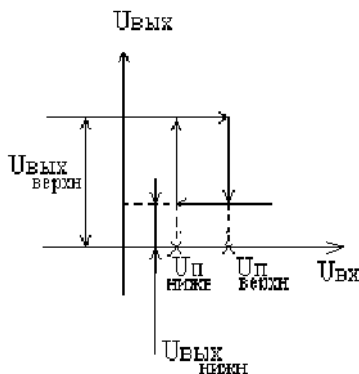


рис.24-16

#### 24.4.4. Детектор с «окном»

При изменении входного сигнала в одну сторону выходное напряжение изменяется два раза. Схема содержит два компаратора (рис.24-17).

Входное напряжение  $U_{ВХ}$  подается одновременно и на неинвертирующий вход ОУ1 и на инвертирующий вход ОУ2. На вторые входы подаются опорные напряжения  $U_{оп1}$  и  $U_{оп2}$  через делитель  $R_1, R_2, R_3$ . У усилителя ОУ1 высокий уровень  $U_{ВЫХ(ВЫС)}$  - при  $U_{ВХ} > U_{оп1}$ , а у ОУ2  $U_{ВЫХ(ВЫС)}$  - при  $U_{ВХ} < U_{оп2}$

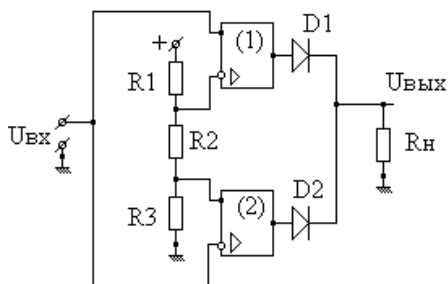


рис.24-17

В выходной цепи открывается тот диод, у которого напряжение на выходе равно  $U_{\text{вых(выс)}}$ . Т.е.  $U_{\text{вых}} = 0$  при  $U_{\text{оп2}} < U_{\text{вх}} < U_{\text{оп1}}$  (логический нуль). Такой компаратор называется компаратором «с окном» (рис.24-18).

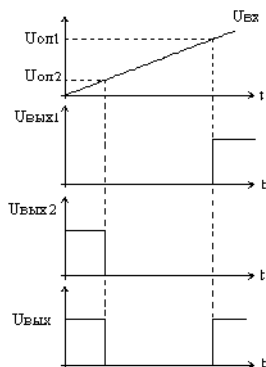


рис.24-18

Он может быть использован для индикации нахождения какой-либо величины в заданных ( $U_{\text{оп1}} \div U_{\text{оп2}}$ ) пределах (устройства сортировки, контроля), или может быть применен в устройствах считывания цифровых сигналов с запоминающим устройством. Помехи в данной схеме исключаются ( $U_{\text{помех}} < U_{\text{оп2}}$ ).

#### 24.4.5. Особенности схемотехники компараторов

Компаратор (ОУ) имеет ДК (иногда два), что обеспечивает нечувствительность к синфазной помехе. Основным параметр - время переключения (или задержка срабатывания) - время между подачей на вход испытательного перепада и моментом достижения на выходе 50% (иногда 90%) предельного уровня. Современные требования для цифровых ИС предполагают скорость переключения не-

сколько десятков наносекунд. Поэтому, для компараторов необходимо такое же быстродействие. Для обычных ОУ такая скорость недостижима. Для них время переключения составляет  $\approx 20 \div 25$  мксек (для обычного ОУ с частотно-зависимой ООС). При применении ОУ в качестве компараторов ООС не нужна. Скорость срабатывания при этом на порядок возрастает. Для специальных видов компараторов обеспечивается время переключения  $300 \div 6$  наносекунд.

Для повышения быстродействия применяют меры по предотвращению насыщения транзисторов или ускорения выхода из состояния насыщения. Для этого применяют диоды Шотки (металл – полупроводник), которые менее инерционны.

Транзисторы Шотки (комбинация транзистора с диодом Шотки) имеют время переключения до 3 наносекунд.

Иногда кристалл ИС легируют золотом, что уменьшает время жизни неосновных носителей и ускоряет выход транзистора из состояния насыщения.

Особая группа - прецизионные ИС - компараторы, имеющие высокую точность сравнения сигналов. Это достигается повышенным усилением (сотни тысяч) за счет включения дополнительных каскадов. Для уменьшения ошибки за счет высокого  $R_{вх}$  для входного сигнала, они имеют малые токи  $I_{вх}$ , что обеспечивается применением входных транзисторов по схеме эмиттерных повторителей в режиме микротоков. Для устранения ошибки за счет ЭДС смещения  $E_{см}$  применяют ручную балансировку нуля.

Применяют сдвоенные компараторы (т.е. в едином корпусе по два с заранее соединенными выходами, что реализует операцию логического сложения, ИЛИ, но не требует добавления диодов).



Применяют стробирующий вход для блокировки выхода в нужное время (расширяется возможность применения компараторов).

### Выводы по теме

1. Генераторы синусоидальных колебаний обычно содержат усилительный каскад, охваченный ПОС, которая обеспечивает устойчивый режим самовозбуждения на заданной частоте.

2. Для обеспечения режима генерации необходимы два условия:

$$\underline{K}K_{oc} \geq 1 \text{ - баланс амплитуд;}$$

$$\varphi + \varphi_{oc} = 2\pi n; \text{ } n \text{ - целое число - баланс фаз.}$$

3. Условие  $\underline{K} \geq \frac{1}{K_{oc}}$  (баланс амплитуд) обеспечивает на-

растание  $U_{вых}$  и при достижении  $\underline{K} K_{oc} = 1$  наступает установившийся режим генерации. Баланс фаз обеспечивает устойчивую генерацию.

4. Для осуществления колебаний на одной частоте нужны РС – цепочки, для которых баланс фаз обеспечивается только на одной частоте. Этим свойством обладает мост Вина в цепи ПОС

5. Компаратор (сравнивающее устройство) служит для определения моментов равенства двух напряжений. Они являются составной частью устройств автоматического контроля, АЦП, ключевых регуляторов, стабилизаторов и т.д.

6. Компаратор – интегральный ОУ специального назначения, у которого выходные напряжения мгновенно изменяются от максимальных до минимальных значений или обратно при каждом прохождении через нуль разности двух входных напряжений.

7. В качестве компаратора на НЧ можно использовать обычный ОУ общего применения без ОС (для увеличения скорости срабатывания).

8. Для обеспечения не плавного, а скачкообразного перехода от  $U_{\text{выхmin}}$  до  $U_{\text{выхmax}}$  применяют положительную обратную связь.

9. Особая группа - прецизионные ИС компараторы, имеющие высокую точность сравнения сигналов. Это достигается повышенным усилением (сотни тысяч) за счет включения дополнительных каскадов.

### Контрольные вопросы

1. Приведите схему РС – генератора на инвертирующем ОУ с трёхзвенным ФВЧ с применением ПОС.

2. Приведите схему генератора с применением моста Вина, АЧХ и ФЧХ его звеньев

3. Приведите схему генератора сигналов прямоугольной формы и принцип его работы.

4. Приведите схему генератора сигналов треугольной формы и принцип его работы.

5. Объясните принцип функционирования компаратора.

6. Приведите схему сравнения двух разнополярных сигналов (одновходовую схему).

7. Приведите схему сравнения сигналов любой полярности.

8. Объясните необходимость и эффект включения ПОС в компараторе.

9. Приведите схему и объясните работу детектора с «окном».

10. Приведите особенности схемотехники компараторов

## **25.Современные базовые элементы цифровой техники. Цифровые сигналы и цифровые схемы**

Вряд ли сейчас можно найти сферу нашей жизни, в которую не проникли бы в том или ином виде современные устройства цифровой электроники. Их можно встретить на каждом шагу:

- электронный будильник;
- наручные часы;
- электронный замок (кодовый);
- компьютеры;
- DVD и др.

Основу всех устройств (от часов до ЭВМ) составляют цифровые схемы логических цепей, регистров, счетчиков, таймеров, коммутаторов, дешифраторов, сумматоров и других схем.

Цифровой электронике принадлежит важнейшая роль в деле обеспечения высокой надежности создаваемых автоматических систем, управляющих объектами, процессами, системами. Промышленность, медицина, космос, телевидение – все «пронизано» элементами цифровой техники.

Цифровая электроника – это мир ЭВМ, интегральных схем и двоичных чисел: 0 и 1.

В аналоговых устройствах напряжение на выходе изменяется непрерывно при непрерывном изменении напряжения на входе.

## 25.1. Цифровые сигналы и цифровые схемы

Цифровые устройства оперируют цифровыми сигналами. В точке А (рис.25.1) напряжение возрастает скачком с 0 до +5 В, в точке В – падает с +5 В до 0 В диапазоне А-В – сохраняется высокий уровень.

Высокий уровень называется логической единицей; низкий уровень – логическим нулем.

Схемы, в которых используются сигналы только двух типов (высокий и низкий уровень) называют цифровыми схемами.

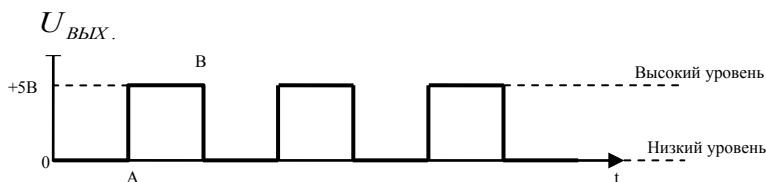


рис.25.1

Цифровые схемы являются основой микроЭВМ (персональных компьютеров). Основой микроЭВМ являются сложные интегральные схемы (ИС), называемые микропроцессорами; кроме них в микроЭВМ входят большое количество запоминающих устройств (ЗУ) на ИС, блоки памяти, программные модули, решающие устройства и др. Уровни на рис.25.1 соответствующие +5 В (высокий) и 0 В (низкий) называют уровнями напряжения ТТЛ-схем (транзисторно-транзисторных схем) или ТТЛ-уровни.

Цифровые ТТЛ сигналы можно получать с помощью переключателя (рис.25.2).

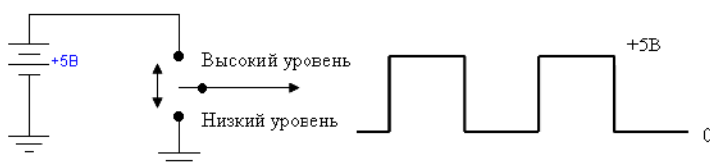


рис.25.2

Однако механический переключатель имеет недостаток –дребезг контакта (рис.25.3):

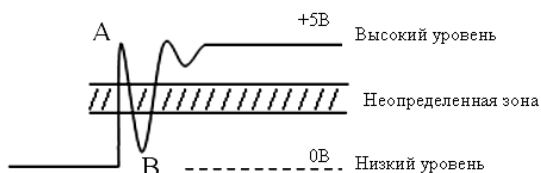


рис.25.3

Хотя этот процесс и быстротечен, но он неприемлем для работы конкретных систем. Для его исключения применяют противдребезговое устройство (рис.25.4):

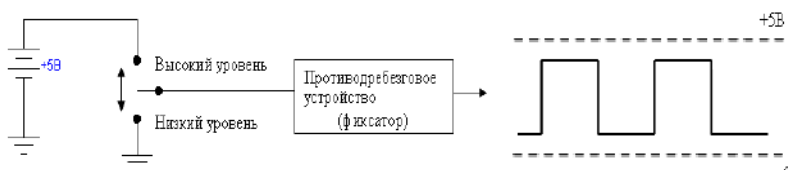


рис.25.4

Это противдребезговое устройство называют фиксатором. Их иногда называют триггерами-защелками (подробности будут ниже).

Как видно из рис.25.4 на выходе триггера-защелки уровни слегка ниже +5 В и выше 0 В.

Цифровой сигнал можно получить с помощью кнопки (рис. 25.5):

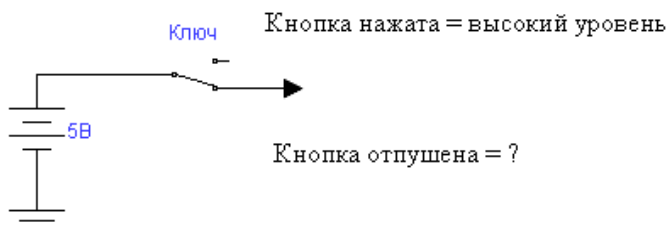


рис. 25.5

При нажатой кнопке на выходе будет высокий уровень. Но при отпущенной кнопке между источником и выходом образуется разрыв и напряжение на выходе будет неопределенным. Для однозначности решения применяют одновибратор (рис.25.6):

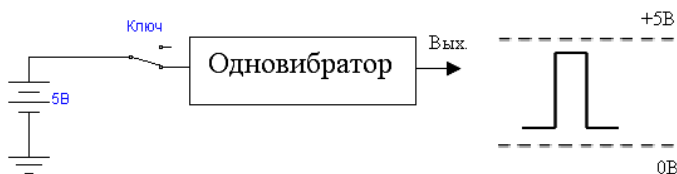


рис.25.6

Длительность импульса на выходе определяется параметрами одновибратора (независимо от того, на какое время будет нажата кнопка). И фиксатор-защелка (триггер) и одновибратор называют мультивибраторами (МВ):

Триггер (фиксатор) – это бистабильный мультивибратор;

Одновибратор – моностабильный мультивибратор;

Существует еще астабильный мультивибратор, или МВ, работающий в режиме свободных колебаний. Во многих устройствах он выполняет роль генератора тактовых импульсов – он генерирует непрерывную последовательность импульсов с ТТЛ уровнями (рис. 25.7):

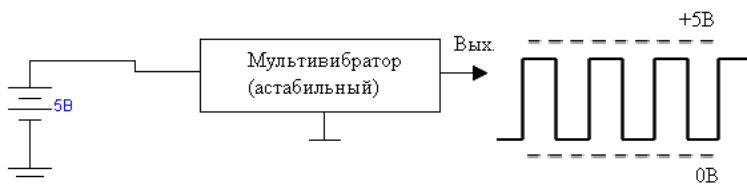


рис.25.7

## 25.2. Современные базовые элементы цифровой техники

Цифровые схемы, электронные устройства работают в соответствии с четкими логическими законами. Основными составными частями любых цифровых схем являются логические элементы. Логические элементы оперируют с двоичными числами, поэтому их называют двоичными логическими элементами, которые составляют основу любой, самой сложной ЭВМ.

Для описания алгоритмов работы и структуры логических схем используют простую алгебру логики, или булеву алгебру, называемую по имени разработавшего ее в середине XIX века ирландского математика Д. Буля. В ее основе лежат три основные логические операции: логическое отрицание, или операция НЕ (инверсия), логическое сложение, или операция ИЛИ (дизъюнкция) и логическое умножение, или операция И (конъюнкция).

Операция НЕ над переменной  $x$  записывается в виде  $\bar{x}$ .

Операция ИЛИ над двумя переменными  $x$  и  $y$  записывается

в виде  $x + y$ , а операция И — в виде  $x \cdot y$ .

Фактически каждая логическая операция задает функцию своих аргументов (переменных). Поэтому можно говорить о функциях дизъюнкции, конъюнкции и инверсии.

Число аргументов функций дизъюнкции и конъюнкции может быть произвольным (больше двух).

Некоторая логическая функция может быть задана в алгебраической форме или в виде таблицы истинности. Алгебраическая форма, или булево выражение представляет собой формулу, состоящую из логических переменных, связанными операциями И, ИЛИ и НЕ.

Таблицей истинности называется таблица, содержащая все возможные комбинации значений входных переменных и соответствующие им значения логической функции.

Поскольку булево выражение и соответствующая ей таблица истинности описывают одну и ту же функцию, то можно переходить от одной формы описания к другой.

### 25.2.1. Логический элемент «И»

Принцип работы поясняется с помощью механических ключей (рис. 25.8): для загорания лампы необходимо замкнуть ключ А и ключ В (одновременно).

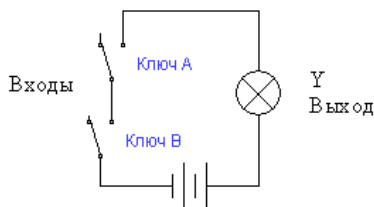


рис. 25.8



Условное обозначение логического элемента «И» (по стандарту milspec - рис.25.9):

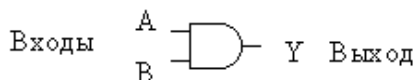


рис.25.9

Термин «логический» обычно применяют по отношению к процедуре принятия решения. В этой процедуре логический элемент - это такая схема, которая «решает», что ей ответить на выходе - «да» или «нет».

Другое обозначение (по стандарту МЭК и по ГОСТу - рис.25.10):

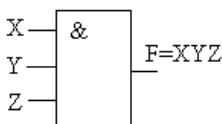


рис.25.10

по стандарту DIN:

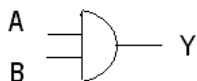


рис.25.11

Таблица истинности для логического элемента «И» - табл.25.1

табл.25.1

| Входы           |                 | Выход           |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| А               | В               | У               |
| Двоичный сигнал | Двоичный сигнал | Двоичный сигнал |
| 0               | 0               | 0               |
| 1               | 0               | 0               |
| 0               | 1               | 0               |
| 1               | 1               | 1               |

Согласно строке 1, если на входы поданы двоичные нули, то на выходе логического элемента так же возникает двоичный ноль.

Двоичная единица на выходе возникает только в том случае, когда на оба входа поданы двоичные единицы (строка 4).

**“Отличительное свойство логического элемента “И” состоит в том, что на его выходе появляется сигнал высокого логического уровня только тогда, когда на все его входы подаются также сигналы высокого уровня”.**

Два возможных состояния выходного параметра могут быть представлены или двумя уровнями выходного напряжения или появлением выходных импульсов в определенные промежутки времени.

В первом случае имеет место потенциальный способ логических переменных, во втором – импульсный.

При потенциальном способе задания различают положительную и отрицательную логику.

При положительной логике высокий уровень выходного напряжения соответствует единице (1), а низкий - нулю (0).

При отрицательной логике высокий уровень соответствует нулю (0), а низкий – единице (1).

В таблице истинности для логического элемента «И» указаны все возможные состояния по входу и соответствующие сигналы на выходе, т.е. таблица истинности дает исчерпывающую характеристику работы логического элемента, т.е. описывает логическую функцию.

Для схемы «И» можно сказать: входной сигнал А связан логической функцией «И» с входным сигналом В, в результате чего на выходе схемы появляется сигнал Y.

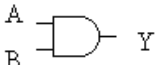
Сокращенный способ записи этого выражения называется булевым выражением (из булевой алгебры логики).

Булевы выражения – основной язык, универсальный для цифровой техники.

Выше приведенная логическая функция для схемы может быть записана в виде выражения:  $A \bullet B = Y$ , где знак  $\bullet$  - это символ «И».

Т.о., связь входа А, входа В и выхода Y может быть представлена четырьмя разными способами (табл.25.2):

табл.25.2

|                       |                                                                                         |   |   |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---|---|
| На естественном языке | Вход А связан с входом В операцией «И», в результате чего на выходе появляется сигнал Y |   |   |
| Булево выражение      | $A \bullet B = Y$                                                                       |   |   |
| Условное обозначение  |      |   |   |
| Таблица истинности    | B                                                                                       | A | Y |
|                       | 0                                                                                       | 0 | 0 |
|                       | 0                                                                                       | 1 | 0 |
|                       | 1                                                                                       | 0 | 0 |
|                       | 1                                                                                       | 1 | 1 |

Другие формы записи для логического элемента «И»:

- конъюнкция;
- логическое умножение;
- операция «И»;
- AND;

$$Y = X_1 X_2 = X_1 \cdot X_2 = X_1 \wedge X_2 = X_1 \& X_2$$

Все эти способы находят широкое применение в цифровой электронике.

В ряде случаев говорят, что схема «И» (логический элемент «И») реализует операцию логического умножения (или конъюнкции):

$$F = XYZ \text{ или } F = X \wedge Y \wedge Z ,$$

где  $X, Y, Z$  - логические переменные, которые могут иметь только два значения: 0 или 1.

Или:

$$F = X \& Y \& Z$$

(символ  $\&$  - звучит как «энд», рис.25.10).

Логический элемент «И» часто называют схемой совпадений или конъюнктом.

### 25.2.2. Логический элемент «ИЛИ»

Работа этого элемента иллюстрируется на рис.25.12 с помощью переключателей.

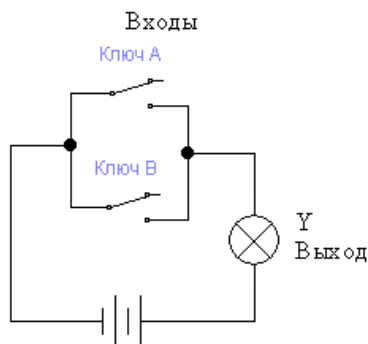


рис.25.12

Сигнал на выходе есть, если включен или А или В переключатель. Сигнал на выходе отсутствует, если оба переключателя выключены

Таблица истинности для этого логического элемента приведена в табл.25.3. Таблица 25.3 описывает логическую функцию включающее «ИЛИ».

Табл 25.3

| Входы           |                 | Выход           |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| В               | А               | Y               |
| Двоичный сигнал | Двоичный сигнал | Двоичный сигнал |
| 0               | 0               | 0               |
| 0               | 1               | 1               |
| 1               | 0               | 1               |
| 1               | 1               | 1               |

Двоичный 0 возникает только в первой строке таблицы. Во всех других случаях на выходе получается 1 (двоичная).

**Отличительное свойство логического элемента «ИЛИ» состоит в том, что на его выходе появляется сигнал**

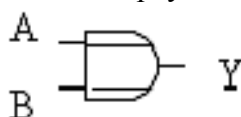
**низкого логического уровня только тогда, когда на всех его входах имеется сигнал низкого уровня.**

Условные обозначения - рис.25.3:

по стандарту milspec:



по стандарту DIN:



по стандарту МЭК:

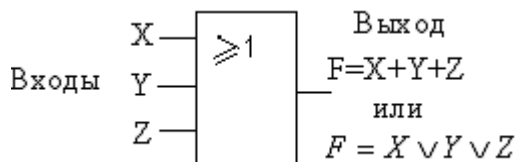


рис.25.13

или по ГОСТу - рис.25.14:

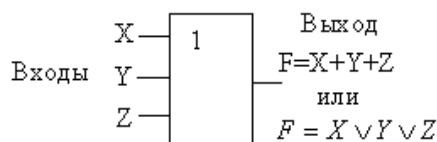


рис.25.14

Логический элемент ИЛИ выполняет функцию логического сложения или дизъюнкции (собираение). Тогда элемент «ИЛИ» называют дизъюнктом или собирательной схемой.

Булево выражение для рисунков 25.13 и 25.14:  $A + B = Y$ , где знак  $+$  - это символ «ИЛИ».

Другие формы записи:

- дизъюнкция
- логическое сложение
- операция «ИЛИ» (OR)

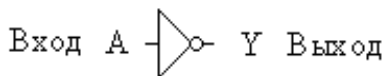
$Y = A + B = A \vee B$ , где  $\vee$  - символ логического сложения

### 25.2.3. Логический элемент «НЕ» (инвертор)

Основная функция элемента «НЕ» - обеспечивать на выходе сигнал, противоположный входному.

Условное обозначение - рис.25.15:

по стандарту milspec:



по стандарту DIN:

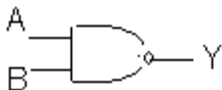


рис.25.15

Булево выражение для логического элемента «НЕ»:  $A = \bar{A}$ , где знак  $\bar{\phantom{A}}$  - это символ «НЕ» (читается  $\bar{A}$  как «не А»).

Можно сказать, что входной сигнал при этом «отрицается». Инвертор (схема «НЕ») дополняет или инвертирует входной сигнал, т.е. понятия «отрицание», «дополнение» и «инвертирование» означает одно и то же.

Другое обозначение ( по ГОСТу и стандарту МЭК) - рис.25.16:



рис.25.16

Таблица истинности для схемы «НЕ» - табл. 25.4:

табл.25.4

| Вход            | Выход           |
|-----------------|-----------------|
| A               | Y               |
| Двоичный сигнал | Двоичный сигнал |
| 0               | 1               |
| 1               | 0               |

Другие формы записи для логического элемента НЕ (инвертора):

- инверсия
  - операции «НЕ»
  - NOT
- $Y = \bar{X} = -X$



#### 25.2.4. Логическое двойное инвертирование

Пропустим сигнал А через два инвертора - рис.25.17:

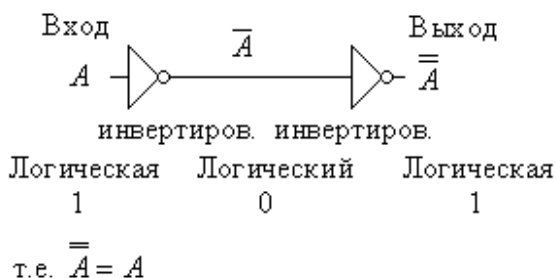


рис.25.17

“Логическая единица на входе, инвертированная дважды, даёт исходную двоичную единицу”

#### 25.3. Логические элементы «И-НЕ», «ИЛИ-НЕ», «исключающее ИЛИ»

Логические элементы И-НЕ широко используются в производстве цифровых электронных устройств благодаря общедоступности и удобству применения этих элементов. Обычно при построении логических устройств, с целью сокращения номенклатуры используемых логических элементов, используют либо два элемента, выполняющие операции И-НЕ и ИЛИ-НЕ, либо только один из этих элементов. Это обусловлено тем, что эти элементы И-НЕ и ИЛИ-НЕ являются универсальными. Универсальность проявляется в том, что каждый из них позволяет реализовать все три основные булевы операции И, ИЛИ, НЕ.

При построении логического устройства число входов логических элементов обычно бывает задано, что тоже вносит определенные трудности. Для построения устройства на заданных

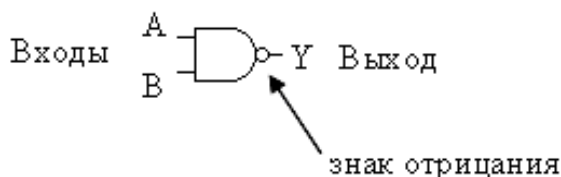
логических элементах И-НЕ или ИЛИ-НЕ необходимо логическую функцию преобразовать к соответствующему виду так, чтобы в ней присутствовали только логические операции И-НЕ или ИЛИ-НЕ. Для этого используют теоремы булевой алгебры, т. е. двойное отрицание /1/.

Использование элементов И-НЕ предполагает следующие процедуры (см. ниже - табл.25.7):

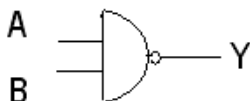
1. Запись и анализ булева выражения в виде суммы произведений.
2. Построение схемы И-ИЛИ с использованием элементов И, ИЛИ и инвертора.
3. Замену условным обозначением И-НЕ каждого условного обозначения элементов И и ИЛИ с сохранением остальных соединений в неизменном виде.
4. Замену каждого инвертора схемой И-НЕ с соединенными вместе входами.
5. Проверку всей логической схемы, состоящей только из элементов И-НЕ, на соответствие ее заданной таблице истинности.

### 25.3.1. Логический элемент «И-НЕ» (инвертированное «И»)

Условное обозначение - рис.25.18:по стандарту milpspec :



по стандарту DIN:



по стандарту МЭК и ГОСТу:

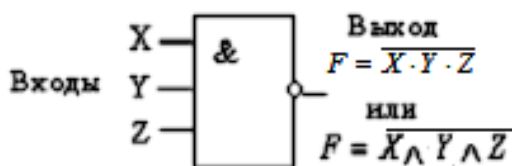
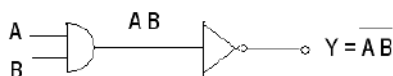


рис.25.18

Булево выражение:

$$Y = \overline{A \cdot B}$$

Условные графические обозначения для логического элемента «И-НЕ» как последовательно соединённых элементов «И» и «НЕ»:



Инверсию логического произведения называют штрихом Шеффера:

$$F = \overline{X \bullet Y} \text{ или } F = X / Y$$

Таблица истинности приведена в табл.25.5:

табл.25.5

| Входы |   | Выход |        |
|-------|---|-------|--------|
| В     | А | «И»   | «И-НЕ» |
| 0     | 0 | 0     | 1      |
| 0     | 1 | 0     | 1      |
| 1     | 0 | 0     | 1      |
| 1     | 1 | 1     | 0      |

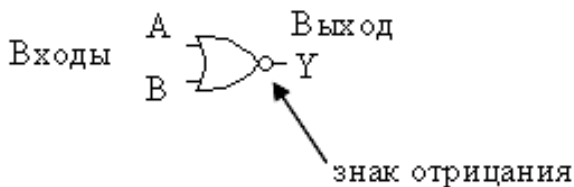
Как видно, выход «И-НЕ» получается путем инвертирования выхода схемы «И». Логические схемы «И-НЕ» широко используются в цифровых схемах широкого применения.

**Отличительное свойство логического элемента «И-НЕ» состоит в том, что на его выходе появляется сигнал низкого логического уровня только тогда, когда на всех его входах имеется сигнал высокого уровня.**

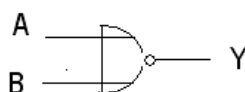
### 25.3.2. Логический элемент «ИЛИ-НЕ»(отрицание«ИЛИ»)

Условное обозначение - рис.25.19:

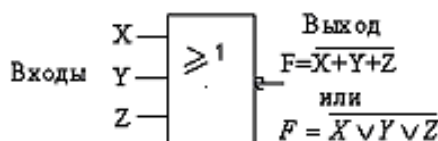
по стандарту milspec:



по стандарту DIN:



по стандарту МЭК:



по ГОСТу:

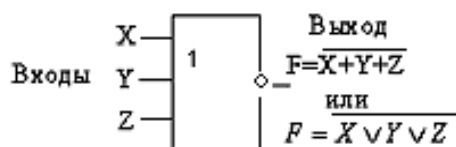
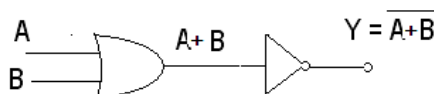


рис.13-19

Булево выражение:

$$Y = \overline{A + B}$$

Условные графические обозначения для логического элемента «ИЛИ-НЕ» как последовательно соединенных элементов «ИЛИ» и «НЕ»):



Инверсию логической суммы двух величин называют стрелкой Пирса:

$$F = \overline{X + Y} \text{ или } F = X \downarrow Y,$$

Таблица истинности дана в табл.25.6:

табл.25. 6

| Входы |   | Выход |          |
|-------|---|-------|----------|
| В     | А | «ИЛИ» | «ИЛИ-НЕ» |
| 0     | 0 | 0     | 1        |
| 0     | 1 | 1     | 0        |
| 1     | 0 | 1     | 0        |
| 1     | 1 | 1     | 0        |

**Отличительное свойство логического элемента «ИЛИ-НЕ» состоит в том, что на его выходе появляется сигнал высокого логического уровня только тогда, когда на всех его входах имеется сигнал низкого уровня.**

Логические элементы «И», «ИЛИ», «НЕ» представляют собой три основных типа схем, из которых компонуются все цифровые устройства.

Логические схемы «И-НЕ», «ИЛИ-НЕ» являются универсальными, наиболее широко применяемыми; на их базе можно реализовать практически все логические функции.

Например, с помощью схемы «И-НЕ» реализуются практически все рассмотренные выше схемы – табл.25.7:

табл 25.7

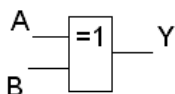
| Логическая функция | Условные обозначения         | Схема с использованием логических элементов «И-НЕ» |
|--------------------|------------------------------|----------------------------------------------------|
| Инвертор           | $A \rightarrow \overline{A}$ | $A \rightarrow \overline{A}$                       |
| «И»                | $A \cdot B$                  | $A \cdot B$                                        |
| «ИЛИ»              | $A + B$                      | $A + B$                                            |
| «ИЛИ-НЕ»           | $\overline{A + B}$           | $\overline{A + B}$                                 |

### 25.3.3. Логический элемент «исключающее ИЛИ»

Логический элемент исключающее «ИЛИ» иногда называют элементом типа «что-нибудь, но не все». При этом часто используют английское сокращение «XOR» - от английского словосочетания «Exclusive OR»: «один и только один».

Условные обозначения показаны на рис.25.20:

По ГОСТу и по стандарту МЭК:



По стандарту milspec:

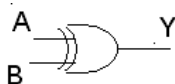


рис.25.20

Булево выражение для логического элемента исключающее «ИЛИ»:

$$A \oplus B = Y,$$

где  $\oplus$  - символ «псевдоплюс» означает, что входы А и В связаны логической функцией исключающее «ИЛИ».

Другая форма записи:

$$Y = \bar{A} B \vee A \bar{B},$$

где символ  $\vee$  - знак логического сложения.

Таблица истинности для логического элемента исключающее «ИЛИ» - табл.25.8:

**Особенностью таблицы истинности является то, что сигнал высокого уровня на выходе появляется только при нечетном числе сигналов высокого уровня на входах. При четном числе сигналов высокого уровня на выходе будет сигнал низкого уровня.**

табл 25.8

| Входы |   | Выход |                      |
|-------|---|-------|----------------------|
| В     | А | «ИЛИ» | Исключающее<br>«ИЛИ» |
| 0     | 0 | 0     | 0                    |
| 0     | 1 | 1     | 1                    |
| 1     | 0 | 1     | 1                    |
| 1     | 1 | 1     | 0                    |



#### **25.4. Свойства и сравнительные характеристики современных базовых элементов**

Для цифрового представления информации характерно полное абстрагирование от особенностей электрических процессов в электронной схеме, выполняющей обработку сигналов.

В устройствах цифровой электроники в большинстве случаев используются сигналы двух уровней — высокого и низкого. При этом обычно имеются в виду уровни напряжения, а не тока. Цифровые схемы конструируют таким образом, чтобы воздействие некоторого сигнала определялось не конкретным значением его напряжения, а тем, к какой из двух разновидностей сигналов (высокого или низкого уровня) этот сигнал относится. Предполагается, что каждый сигнал характеризуется «разумным» уровнем напряжения. При конструировании цифровых схем предпринимаются все меры к тому, чтобы, например, сигнал высокого уровня был не очень малым и не очень большим по напряжению. Если напряжение сигнала находится в установленных пределах, то конкретное значение напряжения практически никак не влияет на реакцию того устройства цифровой электроники, на которое этот сигнал подан. Такие сигналы принято называть цифровыми.

## 25.5. Способы представления информации

Вспомним, что два возможных состояния выходного параметра логического элемента можно задать двумя уровнями выходного напряжения или появлением или не появлением импульсов в определённые промежутки времени. В первом случае имеет место потенциальный способ задания логических переменных, во втором – импульсный.

При потенциальном способе различают положительную или отрицательную логику. При положительной логике высокий уровень выходного сигнала соответствует единице (1), низкий – нулю (0). При отрицательной логике высокий уровень соответствует нулю (0), а низкий – единице (1). Эти определения справедливы для любой полярности используемых напряжений:

Положительная логика – рис.25.20:

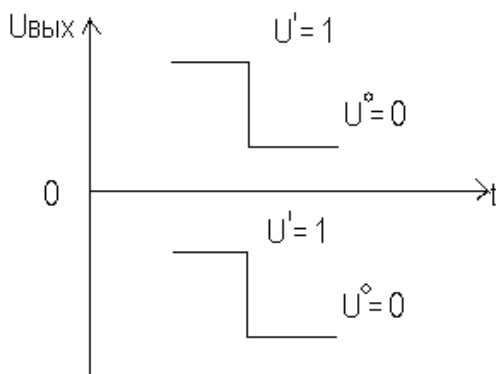


рис.25.20

Отрицательная логика – рис.25.21:

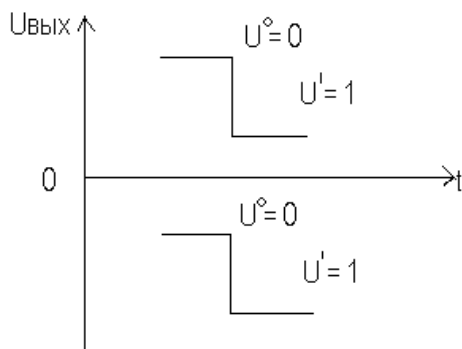


рис.25.21

При потенциальном способе представления значение логической переменной может быть определено в любой произвольной промежуток времени.

При импульсном способе это можно сделать в строго определённые промежутки времени – строго синхронно с моментом появления импульсов. Т.о., при импульсном способе представления возможен только синхронный способ счёта информации.

При потенциальном способе представления логических переменных возможен и синхронный и асинхронный способы счёта информации.

## 25.6. Основные требования к базовым логическим элементам

Функциональная сложность реальных логических устройств, множество сочетаний входных сигналов и нагруз-

зок, использование при их изготовлении гибридной и полупроводниковой технологий не позволяет рассчитывать

на индивидуальную регулировку и настройку каждого блока. Поэтому для надёжной работы реального цифрового устройства необходимо, чтобы все входящие в него элементарные узлы обладали рядом фундаментальных свойств:

- совместимость уровней входных и выходных сигналов;
- нагрузочная способность;
- формирующее свойство (свойство квантования сигнала);
- помехоустойчивость.

### 25.6.1. Совместимость уровней входных и выходных сигналов

Совместимость уровней входных и выходных сигналов должна обеспечивать их согласование при каскадном включении логических элементов. При этом установившееся отклонения выходного напряжения логического элемента, вызванные действием внешних дестабилизирующих факторов и собственным разбросом параметров не должно превышать некоторые ранее заданные значения – рис.25.22.

а) должно быть выполнено условие:

$$\begin{aligned}U'_{\min} &\leq U(t) \leq U'_{\max} \\ U^0_{\min} &\leq U(t) \leq U^0_{\max}\end{aligned}$$

где  $U(t)$  – действующее значение входного или выходного параметра; формирование сигналов со значением  $U^0_{\max} < U(t) < U'_{\min}$  недопустимо.

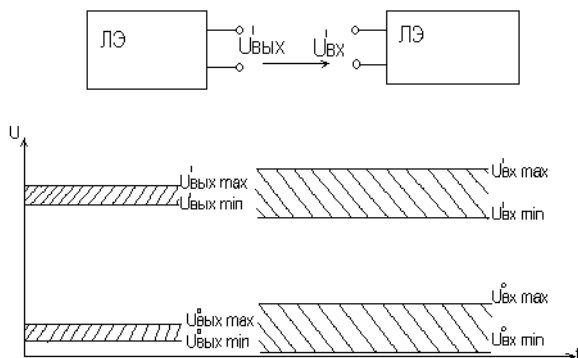


рис.25.22

б) для повышения надёжности работы допустимая область изменений выходного сигнала (по 1 или 0) должна быть уже допустимой области изменений входного сигнала (рис. 3.3):

$$\begin{aligned} U_{вых. max}^{0,1} &< U_{вх. max}^{0,1} \\ U_{вых. min}^{0,1} &> U_{вх. min}^{0,1} \end{aligned}$$

### 25.6.2. Нагрузочная способность логического элемента

Нагрузочная способность логического элемента характеризует его способность получать сигнал от нескольких источников информации и одновременно быть источником информации для нескольких других элементов. При этом должны быть выполнены ранее рассмотренные условия по совместимости.

Для численной характеристики используют два коэффициента:

коэффициент объединения по входу  $K_{об}$  численно равен максимальному числу выходов одноступенчатых логических элементов, которые могут быть одновременно под-

ключены ко входу данного логического элемента, не вызывая при этом искажения формы и амплитуды его сигнала;

коэффициент разветвления по выходу  $K_{раз}$  численно равен максимальному числу входов одностипных логических элементов, одновременно подключаемых к выходу данного логического элемента без искажения формы и амплитуды его сигнала.

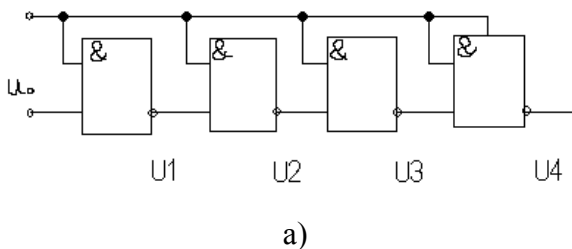
Типовые значения  $K_{об} = 2...8$ ;  $K_{раз} = 4...10$ . Существуют серии интегральных схем с повышенной нагрузочной способностью, для которых  $K_{раз} = 20...30$

### 25.6.3. Формирующие свойство логического элемента (квантование сигнала)

При прохождении сигнала по цепочке последовательного соединённых логических элементов (см., например, схемы И на рис.25.23 а) его амплитуда и форма не должны изме-

няться. Для этого каждый логический элемент должен обладать формирующими свойствами.

Формирующие свойство логического элемента определяется его амплитудной передаточной характеристикой  $U_{вых} = f(U_{вх})$  (АПХ) – рис.25.23 б):





б)

рис.25.23

Точка 0 соответствует пересечению характеристики логического элемента с прямой  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$ . Точки А и В – асимптотические (см. прохождение сигнала от  $U_0$  до  $U_4$ , причём  $U_4 > U_0$ ). Выходное напряжение стремится либо к т.А, либо к т.В. Напряжение в т.0 АПХ называют напряжением порога квантования  $U_{\text{кв}}$ . Строго говоря, если сигнал с  $U = U_{\text{кв}}$  пройдёт через цепочку логических элементов, то он не претерпит никаких изменений.

Если  $U > U_{\text{кв}}$ , то сигнал переместится в т.А (логическая 1); если  $U < U_{\text{кв}}$ , то в точку В (логический 0). Точка 0 – точка неустойчивого равновесия, и любое изменение  $U$  от  $U_{\text{кв}}$  приведёт к формированию  $U_{\text{вых}} = U_A$  или  $U_{\text{вых}} = U_B$ .

АПХ – существенно нелинейна, что обеспечивает быстрое формирование асимптотических значений логических сигналов.

## **25.7. Помехоустойчивость логических элементов.**

### **Быстродействие логических элементов**

### **Классификация логических устройств**

Очевидно, что даже кратковременное искажение логических сигналов в силу формирующих свойств логических элементов может привести к потере истинности получаемых результатов. Поэтому логические элементы должны обладать высокой помехоустойчивостью.

Динамические свойства логических элементов (быстродействие) определяются типовыми динамическими параметрами: временами задержки распространения и временем переключения выходного сигнала. Следует заметить, что численные значения указанных параметров сильно зависят как от условий эксплуатации, так и от конкретного вида соединений между логическими элементами. Эти параметры определяют максимальную частоту сигнала, допустимую для данного типа логического элемента.

На начальном этапе развития цифровой электроники было разработано большое число всевозможных схемотехнических решений. Однако широкое практическое использование получили только некоторые из них.

#### **25.7.1. Помехоустойчивость логических элементов**

Под помехоустойчивостью понимается свойство нечувствительности логических элементов к отклонениям его входных сигналов от асимптотических значений. Помехи в цифровых устройствах носят, как правило, импульсный характер. Различают внешние помехи и внутренние. Внешние: электромагнитные воздействия промышленной сети, переключателей, электродвигателей, транспорта и др. Их уменьшение возможно за счёт экранирования, выбором уровней 1 и 0, конструктивными и схемотехническими решениями.



Ко вторым относят помехи, зависящие от параметров собственного логического элемента, от вида и длины соединений и др.

Зона помехоустойчивости логического элемента определяется по его АПХ (между порогом квантования и уровнями  $U_A$  и  $U_B$  - рис.25.23):

$$U_{\text{пом.к.}}^0 = |U_{KB} - U_B|$$

$$U_{\text{пом.к.}}^1 = |U_{KB} - U_A|$$

При этом, если  $U(t)_{\text{помехи}} > U_{\text{пом.к.}}$ , то на выходе появится ложный сигнал с уровнем  $U_A$  или  $U_B$ .

Если  $U(t)_{\text{помехи}} < U_{\text{пом.к.}}$ , то амплитуда помехи при прохождении по цепочке логических элементов быстро затухнет.

Следует заметить, что допустимая амплитуда помехи зависит от её длительности.

Эту зависимость определяет характеристика импульсной помехоустойчивости – зависимость допустимой амплитуды помехи от её длительности (рис.25.24).

Т.о., существует некоторая граничная длительность  $t_{\text{ном}} = t_2$ , начиная с которой  $U_{\text{ном.доп.}}$  будет увеличиваться, и при определённой длительности помехи  $t_{\text{ном}} < t_1$  она не будет восприниматься (схема будет к ней нечувствительна).

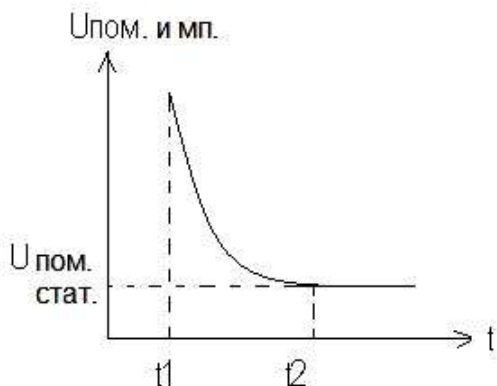


рис.25.24

### 25.7.2. Быстродействие логического элемента

Быстродействие логического элемента характеризуется временем задержки распространения сигнала. Различают время задержки при включении  $t_{\text{здр}}^{1,0}$ , при выключении  $t_{\text{здр}}^{0,1}$  и среднее время задержки распространения  $t_{\text{здр.распр.ср.}}$ .

В соответствии с ГОСТ 19489-74 под временем задержки распространения сигнала при включении понимают интервал времени между входным и выходным импульсами при переходе выходного напряжения от уровня 1 к уровню 0, измеренный на уровне 0,5 - рис.25.25. Временем задержки

сигнала при выключении считают интервал времени между входным и выходным импульсами при переходе выходного напряжения от уровня 0 к уровню 1, измеренный на уровне 0,5. Средним временем задержки  $t_{\text{здр.ср.}}$  называют

интервал времени, равный полусумме  $t_{\text{здр}}^{1,0}$  и  $t_{\text{здр}}^{0,1}$ :

$$t_{\text{здр.ср.}} = (t_{\text{здр}}^{1,0} + t_{\text{здр}}^{0,1}) / 2$$

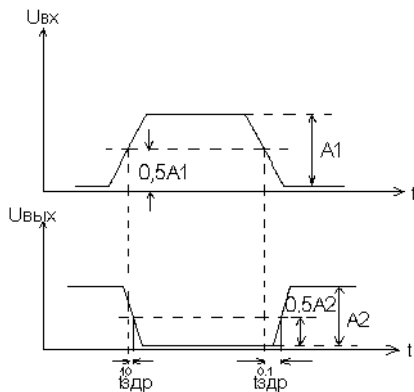


рис.25.25

К характеристикам логических элементов относят: входные токи, потребляемая мощность, энергия переключения. Различают входные токи  $I_{вх}^0$  и  $I_{вх}^1$  при входных уровнях 1 и 0, потребляемую мощность  $P_{потр}$  или ток потребления  $I_{потр}$ . Для сравнения между собой микросхем используют интегральный параметр, называемый энергией переключения. Она находится как произведение потребляемой мощности и среднего времени задержки:  $P_{потр} \cdot t_{зд.ср.}$ . Она измеряется в пикоджоулях (мВт.нс). В справочниках, как правило, даётся значение энергии переключения на один логический элемент данной серии.

## 25.8. Классификация логических устройств

### 25.8.1. Классификация по способу ввода-вывода информации

По способу ввода – вывода информации логические устройства подразделяются на последовательные, параллельные и последовательно – параллельные.

Последовательными называют устройства, в которых входные переменные подаются на вход, а выходные переменные снимаются с выхода не одновременно, а последовательно, разряд за разрядом.

Параллельными называются устройства, в которых все разряды входных переменных подаются на вход и все разряды выходных переменных снимаются с выхода одновременно.

В последовательно – параллельных устройствах входные и выходные переменные представлены в различных формах. Либо на вход передаются последовательно, символ за символом, а с выхода снимаются одновременно, либо наоборот.

### **25.8.2.Классификация по принципу действия**

По принципу действия все логические устройства делятся на два класса: комбинационные и последовательностные.

Комбинационные устройства или автоматы без памяти – логические устройства, выходные сигналы которых однозначно определяются только действующей в настоящий момент на входе комбинацией переменных и не зависят от значений предыдущих сигналов.

Последовательностные устройства, или автоматы с памятью – это логические устройства, выходные сигналы которых определяются не только действующими в данный момент времени сигналами на входе, но и всей последовательностью входных переменных, действовавших ранее. Этот тип устройств часто называют цифровыми автоматами. Очевидно, что для выполнения этого условия значения переменных должны быть запомнены логическим устройством. Как правило, эту функцию выполняют триггеры (эти устройства будут рассмотрены ниже).

### 25.8.3. Классификация по схемотехническим решениям

По схемотехническим решениям логические устройства имеют следующие виды.

От иерархической структуры классификации логических элементов, характерной для развития интегральных схем, остались названия: РТЛ – резисторно – транзисторная логика, ДТЛ – диодно – транзисторная логика, ТТЛ – транзисторно – транзисторная логика, ЭСЛ – эмиттерно - связанная логика, ИИЛ или  $I^2L$  – инжекторно – интегральная логика.

Для РТЛ, ДТЛ, ТТЛ – первая буква характеризует тип компонента, с помощью которого выполняется логическая операция.

Для других структур - характеризует схему соединения компонентов (ЭСЛ) или использованные компоненты и технологию их изготовления ( $I^2L$ ). Кроме того, имеются

логические элементы:

- логика на однотипных полевых транзисторах (n – МОП и p – МОП);

- логика на комплементарных полевых транзисторах (КМОП).

Для логики ТТЛ, ЭСЛ, ИИЛ используют биполярные транзисторы; для последних двух типов – полевые транзисторы. Самые распространённые сейчас ИС - это ИС, реализующие ТТЛ логику и её разновидности.

Эти схемы обладают быстродействием в среднем до  $F_{\max} = 20 - 50 \text{ МГц}$  и средней потребляемой мощностью.

ИС, реализующие ЭСЛ, являются наиболее быстродействующими, но у них велика потребляемая мощность. Базовые элементы ИИЛ в основном разработаны для использования в БИС. Для них характерна высокая, недоступная для ТТЛ и ЭСЛ степень интеграции, пониженное напряжение питания, простота согласования с элементами ТТЛ и

возможность регулирования быстродействия путём изменения потребляемой мощности.

Особенность  $n$  – или  $p$  – МОП логики – малое потребление. Однако они уступают по быстродействию логике на биполярных транзисторах. По мере развития технологии логика на  $n$  – или  $p$  – МОП постепенно становятся самой массовой.

### Выводы по теме

1. Схемы, в которых используются сигналы только двух типов (высокий и низкий уровень) называют цифровыми схемами.

Цифровые схемы являются основой микроЭВМ (персональных компьютеров).

2. В микроЭВМ используются сложные интегральные схемы (ИС), называемые микропроцессорами; кроме них в микроЭВМ входят большое количество запоминающих устройств (ЗУ) на ИС, блоки памяти, программные модули, решающие устройства и др.

3. Для генерации цифровых сигналов применяют бистабильные, моностабильные и астабильные мультивибраторы. Они иногда называются фиксаторами, одновибраторами и мультивибраторами, работающими в режиме свободных колебаний.

4. Система счисления – это код, в котором используют специальные символы для обозначения количества каких-либо объектов.

5. Система счисления – это код, в котором используют специальные символы для обозначения количества каких-либо объектов. В десятичной системе – это символы 0, 1, 2...9 – это система с основанием 10. В двоичной системе счисления используют только два символа 0 и 1, и поэтому ее называют системой счисления с основанием 2.

6. Логические элементы являются основными составными частями любых цифровых схем.

7. Логические элементы оперируют с двоичными числами, поэтому их называют двоичными логическими элементами, которые составляют основу любой, самой сложной ЭВМ.

8. Термин «логический» обычно применяют по отношению к процедуре принятия решения. В этой процедуре логический элемент - это такая схема, которая «решает», что ей ответить на выходе - «да» или «нет».

9. При потенциальном способе задания различают положительную и отрицательную логику. При положительной логике высокий уровень выходного напряжения соответствует единице (1), а низкий - нулю (0). При отрицательной логике высокий уровень соответствует нулю (0), а низкий - единице (1).

В таблице истинности для логического элемента указаны все возможные состояния по входу и соответствующие сигналы на выходе, т.е. таблица истинности дает исчерпывающую характеристику работы логического элемента, т.е. описывает логическую функцию.

10. Сокращенный способ записи логической функции называется булевым выражением (из булевой алгебры логики).

Булевы выражения - основной язык, универсальный для цифровой техники.

11. Логические элементы «И», «ИЛИ», «НЕ» представляют собой три основных типа схем, из которых komponуются все цифровые устройства.

12. Логические схемы «И-НЕ», «ИЛИ-НЕ» являются универсальными, наиболее широко применяемыми; на их базе можно реализовать практически все логические функции.

13. При потенциальном способе различают положительную или отрицательную логику. При положительной логи-

ке высокий уровень выходного сигнала соответствует единице (1), низкий – нулю (0). При отрицательной логике высокий уровень соответствует нулю (0), а низкий – единице (1). Эти определения справедливы для любой полярности используемых напряжений.

14. При потенциальном способе представления значение логической переменной может быть определено в любой произвольной промежуток времени. При импульсном способе это можно сделать в строго определённые промежутки времени – строго синхронно с моментом появления импульсов. Т.о., при импульсном способе представления возможен только синхронный способ счёта информации.

15. Совместимость уровней входных и выходных сигналов должна обеспечивать их согласование при покаскадном включении логических элементов.

16. Нагрузочная способность логического элемента характеризует его способность получать сигнал от нескольких источников информации и одновременно быть источником информации для нескольких других элементов.

17. При прохождении сигнала по цепочке последовательного соединённых логических элементов его амплитуда и форма не должны изменяться. Для этого каждый логический элемент должен обладать формирующими свойствами.

18. Под помехоустойчивостью понимается свойство нечувствительности логических элементов к отклонениям его входных сигналов от асимптотических значений.

19. Быстродействие логического элемента характеризуется временем задержки распространения сигнала. Различают время задержки при включении, при выключении и среднее время задержки распространения.

20. Для сравнения между собой микросхем используют интегральный параметр, называемый энергией переключе-



ния. Она находится как произведение потребляемой мощности и среднего времени задержки:  $P_{номп} \bullet t_{зад.ср.}$ .

21. По способу ввода – вывода информации логические устройства подразделяются на последовательные, параллельные и последовательно – параллельные.

22. По принципу действия все логические устройства делятся на два класса: комбинационные и последовательностные.

23. По схемотехническим решениям логические устройства имеют следующие виды: РТЛ – резисторно – транзисторная логика, ДТЛ – диодно – транзисторная логика, ТТЛ – транзисторно – транзисторная логика, ЭСЛ – эмиттерно – связанная логика, ИИЛ или  $I^2L$  – инжекторно – интегральная логика.

### Контрольные вопросы

1. Что такое аналоговый сигнал, цифровой сигнал?
2. Что такое ТТЛ уровни?
3. Что такое фиксатор (триггер-защелка)? Поясните на примере.
4. Что такое бистабильные, моностабильные и астабильные мультивибраторы.
5. Что такое система счисления, применяемая для цифровых сигналов?
6. Поясните суть термина «вес разряда» для систем счисления.
7. Для логического элемента «И» приведите:
  - схему из двух ключей;
  - описание на естественном языке
  - условные обозначения (по ГОСТ; по стандарту МЭК; по стандарту DIN; по стандарту milspec;
  - таблицу истинности;
  - булево выражение.

8. Для логического элемента «ИЛИ» приведите:
- схему из двух ключей;
  - описание на естественном языке
  - условные обозначения (по ГОСТ; по стандарту МЭК; по стандарту DIN; по стандарту milspek;
  - таблицу истинности;
  - булево выражение.
9. Для логического элемента «НЕ» приведите:
- описание на естественном языке
  - условные обозначения (по ГОСТ; по стандарту МЭК; по стандарту DIN; по стандарту milspek;
  - таблицу истинности;
  - булево выражение.
10. Для логического двойного инвертирования приведите:
- описание на естественном языке
  - условные обозначения (по ГОСТ; по стандарту МЭК; по стандарту DIN; по стандарту milspek;
  - таблицу истинности;
  - булево выражение.
11. Для логического элемента «И-НЕ» приведите:
- описание на естественном языке
  - условные обозначения (по ГОСТ; по стандарту МЭК; по стандарту DIN; по стандарту milspek;
  - таблицу истинности;
  - булево выражение.
12. Для логического элемента «ИЛИ-НЕ» приведите:
- описание на естественном языке
  - условные обозначения (по ГОСТ; по стандарту МЭК; по стандарту DIN; по стандарту milspek;
  - таблицу истинности;
  - булево выражение.
13. Для логического элемента «исключающее ИЛИ» приведите:

- описание на естественном языке
- условные обозначения (по ГОСТ; по стандарту МЭК; по стандарту DIN; по стандарту milspec;
- таблицу истинности;
- булево выражение.

14. Какие сигналы принято называть цифровыми?

15. Что такое «потенциальный способ» задания логических переменных?

16. Что такое «импульсный способ» задания логических переменных?

17. Что такое «синхронный способ» счёта информации?

18. Какими свойствами должны обладать элементарные узлы реального цифрового устройства для обеспечения его надёжной работы?

19. Что такое совместимость уровней входных и выходных сигналов элементарных узлов цифрового устройства?

20. Что такое нагрузочная способность логического элемента?

21. Дайте объяснение формирующим свойствам логического элемента.

22. Что понимается под помехоустойчивостью базовых элементов?

23. Приведите определение характеристики импульсной помехоустойчивости.

24. Чем определяется быстродействие логического элемента?

25. Какой интегральный параметр применяется для сравнения характеристик микросхем?

26. Какие способы ввода – вывода информации существуют для логических устройств? Приведите их особенности.

27. В чем различие всех логических устройств по их принципу действия?

## **26. Схемотехника цифровых интегральных схем.**

### **Схемотехника логических элементов**

Цифровыми интегральными схемами (ЦИС) называют микросхемы, работающие с цифровыми сигналами. Обычно используется двоичный код, т.е. сигнал может принимать одно из двух значений, условно называемых «0» или «1». Мы будем рассматривать положительную логику, т.е. считать, что логическому нулю соответствует низкий, а логической единице - высокий уровень напряжения. Основа большинства ЦИС - транзисторный ключ.

Транзисторный ключ является основным элементом устройств цифровой электроники и очень многих устройств силовой электроники. Параметры и характеристики транзисторного ключа в очень большой степени определяют свойства соответствующих схем. Качественное улучшение параметров и характеристик транзисторных ключей приводит к радикальному улучшению электронных устройств и часто сопровождается пересмотром использующихся схемотехнических решений.

Знание основных особенностей транзисторного ключа является обязательным условием при разработке импульсных силовых устройств. Эти знания оказывают существенную помощь и при конструировании устройств цифровой электроники.

Распространены ключи, в выходных цепях которых используются источники постоянного напряжения (источники питания). Назначение таких ключей состоит в том, чтобы создать на выходе или напряжение, близкое к нулю (когда ключ открыт), или напряжение, близкое к напряжению питания (когда ключ закрыт, а ток, потребляемый нагрузкой, подсоединенной к ключу, достаточно мал). Такая работа характерна для ключей цифровой электроники (их называют цифровыми ключами) и силовой электроники.

В информативной электронике используются также и ключи, имеющие другое назначение. Оно состоит в том, чтобы соединять или рассоединять источник входного, содержащего информацию аналогового сигнала и приемник этого сигнала. Такие ключи принято называть аналоговыми. Их также называют аналоговыми коммутаторами /1/.

### 26.1. Ключ на биполярном транзисторе

На рис.26.1 показана простейшая схема ключа на биполярном транзисторе.

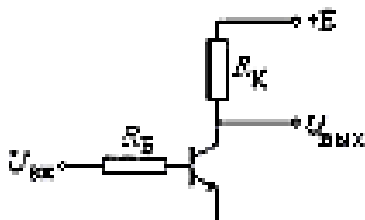


рис.26.1.

Пусть на вход подаются прямоугольные импульсы, т.е. чередование уровней логического нуля  $U^0$  и логической единицы  $U^1$ . Построив нагрузочные прямые на входной характеристике и на семействе выходных характеристик (рис. 26.2), найдем значения  $U^0$  и  $U^1$  на входе и на выходе. Из рис. 26.2. видно, что ток коллектора в режиме насыщения

$$I_{кн} = I^* = \frac{E}{R_k}$$

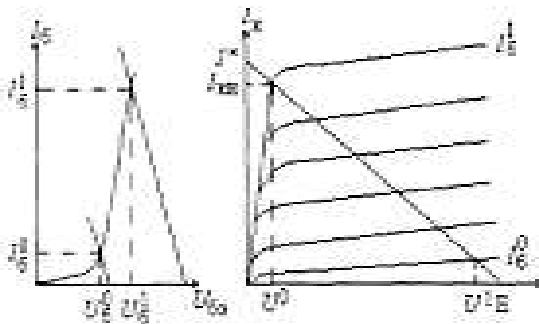


рис 26.2

Вследствие падения напряжения на сопротивлении  $R_c$  напряжения  $U_c^0$  и  $U_c^1$  меньше логических уровней на входе. Обычно  $R_k$  и  $R_b$  подбирают так, чтобы логические уровни на входе и на выходе были одинаковыми. При  $U = U^0$  транзистор закрыт, ток коллектора мал, но напряжение на выходе соответствует уровню логической единицы и приближается к напряжению питания  $E$ . При  $U_{ex} = U^1$  транзистор открыт и насыщен, а выходное напряжение  $U = U^0$ . Это значит, что транзисторный ключ инвертирует логические сигналы, т.е. является инвертором.

## 26.2. Транзисторная логика с непосредственными связями (НСТЛ)

Схема показана на рис. 26.3. Если на оба входа подан низкий уровень напряжения, т.е.  $X1 = X2 = 0$ , то оба транзистора закрыты, токи коллекторов малы, напряжение на выходе схемы почти равно напряжению питания  $U_k = \sim E$ , т.е.  $Y = 1$ . Если хотя бы на одном из входов будет высокий уровень напряжения (например,  $X_1 = 1$ ), то один из тран-

зисторов открыт и насыщен, ток коллектора  $I_{кн} = I^* = \frac{E}{R}$ , на коллекторе низкое остаточное напряжение, т.е.  $Y = 0$ . Таким образом, схема НСТЛ выполняет операцию *ИЛИ-НЕ* (табл.26.1):

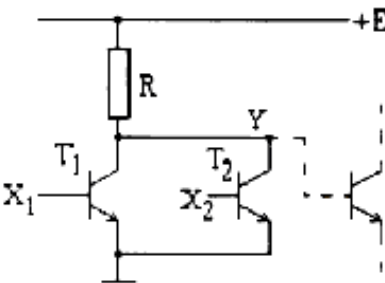


рис.26.3

табл.26.1

|        | X1 | X2 | Y |
|--------|----|----|---|
| закрыт | 0  | 0  | 1 |
|        | 0  | 1  | 0 |
|        | 1  | 0  | 0 |
| открыт | 1  | 1  | 0 |

Достоинство схемы - простота и хорошее быстродействие. Напомним, что эмиттерный переход кремниевого транзистора открывается при  $U_{\text{эз}}=0,6$  В. Поскольку входные сигналы подаются непосредственно на базы, размах логического сигнала  $\Delta U = 0,6$  В.

На рис. 26.3 пунктиром показан вход следующей схемы, являющийся нагрузкой для данной схемы.

Большим недостатком НСТЛ является то, что при небольшом разбросе входных характеристик транзисторов ток нагрузки распределяется неравномерно. Это снижает надежность работы таких схем.

### 26.3. Схема РТЛ (транзисторная логика с резистивной связью)

отличается от НСТЛ только наличием резисторов в базовых цепях (рис.26.4).

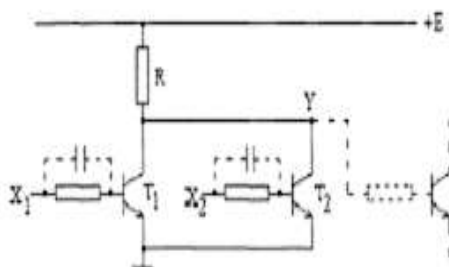


рис.26.4

В схемах РТЛ не сказывается разброс входных характеристик, размах входного сигнала увеличивается до 1,5...2 В, но резко уменьшается быстродействие, так как увеличивается время нарастания.

Чтобы увеличить быстродействие, пытались применить схему РЕТЛ (резистивно-емкостная транзисторная логика), т.е. параллельно базовым резисторам подключить конденсаторы, как показано на рис. 26.4 пунктиром.

Во время переключения конденсаторы закорачивают резисторы, что уменьшает длительность переднего фронта импульса.



Однако конденсаторы занимают большую площадь на подложке, что ведет к уменьшению степени интеграции. Кроме того, всем схемам с коллекторной связью присущ общий недостаток - зависимость уровня логической единицы  $U^1$  от числа нагрузок. Чем больше однотипных микросхем подключено к выходу, тем больший ток течет через резистор  $R_B$  базовые цепи нагрузок, и тем меньше становится выходное напряжение  $U_{вых} = U^1 = E - IR$ . Нагрузочная способность этих схем мала ( $n < 4$ ). Все эти недостатки привели к отказу от схем с коллекторной связью и в современных микросхемах они не применяются.

#### 26.4. Схема ДТЛ (диодно-транзисторной логики)

показана на рис.26.5.

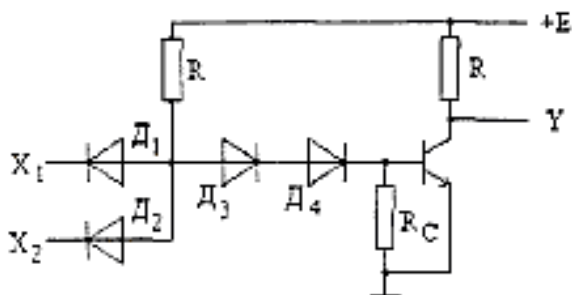


рис.26.5

Если на оба входа подан высокий положительный потенциал ( $X1 = X2 = 1$ ), то входные диоды будут закрыты, ток от плюса источника питания потечет через  $D3$  и  $D4$  в базу транзистора. Транзистор переходит в режим насыщения;

при этом напряжение коллектора уменьшается до величины остаточного напряжения  $U_{\text{отлх}} = E - I_{\text{кн}} R$ , т.е.  $Y = 0$ . Если хотя бы на одном входе низкий уровень (например,  $X_1 = 0$ ), то входные диоды открыты и ток течет от плюса источника в коллектор предшествующей схемы. Поскольку на открытом диоде падает  $U = 0,6 \dots 0,7$  В, на базе транзистора с учетом диодов Д3 и Д4 будет отрицательный потенциал:

$$U = U - 2U = -U = -(0,6 \dots 0,7) \text{В}.$$

Транзистор закрыт, напряжение коллектора почти равно напряжению питания  $E$ . Таким образом, схема ДТЛ выполняет логическую операцию И-НЕ (табл. 26.2):

табл.26.2

| X1 | X2 | D1,D2 | T     | Y |
|----|----|-------|-------|---|
| 0  | 0  | откр. | закр. | 1 |
| 0  | 1  | откр. | закр. | 1 |
| 1  | 0  | откр. | закр. | 1 |
| 1  | 1  | закр. | откр. | 0 |

Размах логического сигнала  $\Delta U \approx E$  и практически не зависит от нагрузки, так как ток нагрузки втекает в коллектор через диоды последующей схемы. Нагрузочная способность ДТЛ  $n = 10$ , время задержки  $t_3 = 10 \dots 15$  нс. Недостаток – много диодов, которые занимают большую площадь на подложке (напомним: диоды – это транзисторы в диодном включении).

## 26.5. ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика)

Схема ТТЛ с простым инвертором показана на рис.26.6:

Сравнение рис.26.5 и 26.6 показывает, что ТТЛ принципиально не отличается от ДТЛ. В качестве входных диодов используются эмиттерные переходы, а роль диода смещения выполняет коллекторный переход многоэмиттерного транзистора. Транзистор  $T_1$  так же, как в схеме ДТЛ, является инвертором.

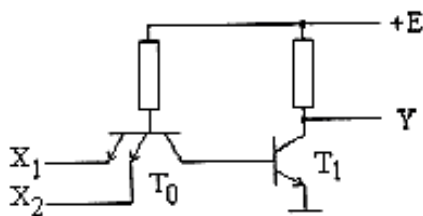


рис.26.6

Схема выполняет логическую операцию *И-НЕ* (см. табл. 26.2). В отличие от ДТЛ вместо двух диодов смещения используется только один коллекторный переход, поэтому в закрытом состоянии транзистора  $T_1$  на его базе будет не отрицательный, а нулевой потенциал, что незначительно снижает помехоустойчивость. В реальных схемах вместо  $T_1$  применяется сложный инвертор, компенсирующий этот недостаток. Иногда в сложном инверторе используют транзисторы с диодом Шоттки, что заметно повышает быстродействие. Такие схемы сокращенно называют ТТЛШ. Многоэмиттерный транзистор занимает гораздо меньшую площадь, чем соответствующее количество диодов. Нагрузочная способность  $n > 10$ , время задержки  $t_3 = 3 \dots$

10

нс. Схемы ТТЛ и ТТЛШ широко используются в микроэлектронике. В качестве примеров можно назвать отечест-

венные серии К155 (ТТЛ) и К555 (ТТЛШ) и соответствующие зарубежные аналоги 8И74 и 8И74Б5.

## 26.6. Эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ)

Принципиальная схема показана на рис.26.7. Транзистор Т3 совместно с любым из входных транзисторов образуют переключатель тока. Схема переключателя тока аналогична схеме дифференциального усилителя, но на базу Т3 подано постоянное напряжение смещения  $U_0$ , при котором Т3 открыт и находится в активном режиме.

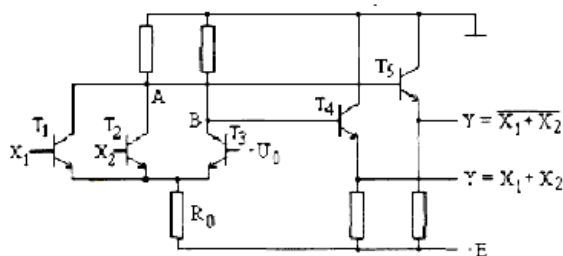


рис. 26.7

Ток коллектора в активном режиме равен

$$I_K = \alpha \cdot I_E = \alpha \cdot I_0 \cdot \exp\left(\frac{U_{\bar{\sigma}\bar{\sigma}}}{\varphi_T}\right),$$

т.е. сильно зависит от напряжения  $U_{\bar{\sigma}\bar{\sigma}}$ . Если на базе Т1 (или Т2) напряжение  $U_{\bar{\sigma}\bar{\sigma}} = U_0$ , ток, текущий через  $R_0$ , распределяется поровну между Т1 и Т3. Если же напряжение на базе входного транзистора немного (на 0,1...0,15 В) выше или ниже  $U_0$ , весь ток переключается соответственно в Т1 (Т2) или в Т3. Потенциалы точек А и В при этом

всегда противофазны. Эмиттерные повторители на транзисторах Т4 и Т5 обеспечивают согласование входных и выходных уровней последующего и предыдущего логических элементов.

Напомним, что на открытом эмиттерном переходе падение напряжения  $U^* = 0,6 \text{ В}$  (при  $T = 300^\circ\text{К}$ ). Если Т1 и Т2 закрыты, напряжение  $U_A \approx E$  и на выходе эмиттерного повторителя Т5 уровень логической единицы  $U^1 = E - U^*$ . Полагая, что на коллекторе открытого транзистора напряжение  $U_K = U_{\text{бэ}} = U^*$  (граница между активным режимом и насыщением), найдем уровень логического нуля:  $\alpha \cdot I_{II}$   
 $U^0 = U^1 - U^* = E - 2U^*$ .

Размах логического сигнала равен  $\Delta U = U^1 - U^0 \approx 0,7\text{В}$ . Поскольку транзисторы работают в активном режиме, схемы ЭСЛ обеспечивают малое время задержки  $t_3 = 0,7...3 \text{ нс}$ .

Как видно из схемы, на одном из выходов выполняется логическая операция *ИЛИ*, а на другом - *ИЛИ-НЕ* (табл.26.3).

Обычно в схемах ЭСЛ заземляется плюс источника питания.

табл.26.3

|       | Т1 | Т2 | А     | Т5    | У1<br>(или-<br>не) |  | Т3    | В    | Т4    | У2<br>(или) |
|-------|----|----|-------|-------|--------------------|--|-------|------|-------|-------------|
| закр. | 0  | 0  | 1(+E) | откр. | 1(+E)              |  | откр. | 0    | закр. | 0           |
|       | 0  | 1  | 0     | закр. | 0                  |  | закр. | (+E) | откр. | 1(+E)       |
|       | 1  | 0  | 0     | закр. | 0                  |  | закр. | (+E) | откр. | 1(+E)       |
| откр. | 1  | 1  | 0     | закр. | 0                  |  | закр. | (+E) | откр. | 1(+E)       |

## 26.7. Логические элементы с инжекционным питанием (И<sup>2</sup>Л)

Транзисторные логические элементы с инжекционным питанием (ТЛИП) называют также инжекционной интегральной логикой, откуда и возникло нелепое, но общепринятое сокращение  $I^2L$ .

Элементы ТЛИП в дискретном исполнении неизвестны, весьма специфичная схемотехника и технология ТЛИП реализуются в больших интегральных схемах (БИС). Принцип работы ТЛИП поясняется рис. 26.8.

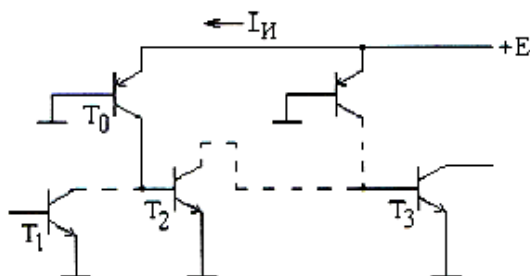


рис.26.8

Транзисторы T<sub>0</sub> и T<sub>2</sub> - это простейший клапан (инвертор) с инжекционным питанием, а T<sub>1</sub> и T<sub>3</sub> относятся к предыдущей и последующей схемам. Транзистор T<sub>0</sub> с проводимостью *p-n-p* выполняет роль генератора тока, питающего цепь базы n-p-n транзистора T<sub>2</sub>. Ток I<sub>и</sub> создается инжекцией дырок из эмиттера p-n-p транзистора, поэтому называется током инжекции, а сам эмиттер называют инжектором. Питание схемы через инжектор (т.е. без резисторов в цепи питания) позволяет существенно уменьшить напря-

жение питания. Из рис. 15.8 видно, что напряжение питания равно падению напряжения на инжекторном переходе  $E = U^* \approx 0,6B$ .

По некоторым причинам в реальных схемах  $E = 1 \dots 1,5 B$ . Пусть на входе (на базе  $T_2$ ) низкий потенциал ( $T_1$  открыт). Тогда ток коллектора транзистора  $T_0$ , равный  $\alpha \cdot I_{II}$ , замыкается через  $T_1$  и не течет в базу  $T_2$ .

Транзистор  $T_2$  закрыт и на выходе инвертора (на базе  $T_3$ ) будет высокий потенциал, т.е. выполняется логическая операция *НЕ* (табл.26.4):

табл.26.4

| T1     | База T2 | T2     | базаT3 |
|--------|---------|--------|--------|
| открыт | 0       | закрыт | 1      |

Обычно параллельно соединяются несколько инверторов, тогда реализуется логическая операция *ИЛИ-НЕ*.

В схеме рис. 26.8 базы всех *p-n-p* транзисторов заземлены, а эмиттеры подключены к шине +Е, поэтому в реальной схеме ТЛИП вместо нескольких *p-n-p* транзисторов используют один многоколлекторный *p-n-p* транзистор. Для развязки выходов, подключаемых к отдельным нагрузкам, *p-n-p* транзисторы тоже делают многоколлекторными. В результате схема приобретает вид рис.26.9.

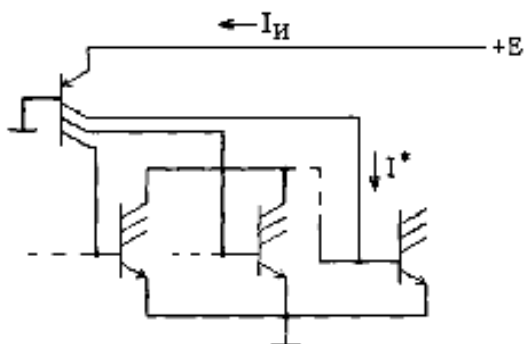


рис. 26.9

Каждый из коллекторных токов  $p-n-p$  транзистора равен:

$$I^* = \frac{\alpha \cdot I_u}{n} \approx \frac{I_u}{n}$$

Конструктивно-технологическое своеобразие ТЛИП состоит в высокой степени интеграции.

Это достигается тем, что примыкающая к подложке  $n$ -область выполняет роль и базы  $p-n-p$  транзистора и эмиттеров всех  $n-p-n$  транзисторов; базой  $n-p-n$  и коллектором  $p-n-p$  транзисторов является общая  $p$ -область. Разрез структуры ТЛИП показан на рис. 26.10. Достоинствами ТЛИП являются: низкое напряжение питания; малая потребляемая мощность; высокая плотность упаковки; не нужны диэлектрические карманы и разделительная диффузия.



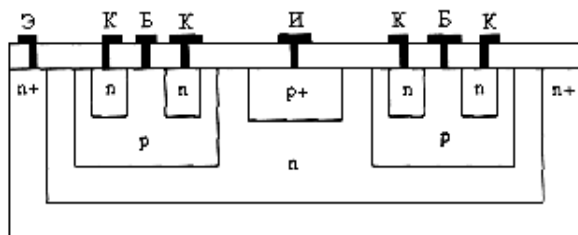


рис. 26.10

## 26.8. Логические элементы на полевых транзисторах

Ключи на полевых транзисторах широко используются для коммутации аналоговых и цифровых сигналов.

В аналоговых ключах обычно используют транзисторы с управляющим р-п -переходом или МДП-транзисторы с индуцированным каналом.

В цифровых ключах обычно используют МДП-транзисторы с индуцированным каналом. В последнее время полевые транзисторы все чаще используют в силовой импульсной электронике.

Ключи на полевых транзисторах отличаются малым остаточным напряжением. Они могут коммутировать слабые сигналы (в единицы микровольт и меньше). Это следствие того, что выходные характеристики полевых транзисторов проходят через начало координат.

Однако минимальное сопротивление включенного ключа на полевом транзисторе может быть больше, чем ключа на биполярном транзисторе (т. е. наклон самой круто поднимающейся характеристики полевого транзистора может быть меньше, чем наклон соответствующей характеристики биполярного транзистора). Поэтому при значительном токе падение напряжения на полевом тран-

зисторе может быть больше, чем падение напряжения на биполярном транзисторе.

В статическом состоянии ключ на полевом транзисторе потребляет очень малый ток управления. Однако этот ток увеличивается при увеличении частоты переключения.

Очень большое входное сопротивление ключей на полевых транзисторах фактически обеспечивает гальваническую развязку входных и выходных цепей. Это позволяет обойтись без трансформаторов в цепях управления.

Ключи на полевых транзисторах часто менее быстродействующие в сравнении с ключами на биполярных транзисторах.

### 26.8.1. Ключ на МДП-транзисторах с динамической нагрузкой

Ключ на МДП-транзисторах можно выполнить с резистивной нагрузкой, подобно ключу на биполярных транзисторах, но технологически целесообразнее применять так называемую динамическую нагрузку. Схема ключа показана на рис.26.11а).

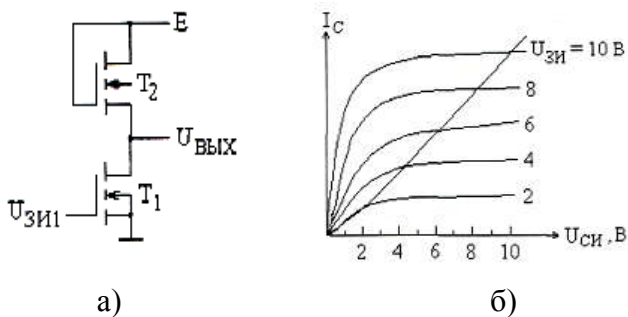


рис.26.11

В качестве сопротивления нагрузки используется нагрузочный МДП-транзистор, затвор которого соединяется с истоком, т.е.  $U_{зи2} = U_{си2}$ . Из рис. 26.11 б) видно, что точ-

ки, соответствующие равным напряжениям стока и затвора, образуют линию, которая является вольтамперной характеристикой нагрузочного транзистора. На рис. 26.12 показано, как нанести линию нагрузки на семейство стоковых характеристик активного транзистора  $T_1$ .

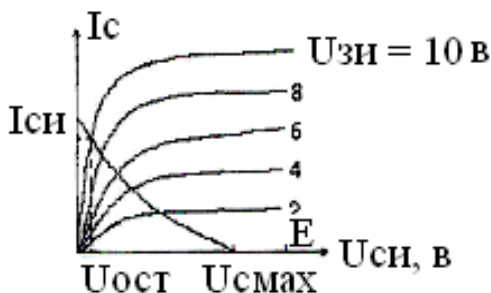


рис. 26.12

Нагрузочный транзистор  $T_2$  работает на пологом участке стоковой характеристики, поэтому его вольтамперную характеристику запишем в виде:

$$I_c = 0,5b(U_{cu2} - U_{o2})^2$$

где  $b$  - удельная крутизна транзистора,  $U_{o2}$  - напряжение отсечки нагрузочного транзистора.

Если на входе низкий уровень  $U_{зи} < U_{o1}$ , то нижний транзистор закрыт и ток стока равен нулю. Тогда на выходе ключа будет максимальное напряжение:

$$U_{выхmax} = U_{cu1} = E - U_{o2}$$

Если на вход подан высокий уровень напряжения  $U_{зи} > U_{o1}$ , то  $T_1$  открыт, его сопротивление мало и все на-

пряжение питания падает на верхнем транзисторе. Ток стока насыщения:

$$I_{cu} = 0,5b(E - U_{o2})^2$$

Выходное напряжение при этом будет минимальным (остаточное напряжение).

При обычных значениях параметров транзисторов остаточное напряжение составляет 50...150 мВ.

При последовательном соединении нескольких активных транзисторов получим логический элемент И-НЕ (рис. 26.13 а).

Параллельное соединение активных транзисторов позволяет выполнить логическую операцию ИЛИ-НЕ (рис. 26.13 б).

Наиболее часто используют логические схемы на МДП-транзисторах с индуцированным n-каналом.

Поскольку входной ток МДП-транзистора практически равен нулю, логические уровни не зависят от нагрузки.

Нагрузочная способность ограничивается только влиянием емкостей затвор-исток, т.е. уменьшением быстродействия.

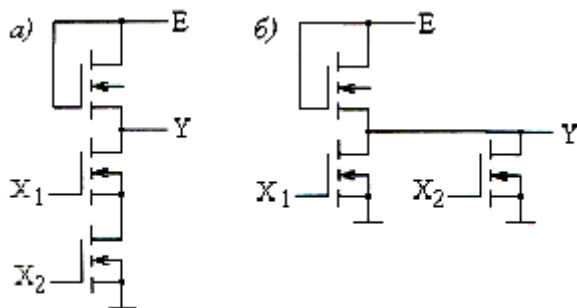


рис. 26.13

### 26.8.2. Логические элементы на комплементарных МДП - транзисторах (КМДП)

Ключ КМДП (рис. 26.14 а) состоит из пары транзисторов с различной проводимостью канала, при этом затворы р-канального и n-канального транзисторов соединены вместе.

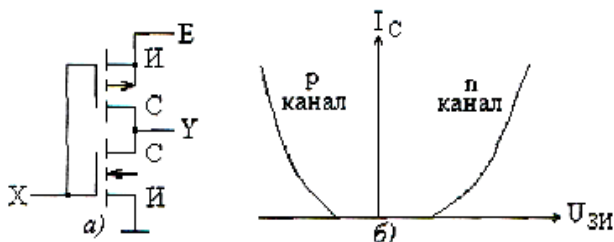


рис. 26.14

На рис. 26.14 б) показаны характеристики прямой передачи транзисторов с индуцированным р-каналом и с индуцированным n-каналом.

Допустим, на вход подано положительное напряжение, превышающее пороговое. Тогда нижний транзистор открыт. Это же напряжение относительно общей шины приложено к затвору верхнего транзистора, но его исток соединен с плюсом источника питания, поэтому напряжение затвор-исток верхнего (р-канального) транзистора будет меньше порогового и верхний транзистор закрыт. На выходе будет очень низкое остаточное напряжение, т.е.  $Y = 0$ . Поскольку верхний транзистор закрыт, тока практически нет, энергия от источника питания не потребляется. Если  $X = 0$ , т.е. на входе низкое напряжение, то нижний (n-канальный) транзистор закрыт. На затворе верхнего (р-канального) транзистора будет большое отрицательное

(относительно истока) напряжение, верхний транзистор открыт. Выходное напряжение почти равно напряжению питания  $E$ , что соответствует состоянию логической единицы на выходе  $Y = 1$ .

Таким образом, ключ КМДП отлично справляется с ролью инвертора, размах логического сигнала почти равен напряжению питания, но при любом логическом состоянии ток равен нулю, ибо один из транзисторов закрыт.

Эта особенность схем КМДП - весьма малая потребляемая мощность - является большим достоинством по сравнению с ранее рассмотренными логическими элементами.

Для выполнения операции И-НЕ используется схема рис. 26.15 а), в которой несколько нижних n-канальных транзисторов соединяются последовательно, а такое же число верхних p-канальных – параллельно (табл.26.5).

Элемент ИЛИ-НЕ получается при параллельном соединении нижних и последовательном верхних транзисторов (рис. 26.15 б). В этом можно убедиться, рассматривая все возможные комбинации входных логических сигналов (табл.26.6). Эти схемы сохраняют упомянутое преимущество ключей КМДП.

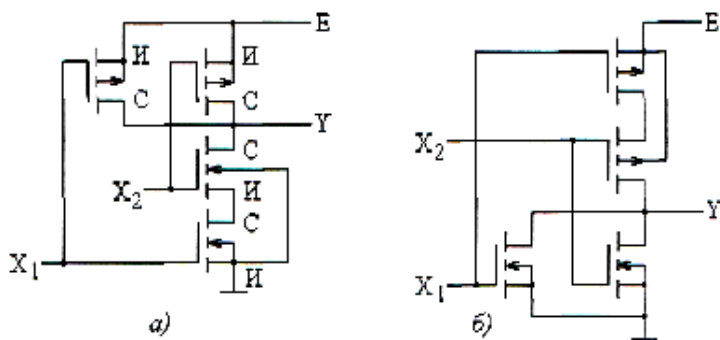


рис. 26.15

а) И-НЕ (табл.26.5):

табл.26.5

|                                |                            | X1 | X2 | Y |
|--------------------------------|----------------------------|----|----|---|
| верхний<br>(паралл.)<br>открыт | нижний<br>закр.            | 0  | 0  | 1 |
|                                |                            | 0  | 1  | 1 |
|                                |                            | 1  | 0  | 1 |
| верхний<br>закр.               | нижний<br>(посл.)<br>откр. | 1  | 1  | 0 |

б) ИЛИ-НЕ (табл.26.6):

табл.26.6

|                              |                              | X1 | X2 | Y |
|------------------------------|------------------------------|----|----|---|
| верхний<br>(посл.)<br>открыт | нижний<br>закр               | 0  | 0  | 1 |
|                              |                              | 0  | 1  | 0 |
|                              |                              | 1  | 0  | 0 |
| верхний<br>закр.             | нижний<br>(паралл.)<br>откр. | 1  | 1  | 0 |

### 26.8.3. Динамическая логика на МДП-транзисторах

В схемах динамической логики на МДП-транзисторах (ДМДП) выходная емкость  $C_{\text{си}}$  логического транзистора и входная емкость  $C_{\text{зи}}$  следующего транзистора используются для хранения информации. Это возможно потому, что разряд емкости через большое входное сопротивление сле-

дующего МДП-транзистора происходит достаточно медленно. Схема инвертора ДМДП показана на рис.26.16.

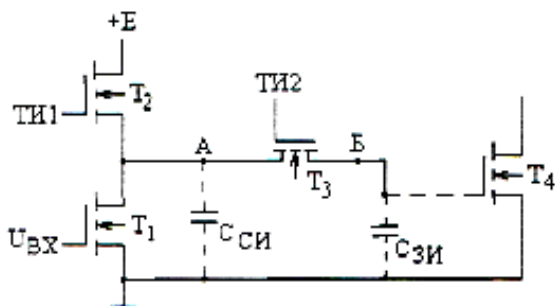


рис. 26.16

На затворы T2 и T3 подаются последовательности тактовых импульсов, причем ТИ1 и ТИ2 сдвинуты по фазе. При наличии тактового импульса ТИ1 пара транзисторов T1 и T2 работает как обычный инвертор, т.е. в точке А будет либо небольшое остаточное напряжение, либо напряжение  $U_a = E$ . В промежутке между импульсами ТИ1 транзистор T2 закрыт, мощность от источника питания не потребляется, но соответствующий уровень напряжения в точке А сохраняется емкостью  $C_{си}$ .

Некоторое различие уровней логического нуля при наличии или отсутствии импульса ТИ1 устраняется ключом T3. При приходе импульса ТИ2 ключ открывается и на выходе, т.е. на емкости  $C_{зи}$  следующего логического элемента устанавливается напряжение  $U^0 = 0$ , либо  $U^1 = E$ . Схемы ДМДП обеспечивают выигрыш в потребляемой мощности, определяемый скважностью импульсов. Работа схемы ДМДП иллюстрируется рисунком 26.17:



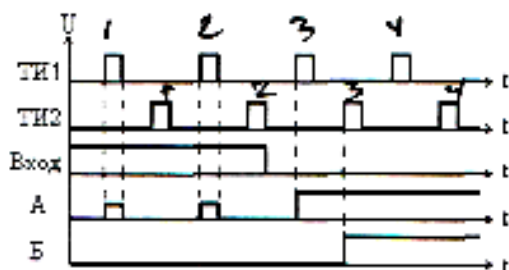


рис. 26.17

## 26.9. Сравнение параметров основных типов интегральных логических схем

Каждый из рассмотренных типов логических схем имеет свои достоинства и недостатки. Обобщенным параметром является средняя работа переключения  $A_{ср} = P_{ср} \cdot t_z$ .

При заданной работе переключения хорошее быстродействие связано с большой потребляемой мощностью и наоборот.

Параметры некоторых серий цифровых ИС представлены в табл.26.7.

табл.26.7

| Серия и тип логики | $E, В$ | $\Delta U, В$ | $U_{н}, В$ | $t_1, нс$ | $P_{ср}, мВт$ | Кэф. разветвления - n |
|--------------------|--------|---------------|------------|-----------|---------------|-----------------------|
| K500. ТЛЭС         | -2     | 0,67          | 0,125      | 2,9       | 45            | 15                    |
| K155. ТТЛ          | 5      | 2             | 0,4        | 22        | 27            | 10                    |
| 555. ТТЛШ          | 5      | 2,2           | 0,5        | 20        | 7,5           | 10                    |
| И <sup>2</sup> Л   | 0,7    | 0,6           | 0,05       | 0...100   | 0,01...0,1    | 5                     |
| K501. р-МДП        | -27    | 8,5           | 1          | >200      | 200           | 30                    |
| K564. КМДП         | 3...15 | $E-0,01$      | 1,5        | 80        | 0,0001        | >100                  |

## Выводы по теме

1. Цифровыми интегральными схемами (ЦИС) называют микросхемы, работающие с цифровыми сигналами. Обычно используется двоичный код, т.е. сигнал может принимать одно из двух значений, условно называемых «0» или «1». Основа большинства ЦИС - транзисторный ключ.

2. В информативной электронике используются также и ключи, имеющие другое назначение. Оно состоит в том, чтобы соединять или рассоединять источник входного, содержащего информацию аналогового сигнала и приемник этого сигнала. Такие ключи принято называть аналоговыми. Их также называют аналоговыми коммутаторами.

3. Достоинство схем транзисторной логики с непосредственными связями (НСТЛ) - простота и хорошее быстродействие. Большим недостатком НСТЛ является то, что при небольшом разбросе входных характеристик транзисторов ток нагрузки распределяется неравномерно. Это снижает надежность работы таких схем.

4. Схема РТЛ (транзисторная логика с резистивной связью) отличается от НСТЛ только наличием резисторов в базовых цепях. В схемах РТЛ не сказывается разброс входных характеристик, но резко уменьшается быстродействие, так как увеличивается время нарастания. Нагрузочная способность этих схем мала

( $n < 4$ ). Эти недостатки привели к отказу от схем с коллекторной связью и в современных микросхемах они не применяются.

5. Размах логического сигнала в логических схемах ДТЛ практически не зависит от нагрузки, так как ток нагрузки втекает в коллектор через диоды последующей схемы. Нагрузочная способность ДТЛ  $n = 10$ , время задержки

$t_3=10\ldots15$  нс. Недостаток – много диодов, которые занимают большую площадь на подложке.

6. Логические схемы ТТЛ принципиально не отличаются от схем ДТЛ. В качестве входных диодов используются эмиттерные переходы, а роль диода смещения выполняет коллекторный переход многоэмиттерного транзистора. Иногда используют транзисторы с диодом Шоттки, что заметно повышает быстродействие. Такие схемы сокращенно называют ТТЛШ.

Нагрузочная способность  $n > 10$ , время задержки  $t_3=3\ldots10$  нс. Схемы ТТЛ и ТТЛШ широко используются в микроэлектронике.

7. Схемы ЭСЛ обеспечивают малое время задержки  $t_3=0,7\ldots3$  нс. На одном из выходов схемы выполняется логическая операция *ИЛИ*, а на другом - *ИЛИ-НЕ*.

8. Транзисторные логические элементы с инжекционным питанием (ТЛИП) называют также инжекционной интегральной логикой, откуда и возникло нелепое, но общепринятое сокращение *И<sup>2</sup>Л*. Элементы ТЛИП в дискретном исполнении неизвестны, весьма специфичная схемотехника и технология ТЛИП реализуются в больших интегральных схемах (БИС). Достоинствами ТЛИП являются: низкое напряжение питания; малая потребляемая мощность; высокая плотность упаковки.

9. В цифровых ключах обычно используют МДП-транзисторы с индуцированным каналом. В последнее время полевые транзисторы все чаще используют в силовой импульсной электронике.

10. Ключи на полевых транзисторах отличаются малым остаточным напряжением. Они могут коммутировать слабые сигналы (в единицы микровольт и меньше).

11. Очень большое входное сопротивление ключей на полевых транзисторах фактически обеспечивает гальваниче-

скую развязку входных и выходных цепей. Это позволяет обойтись без трансформаторов в цепях управления.

12. Ключи на полевых транзисторах часто менее быстродействующие в сравнении с ключами на биполярных транзисторах.

13. Поскольку входной ток МДП-транзистора практически равен нулю, логические уровни логических элементов на МДП-транзисторах не зависят от нагрузки. Нагрузочная способность ограничивается только влиянием емкостей затвор-исток, т.е. уменьшением быстродействия.

14. Особенность схем КМДП - весьма малая потребляемая мощность - является большим достоинством по сравнению с ранее рассмотренными логическими элементами.

15. В схемах динамической логики на МДП-транзисторах (ДМДП) выходная емкость  $C_{\text{си}}$  логического транзистора и входная емкость  $C_{\text{зи}}$  следующего транзистора используются для хранения информации. Это возможно потому, что разряд емкости через большое входное сопротивление следующего МДП-транзистора происходит достаточно медленно. Схемы ДМДП обеспечивают выигрыш в потребляемой мощности, определяемый скважностью импульсов.

16. Каждый из рассмотренных типов логических схем имеет свои достоинства и недостатки. Обобщенным параметром является средняя работа переключения  $A_{\text{ср}} = P_{\text{ср}} \cdot t_{\text{з}}$ . При заданной работе переключения хорошее быстродействие связано с большой потребляемой мощностью и наоборот.

### Контрольные вопросы

1. Объясните работу ключа на биполярном транзисторе как основного элемента цифровых схем.

2. Какую логическую операцию выполняет схема транзисторной логики с непосредственными связями (НСТЛ)? Объясните работу схемы.

3. Приведите отличия схемы РТЛ (транзисторная логика с резистивной связью) и особенности ее работы.

4. Какую логическую операцию выполняет схема ДТЛ? Приведите особенности ее работы.

5. ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика). Приведите схему, ее достоинства и недостатки.

6. Какие логические операции выполняются эмиттерно-связанной логикой (ЭСЛ)? Приведите особенности работы схемы.

7. Логические элементы с инжекционным питанием ( $I^2L$ ). Какие логические операции выполняются этой логикой? Приведите особенности работы схемы.

8. Логические элементы на МДП-транзисторах. Приведите особенности их работы.

9. Логические элементы на комплементарных МДП - транзисторах (КМДП). Приведите особенности их работы.

10. Приведите особенности схем динамической логики на МДП-транзисторах (ДМДП).

11. Приведите сравнение параметров основных типов интегральных логических схем.

## 27. Коды. Преобразователи кодов. Шифраторы. Мультиплексоры

В цифровой технике применяют много специальных кодов (кроме двоичных, десятичных) для представления чисел и даже букв алфавита.

Для перевода десятичных в двоичные и обратно применяются специальные схемы шифраторов и дешифраторов. Рассмотрим другие схемы и методы кодирования, шифрования и дешифрования.

### 27.1. Двоично – десятичный код 8421

Представим десятичное число 926 в двоичной форме. Ранее мы уже рассмотрели этот способ (табл.27.1):

табл.27.1

|                              |   |                  |
|------------------------------|---|------------------|
| $926/2=463$ с остатком (нет) | 0 | Разряд с весом 1 |
| $463/2=231$ с остатком       | 1 | ...2             |
| $231/2=115$ с остатком       | 1 | ...4             |
| $115/2=57$ с остатком        | 1 | ...8             |
| $57/2=28$ с остатком         | 1 | ...16            |
| $28/2=14$ с остатком (нет)   | 0 | ...32            |
| $14/2=7$ с остатком (нет)    | 0 | ...64            |
| $7/2=3$ с остатком           | 1 | ...128           |
| $3/2=1$ с остатком           | 1 | ...256           |
| $1/2=0$ с остатком           | 1 | ...512           |

Т.о., получили число  $1110011110_2$ . Это число в чисто двоичном коде мало о чём говорит. Преобразуем  $926_{10}$  не-

сколько иначе с использованием двоично — десятичного кода 8421:

|                   | Сотни | Десятки | Единицы |
|-------------------|-------|---------|---------|
| Десятичное число  | 9     | 2       | 6       |
|                   | ↓     | ↓       | ↓       |
| Число в коде 8421 | 1001  | 0010    | 0110    |

В результате получили число 100100100110 в коде 8421: правая группа 0110 соответствует разряду с весом 1 в десятичном числе; средняя группа 0010 даёт значение разряда с весом 10, а левая группа 1001 представляет разряд с весом 100 в десятичном числе

Возьмём число 0001 1000 0111 0001 в коде 8421. Определим, что это за число в десятичном коде (табл. 27.2):

табл. 27.2

|                   | тысячи | сотни | десятки | единицы |
|-------------------|--------|-------|---------|---------|
| Число в коде 8421 | 0001   | 1000  | 0111    | 0001    |
| Десятичное число  | 1      | 8     | 7       | 1       |

Т.е. число 1871. Ограничение: в коде 8421 запрещены комбинации 1010; 1011; 1100; 1101; 1110; 1111.

Код 8421 широко применяется в цифровых системах. Существуют и другие коды, например код 4221; код с избытком 3 и другие.

## 27.2. Код с избытком 3

К каждой цифре десятичного числа прибавляем 3 и заменяем полученные цифры соответствующими четырёхзначными двоичными числами. Например:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Десятичное число} & & \text{Число в коде с избытком 3} \\
 4 + 3 = 7 & \longrightarrow & 0111 \\
 & & \text{Преобразование в двоичную систему}
 \end{array}$$

Значимость двоичных чисел в разрядах отличается от обычной двоичной системы и от чисел в коде 8421 (табл.27.3).

табл.27.3

| Десятичное число | Число в коде с избытком 3 |        |       |
|------------------|---------------------------|--------|-------|
| 3                | 0110                      |        |       |
| 6                | 1001                      |        |       |
| 9                | 1100                      |        |       |
| 14               | 0100                      | 0111   |       |
| 38               | 0110                      | 1001   |       |
| 459              | 0111                      | 1000   | 1100  |
| 606              | 1001                      | 0011   | 1001  |
|                  | сотни                     | дес-ки | ед-цы |

Код с избытком 3 используется во многих цифровых схемах. Однако, наиболее распространён код 8421.



### 27.3. Код Грея

Важной особенностью кода Грея является то, что при переходе к следующему, ниже расположенному числу, достаточно в предыдущем числе изменить только одну цифру. Этот код нельзя использовать в арифметических схемах. Его применяют во входных и выходных устройствах цифровых систем. Довольно трудно приводить десятичные числа в код Грея и наоборот. Для этого используются специальные электронные дешифраторы.

### 27.4. Преобразователи кодов

При передаче информации по линиям связи удобно использовать коды, позволяющие например, уменьшить вероятность появления ошибки, или даже исправлять её в дальнейшем. Примерами таких кодов являются коды, построенные по принципу 2 из 5 (в которых из пяти символов два всегда имеют единичные значения), коды с проверкой чётности или нечётности, коды Хемминга и др.

В связи с этим всегда стоит задача преобразования информации из одного кода в другой. Эти задачи решают комбинационные устройства – преобразователи кодов.

Преобразователем кода называется комбинационное устройство, предназначенное для изменения вида кодирования информации. Как и всякое комбинационное устройство преобразователь кодов характеризуется таблицей истинности, ставящей в соответствие кодам, подаваемым на вход, коды, снимаемые с выхода устройства.

Эта таблица должна давать однозначное соответствие входным и выходным кодам. Эта таблица является основанием для синтеза логической структуры конкретного преобразователя кода. Условное графическое изображение преобразователя кодов приведено на рисунке 27.1:

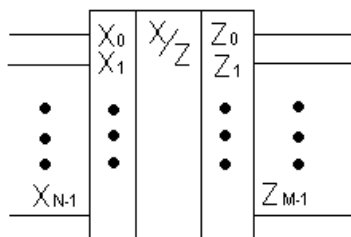


рис.27.1

Преобразование из одного кода в другой занимает важное место в работе с цифровыми устройствами.

Сводная таблица стандартных кодов поможет в выполнении таких преобразований (таблица 27.4).

Частным случаем преобразователей кодов является шифраторы и дешифраторы.

### 27.5. Шифраторы. Дешифраторы. Мультиплексоры. Демультимплексоры

Шифратором, или кодером, называется комбинационное логическое устройство для преобразования чисел из десятичной системы счисления в двоичную. Входам шифратора последовательно присваиваются значения десятичных чисел, поэтому подача активного логического сигнала на один из входов воспринимается шифратором как подача соответствующего десятичного числа. Этот сигнал преобразуется на выходе шифратора в двоичный код.

Согласно сказанному, если шифратор имеет  $n$  выходов, число его входов должно быть не более чем  $2^n$ . Шифратор, имеющий  $2^n$  входов и  $n$  выходов, называется полным.

Если число входов шифратора меньше  $2^n$ , он называется неполным.

табл.27.4

| Десятичные<br>числа | Двоичные<br>числа | Двоично-десятичные числа |                 | Код<br>Грея |
|---------------------|-------------------|--------------------------|-----------------|-------------|
|                     |                   | 8421                     | С избытком<br>3 |             |
| 0                   | 0000              | 0000                     | 0011            | 0000        |
| 1                   | 0001              | 0001                     | 0100            | 0001        |
| 2                   | 0010              | 0010                     | 0101            | 0011        |
| 3                   | 0011              | 0011                     | 0110            | 0010        |
| 4                   | 0100              | 0100                     | 0111            | 0110        |
| 5                   | 0101              | 0101                     | 1000            | 0111        |
| 6                   | 0110              | 0110                     | 1001            | 0101        |
| 7                   | 0111              | 0111                     | 1010            | 0100        |
| 8                   | 1000              | 1000                     | 1011            | 1100        |
| 9                   | 1001              | 1001                     | 1100            | 1101        |
| 10                  | 1010              | 0001 0000                | 0100 0011       | 1111        |
| 11                  | 1011              | 0001 0001                | 0100 0100       | 1110        |
| 12                  | 1100              | 0001 0010                | 0100 0101       | 1010        |
| 13                  | 1101              | 0001 0011                | 0100 0110       | 1011        |
| 14                  | 1110              | 0001 0100                | 0100 0111       | 1001        |
| 15                  | 1111              | 0001 0101                | 0100 1000       | 1000        |
| 16                  | 10000             | 0001 0110                | 0100 1001       | 11000       |
| 17                  | 10001             | 0001 0111                | 0100 1010       | 11001       |
| 18                  | 10010             | 0001 1000                | 0100 1011       | 11011       |
| 19                  | 10011             | 0001 1001                | 0100 1100       | 11010       |
| 20                  | 10100             | 0010 0000                | 0101 0011       | 11110       |

Основное применение шифратора в цифровых системах — это введение первичной информации с клавиатуры.

При нажатии любой клавиши на соответствующий вход шифратора подается сигнал лог. 1, который и преобразуется на выходе в двоично-десятичный код.

Дешифратором, или декодером, называется комбинационное логическое устройство для преобразования чисел из двоичной системы счисления в десятичную.

Согласно определению дешифратор относится к классу преобразователей кодов.

Здесь также понимается, что каждому входному двоичному числу ставится в соответствие сигнал, формируемый на определенном выходе устройства.

Таким образом, дешифратор выполняет операцию, обратную шифратору.

Если число адресных входов дешифратора  $n$  связано с чис-

лом его выходов  $m$  соотношением  $m = 2^n$ , то дешифратор

называют полным. В противном случае, т. е. если  $m < 2^n$ , дешифратор называют неполным.

### 27.5.1. Шифраторы и дешифраторы

На рисунке 27.2 показана система, в которой используются шифраторы и дешифраторы.

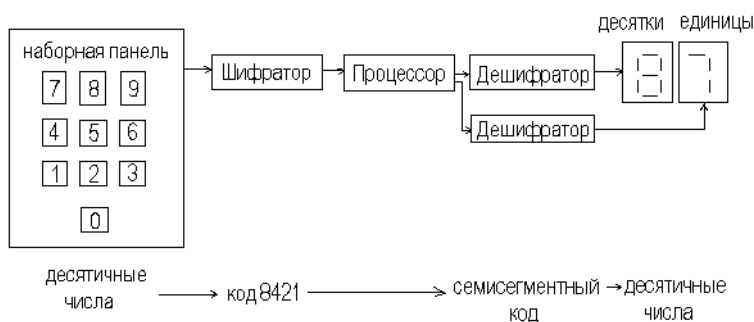


рис.27.2

Шифратор в этой системе преобразует десятичные числа в код 8421 (рис. 27.3).

Очень распространённым выходным устройством отображения десятичных чисел является семисегментный инди-

катор. Семь светящихся сегментов индикатора обозначены буквами от а до g (рис.27.4):

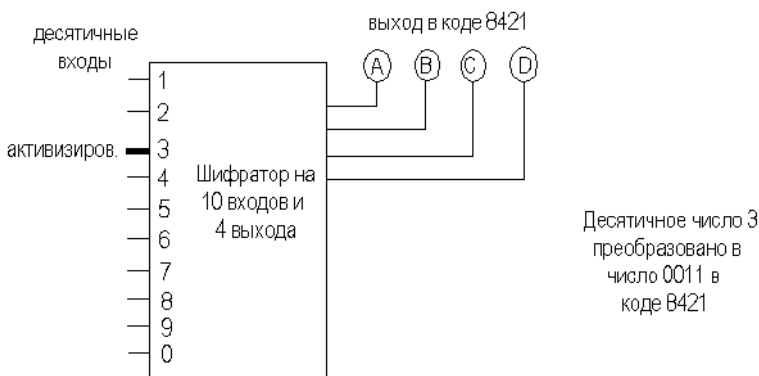


рис.27.3



рис.27.4

Каждый сегмент светится в зависимости от технологии изготовителя:

- накаливающие индикаторы;
- газоразрядные трубки;
- флуоресцентные индикаторы;
- на жидких кристаллах;
- арсенид галлия (светодиодные).

Условная схема работы индикатора приведена на рис.27.5.: Например, если нужно засветить цифру «7», необходимо замкнуть ключи а, в и с. и т.д.

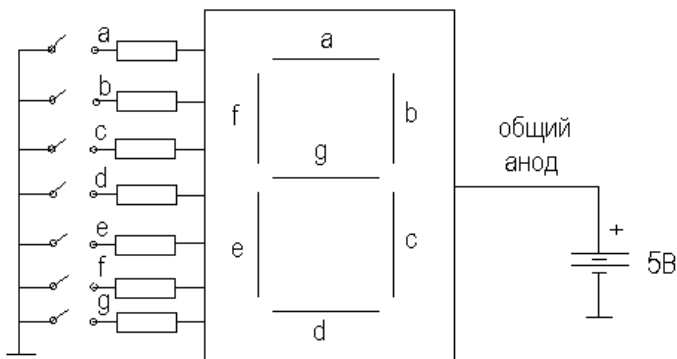


рис.27.5

На практике вместо ключей используют интегральную схему – индикаторный формирователь. Этот формирователь, как правило, помещают в один корпус с дешифратором (говорят о семисегментных дешифраторах – формирователях).

Дешифратор (рис.27.6), подобно шифратору, служит для преобразования кодов – переводит код 8421 в десятичный (по рис. 27.1).

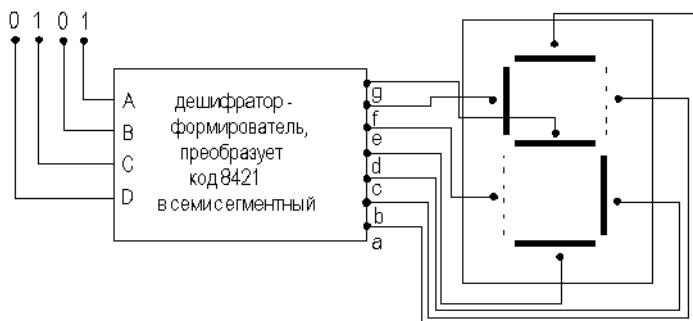


рис.27.6

Таблица истинности может быть представлена в следующем виде (табл.27.5):

табл.27.5

| Десятичное число | Входы |   |   |   | Выходы |   |   |   |   |   |   |
|------------------|-------|---|---|---|--------|---|---|---|---|---|---|
|                  | D     | C | B | A | a      | b | c | d | e | f | g |
| 0                | 0     | 0 | 0 | 0 | +      | + | + | + | + | + | - |
| 1                | 0     | 0 | 0 | 1 | -      | + | + | - | - | - | - |
| 2                | 0     | 0 | 1 | 0 | +      | + | - | + | + | - | + |
| 3                | 0     | 0 | 1 | 1 | +      | + | + | + | - | - | + |
| 4                | 0     | 1 | 0 | 0 | -      | + | + | - | - | + | + |
| 5                | 0     | 1 | 0 | 1 | +      | - | + | + | - | + | + |
| 6                | 0     | 1 | 1 | 0 | -      | - | + | + | + | + | + |
| 7                | 0     | 1 | 1 | 1 | +      | + | + | - | - | - | - |
| 8                | 1     | 0 | 0 | 0 | +      | + | + | + | + | + | + |
| 9                | 1     | 0 | 0 | 1 | +      | + | + | + | - | + | + |

Кроме входов ABCD в ИС имеются входы: контроль свечения – при активизации этого входа даётся разрешение на свечение индикаторов а...g; гашение – для сброса показаний (свечение индикаторов отсутствует) подавления нулей более высоких (старших) разрядов (рис.27.7):

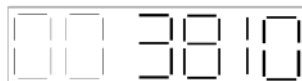


рис.27.7

Ограничивающие резисторы (150 Ом) ограничивают ток индикатора (светодиода) до уровня  $\approx 20\text{мА}$  (для предотвращения выхода из строя светодиода).

### 27.5.2. Мультиплексоры и демультиплексоры

Мультиплексором называют устройство, предназначенное для управляемой передачи данных от нескольких источников информации в один канал.

Типовое применение мультиплексора – передача информации от нескольких разнесённых в пространстве источников информации (датчиков) на вход одного приёмника. Главное условие, чтобы промежуток времени между двумя измерениями (от датчиков) был существенно меньше постоянной времени изменения измеряемого параметра (например, датчики измерения температуры). Мультиплексор имеет один выход и две группы входов: адресные и информационные. Если число адресных входов равно  $n$ , то число информационных входов может быть  $2^n$ . Например, если число адресных входов равно 2, то таблица истинности работы мультиплексора может быть представлена (табл.27.6):

табл.27.6

| E | A1 | A0 | Q  |
|---|----|----|----|
| 1 | -  | -  | 0  |
| 0 | 0  | 0  | D0 |
| 0 | 0  | 1  | D1 |
| 0 | 1  | 0  | D2 |
| 0 | 1  | 1  | D3 |



Здесь учтено, что в мультиплексоре имеется дополнительный вход разрешения работы E (стробирующий вход).

Если E=1, то выходы мультиплексора не зависят от его входных сигналов.

Булево выражение:

$$Q = D_0 \overline{A_1} \overline{A_0} \overline{E} + D_1 \overline{A_1} A_0 \overline{E} + D_2 A_1 \overline{A_0} \overline{E} + D_3 A_1 A_0 \overline{E}$$

Условное графическое изображение мультиплексора ИС серии 555КП7 выглядит (рис.27.8):

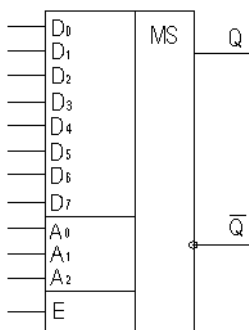


рис.27.8

$\overline{Q}$  - дополнительный инверсный выход. Обычно, число входов (информационных) не превышает 16. Если же необходимо иметь большее число входов, то строят так называемую иерархическую лестницу (мультиплексорное дерево).

Например, из 4-х входовых мультиплексоров можно построить 16 -входовое мультиплексорное дерево:

устройство содержит мультиплексоры 1-го и 2-го уровня. Мультиплексоры 1-го уровня управляются младшими разрядами адресного слова; 2-го уровня – старшими разрядами.

Например, задан адрес 0110 (шесть). Для младших разрядов этого адреса (10) срабатывают входы  $D_2$ : (см. табл.26.2) к мультиплексорам 1-го рода подключаются сигналы  $X_2, X_6, X_{10}, X_{14}$  (рис.27.9):

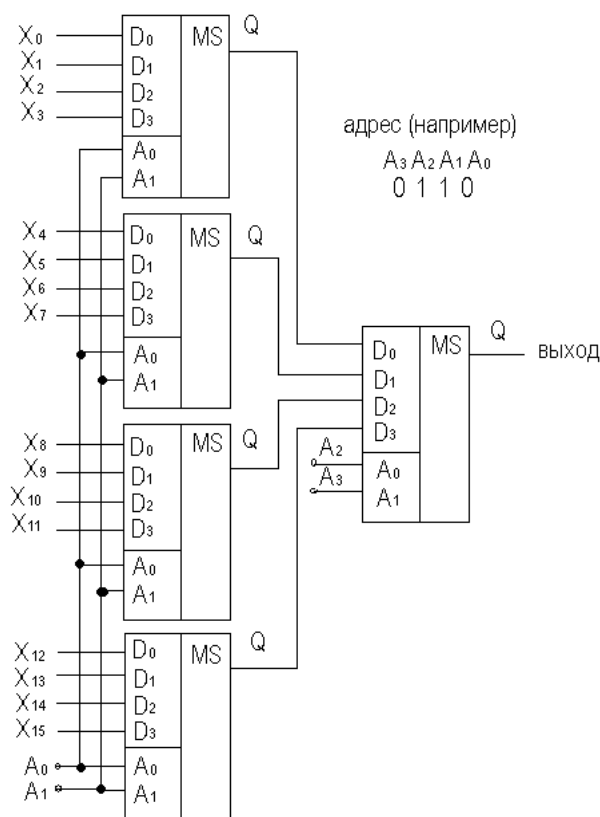


рис.27.9

Из этих сигналов мультиплексор 2-го уровня в соответствии со старшими разрядами адресного слова 01 выбирает сигнал по входу  $D_1$ , т.е. на выходе  $Q$  появится сигнал  $X_6$ , что и будет соответствовать заданному адресу ( $0110 = 6$ ).

При передаче данных помимо мультиплексирования возникает обратная задача: распределить информацию из одного канала по различным (нескольким) приёмникам.

Эту задачу решают демультиплексоры.

Демультиплексором называется логическое комбинационное устройство, предназначенное для управляемой передачи данных из одного источника информации в несколько выходных каналов.

Согласно определению, демультиплексор имеет один информационный вход,  $n$  адресных входов и  $2^n$  выходов (рис.27.10).

Таблица истинности для демультиплексора с двумя адресными входами и входом разрешения работы  $E$  имеет вид (табл.27.7):

табл.27.7

| E | A1 | A0 | Q0 | Q1 | Q2 | Q3 |
|---|----|----|----|----|----|----|
| 1 | x  | x  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 0 | 0  | 0  | D  | 0  | 0  | 0  |
| 0 | 0  | 1  | 0  | D  | 0  | 0  |
| 0 | 1  | 0  | 0  | 0  | D  | 0  |
| 0 | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | D  |

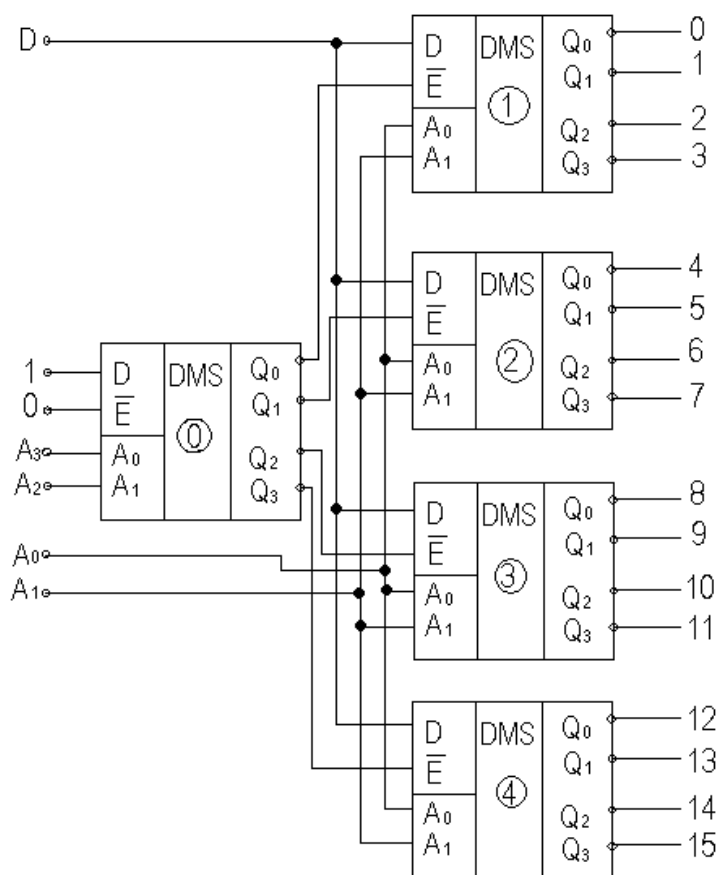


рис.27.10

Булевы выражения для демультиплексора:

$$Q_0 = D\overline{A_1}\overline{A_0}\overline{E} \quad Q_1 = D\overline{A_1}A_0\overline{E} \quad Q_2 = DA_1\overline{A_0}\overline{E} \quad Q_3 = DA_1A_0\overline{E}$$

Для увеличения числа выходов можно также строить демультиплексорное дерево; его структура зеркально отображает структуру мультиплексорного дерева. При этом демультиплексор 1-го уровня управляется младшими разрядами адресного слова, а 2-го уровня – его старшими разрядами. Обязательно должны быть входы разрешения работы (стробирование).

Например, адрес 0110 = 6: старшие (01) разряды приводят (см. табл.27.7) к появлению сигнала  $\overline{Q}$  на выходе старшего уровня, т.е. 1-й, 3-й и 4-й демультиплексоры закрыты; для младших разрядов (10) в демультиплексоре открыт выход  $Q_2$  (канал №6).

### Выводы по теме

1. Каждой тетраде (четырем цифрам) двоично-десятичного числа (числа в коде 8421) соответствует разряд десятичного числа. Код 8421 широко применяется в цифровых системах.

2. В коде с избытком 3 к каждой цифре десятичного числа прибавляем 3 и заменяем полученные цифры соответствующими четырёхзначными двоичными числами. Значимость двоичных чисел в разрядах отличается от обычной двоичной системы и от чисел в коде 8421. Код с избытком 3 используется во многих цифровых схемах.

3. Важной особенностью кода Грея является то, что при переходе к следующему, ниже расположенному числу дос-

таточно в предыдущем числе изменить только одну цифру. Этот код нельзя использовать в арифметических схемах. Его применяют во входных и выходных устройствах цифровых систем.

4. При передаче информации по линиям связи удобно использовать коды, позволяющие например, уменьшить вероятность появления ошибки, или даже исправлять её в дальнейшем.

В связи с этим всегда стоит задача преобразования информации из одного кода в другой. Эти задачи решают комбинационные устройства – преобразователи кодов.

5. Преобразователем кода называется комбинационное устройство, предназначенное для изменения вида кодирования информации. Как и всякое комбинационное устройство преобразователь кодов характеризуется таблицей истинности, ставящей в соответствие кодам, подаваемым на вход, коды, снимаемые с выхода устройства.

6. Шифратором, или кодером называется комбинационное логическое устройство для преобразования чисел из десятичной системы счисления в двоичную.

7. Шифратор, имеющий  $2^n$  входов и  $n$  выходов, называется полным. Если число входов шифратора меньше  $2^n$ , он называется неполным.

8. Основное применение шифратора в цифровых системах — это введение первичной информации с клавиатуры.

9. Дешифратором, или декодером называется комбинационное логическое устройство для преобразования чисел из двоичной системы счисления в десятичную. Согласно определению дешифратор относится к классу преобразователей кодов.

10. Если число адресных входов дешифратора  $n$  связано с числом его выходов  $m$  соотношением  $m = 2^n$ , то дешифратор называют полным. В противном случае, т. е. если  $m < 2^n$ , дешифратор называют неполным.

11. Очень распространённым выходным устройством отображения десятичных чисел является семисегментный индикатор.

12. Дешифратор, подобно шифратору, служит для преобразования кодов – переводит код 8421 в десятичный.

13. Мультиплексором называют устройство, предназначенное для управляемой передачи данных от нескольких источников информации в один канал. Типовое применение мультиплексора – передача информации от нескольких разнесённых в пространстве источников информации (датчиков) на вход одного приёмника.

14. Демультимплексором называется логическое комбинационное устройство, предназначенное для управляемой передачи данных из одного источника информации в несколько выходных каналов.

### Контрольные вопросы

1. Приведите пример преобразования десятичного числа в число в коде 8421.

2. Приведите пример преобразования числа в коде 8421 в десятичное число.

3. Приведите пример преобразования десятичного числа в число в коде с избытком 3.

4. Какие задачи решают комбинационные устройства – преобразователи кодов?

5. Чем характеризуется комбинационное устройство как преобразователь кодов?

6. Приведите примеры устройств - преобразователей кодов.

7. Дайте определение, основное назначение и поясните принцип работы шифратора.

8. Что такое «полный» и «неполный» шифратор?

9. Приведите объяснение работы семисегментного индикатора как выходного устройства отображения десятичных чисел.

10. Дайте определение, основное назначение и поясните принцип работы дешифратора.

11. Что такое «полный» и «неполный» дешифратор?

12. Приведите объяснение работы дешифратора при использовании семисегментного индикатора как выходного устройства отображения десятичных чисел.

13. Дайте определение, основное назначение и поясните принцип работы мультиплексора.

14. Что такое «мультиплексорное дерево»?

15. Дайте определение, основное назначение и поясните принцип работы демультиплексора.

16. Что такое «демультиплексорное дерево»?



## 28. Триггеры. Схемы фиксаторов.

### Запуск триггеров

Все логические схемы разделяют на два класса:

- комбинационные логические схемы, в которых используются логические элементы «И», «ИЛИ», «НЕ» и др.

- последовательностные схемы, к которым относятся времязадающие и запоминающие устройства. В последовательностных схемах состояние на выходе зависит от состояния входов в предыдущие моменты времени.

Исходной ячейкой в комбинационных схемах являются логические элементы. Для последовательностных схем роль структурной ячейки играет триггер. Соединение триггеров позволяет получать счетчики, регистры, запоминающие устройства.

Триггером называется устройство, способное формировать два устойчивых значения выходного сигнала и скачкообразно изменять эти значения под действием внешнего управляющего сигнала. Именно способность формировать на выходе два устойчивых значения сигнала, которые могут поддерживаться без изменения сколь угодно долго, и позволяет применять триггер в качестве элемента памяти. В качестве триггера, как правило, используется операционный усилитель с цепью положительной обратной связи.

Входы триггера разделяют на информационные и управляющие (вспомогательные). Это разделение в значительной степени условно. Информационные входы используются для управления состоянием триггера. Управляющие входы обычно используются для предварительной установки триггера в некоторое состояние и для синхронизации.

Триггеры могут иметь 2 выхода: прямой  $Q$  и инверсный  $\bar{Q}$ .

Триггеры классифицируют по различным признакам, поэтому существует достаточно большое число классификаций. К сожа-

лению, эти классификации не образуют стройной системы, но инженеру необходимо их знать.

Триггеры классифицируют по следующим признакам:

- способу приема информации;
- принципу построения;
- функциональным возможностям.

Различают асинхронные и синхронные триггеры.

Асинхронный триггер изменяет свое состояние непосредственно в момент появления соответствующего информационного сигнала.

Синхронные триггеры реагируют на информационные сигналы только при наличии соответствующего сигнала на так называемом входе синхронизации  $C$  (от англ. *clock*). Этот вход также обозначают терминами «строб», «такт».

Синхронные триггеры в свою очередь подразделяют на триггеры со статическим (статические) и динамическим (динамические) управлением по входу синхронизации  $C$ .

Статические триггеры воспринимают информационные сигналы при подаче на вход  $C$  логической единицы (прямой вход) или логического нуля (инверсный вход).

Динамические триггеры воспринимают информационные сигналы при изменении (перепаде) сигнала на входе  $C$  от 0 к 1 (прямой динамический  $C$ -вход) или от 1 к 0 (инверсный динамический  $C$ -вход).

Статические триггеры в свою очередь подразделяют на одноступенчатые (однотактные) и двухступенчатые (двухтактные). В одноступенчатом триггере имеется одна ступень запоминания информации, а в двухступенчатом — две такие ступени. Вначале информация записывается в первую ступень, а затем переписывается во вторую и появляется на выходе. Двухступенчатый триггер обозначают через  $ТТ$ .

По функциональным возможностям триггеры разделяют на следующие классы:

- с отдельной установкой состояния 0 и 1 (RS-триггеры);
- универсальные (JK-триггеры);
- с приемом информации по одному входу  $D$  (Dтриггеры, или триггеры задержки);
- со счетным входом  $T$  ( $T$ -триггеры).

Входы триггеров обычно обозначают следующим образом:

$S$ — вход для установки в состояние «1»;

$R$ — вход для установки в состояние «0»;

$J$ — вход для установки в состояние «1» в универсальном триггере;

$K$ — вход для установки в состояние «0» в универсальном триггере;

$T$ — счетный (общий) вход;

$D$ — вход для установки в состояние «1» или в состояние «0»;

$V$ — дополнительный управляющий вход для разрешения приема информации (иногда используют букву  $E$  вместо  $V$ ).

### 28.1. RS-триггер (асинхронный)

RS-триггер имеет два выхода:  $Q$  и  $\bar{Q}$  (прямой и инверсный), и два входа: R-вход (установка 0) и S-вход (установка 1).

Графически RS-триггер обозначается (рис.28.1):

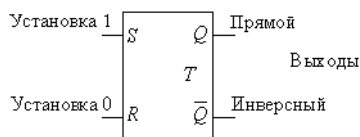


рис.28.1

Таблица истинности для RS-триггера (табл.28.1).

табл.28.1

| Режим работы          | Входы |     | Выходы |           | Влияние на выход $Q$            |
|-----------------------|-------|-----|--------|-----------|---------------------------------|
|                       | $S$   | $R$ | $Q$    | $\bar{Q}$ |                                 |
| Запрещенное состояние | 0     | 0   | 1      | 1         | Запрещено; не используется      |
| Установка 1           | 0     | 1   | 1      | 0         | Установка $Q$ в 1               |
| Установка 0           | 1     | 0   | 0      | 1         | Установка $Q$ в 0               |
| Хранение              | 1     | 1   | $Q$    | $\bar{Q}$ | Зависит от предыдущих состояний |

В соответствии с таблицей истинности:

а) при установке на входе  $S = 0$  и  $R = 0$  на выходах  $Q$  и  $\bar{Q}$  устанавливается уровень логической единицы ( $Q = \bar{Q} = 1$ ). Это запрещённое состояние.

б) при  $S = R = 1$  – триггер находится в состоянии покоя, т.е. сохраняются ранее установленные уровни – это режим хранения.

в) установку триггера в состояние 1 на выходе  $Q$  инициирует логический 0 на входе  $S$ .

г) установку триггера в состояние 0 на выходе  $Q$  инициирует логический 0 на входе  $R$ .

Для этого режима более правильное изображение асинхронного триггера было бы (рис.28.2)

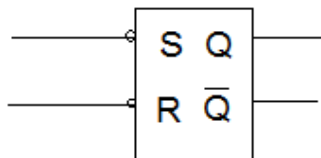


рис.28.2

Инвертирующие кружки у входов R и S означают, что активным является логический ноль.

RS-триггер можно приобрести в готовом виде (однокорпусная микросхема), либо собрать из логических элементов «И-НЕ» - рис.28.3:

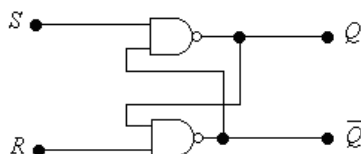


рис.28.3

Таблица истинности может быть представлена временными диаграммами, отображающими работу RS-триггера (рис.28.4).

Диаграммы, поясняющие принцип работы асинхронного RS-триггера, полностью повторяют данные таблицы истинности.

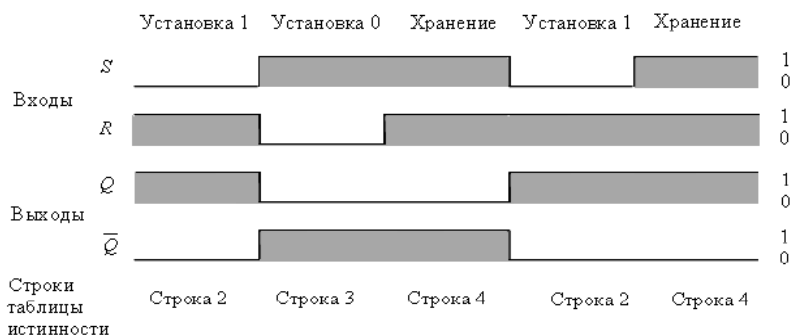


рис.28.4

RS-триггер называют также RS-фиксатором, или триггером с отдельными входами.

## 28.2. Синхронный (тактируемый) RS-триггер

Графическое отображение (рис.28.5):



рис.28.5

Его временные диаграммы работы (рис.28.6):

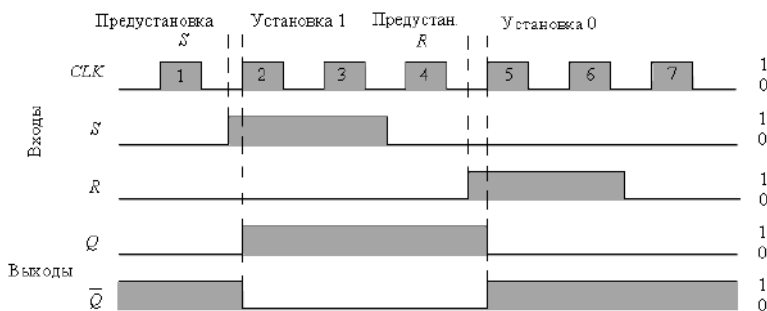


рис.28.6

а) Когда на входах S и R устанавливается уровень 0, тактовый импульс (1) не влияет на состояние выходов. В это время триггер находится в режиме хранения.

б) Во время предустановки входа  $S$ , когда на этот вход подана 1, выходы триггера также не изменяются своего состояния.

в) Во время действия логической 1 на входе  $S$  только после появления тактового импульса 2 происходит изменение состояния выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$ .

г) Тактовые импульсы 3 и 4 не влияют на состояние выходов (для импульса 3 продолжается режим предустановки; для импульса 4 – режим хранения).

д) Затем осуществляется предустановка входа  $R$  (подается логическая 1).

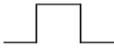
На фронте импульса 5 происходит сброс (очистка) выхода  $Q$  (перевод в 0); во время прохождения импульсов 5 и 6 триггер находится в режиме установки 0, а во время прохождения импульса 7 – в режиме хранения.

Т.о., режим триггера изменяется только в моменты тактовых импульсов, т.е. триггер работает синхронно (находится в синхронизме) с тактовыми импульсами.

Этот режим является основным для большого количества вычислительных устройств.

Исключительную роль играет характеристика RS-триггера – режим хранения, или режим наличия памяти: если триггер установлен в состояние 0 или 1, то он может оставаться в этом состоянии даже при изменении входных сигналов (во время прохождения импульсов 1, 4 и 7 - см. рис.28.6). Таблица истинности для синхронного RS-триггера (табл.28.2):

табл.28.2

| Режим работы          | Входы                                                                             |   |   | Выходы        |                | Влияние на выход $Q$             |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---|---|---------------|----------------|----------------------------------|
|                       | CLK                                                                               | S | R | $Q$           | $\overline{Q}$ |                                  |
| Хранение              |  | 0 | 0 | Без изменений |                | Без изменений                    |
| Установка 0           |  | 0 | 1 | 0             | 1              | Сброс, или очистка в состояние 0 |
| Установка 1           |  | 1 | 0 | 1             | 0              | Установка в состояние 1          |
| Запрещенное состояние |  | 1 | 1 | 1             | 1              | Запрещено; не используется       |

Возможно построение RS-триггера на элементах «И-НЕ» - рис. 28.7:

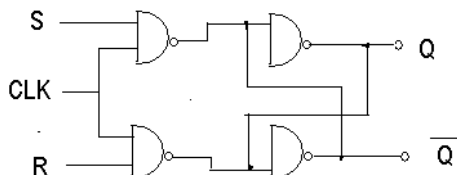


рис. 28.7

Необходимо отметить, что только три верхние строки таблицы истинности описывают реальные режимы работы триггера. Нижняя строка соответствует запрещенному состоянию, которое никогда не используется



### 28.3. D-триггер (триггер с задержкой)

Условное обозначение (рис.28.8):



рис. 28.8

Таблица истинности (табл.28.3):

табл.28.3

| Вход  | Выход     |
|-------|-----------|
| $D^n$ | $Q^{n+1}$ |
| 0     | 0         |
| 1     | 1         |

Имеется только один информационный вход  $D$  и один синхронизирующий  $CLK$ .

**D-триггер называется триггером с задержкой. Слово “задержка” здесь характеризует то, что информация со входа  $D$  (0,1) задерживается в триггере ровно на один такт, прежде чем появляется на выходе  $Q$ . Данная ситуация отображена в таблице истинности: сигнал на выходе  $Q$  в такте  $n+1$  повторяет сигнал, который был на входе  $D$  в предыдущем такте  $n$ .**

Возможно построение D-триггера на элементах RS-триггера и логического элемента «НЕ») – рис.28.9:

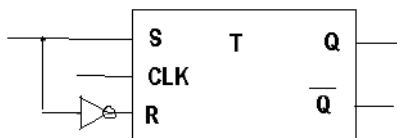


рис.28.9

подробная таблица истинности D – триггера (табл.28.4):

табл.28.4

| ВХОДЫ      |   | ВЫХОДЫ |           |
|------------|---|--------|-----------|
| CLK        | D | Q      | $\bar{Q}$ |
| 0          | 0 | 0      | 1         |
| $\text{⏏}$ | 1 | 1      | 0         |
| $\text{⏏}$ | 0 | 0      | 1         |

## 28.4. D-триггеры с дополнительными входами

Промышленный, серийно выпускаемый вариант D-триггера с дополнительными входами представлен на рис. 28.10:

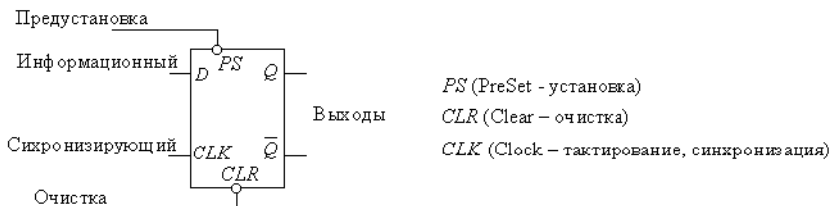


рис. 28.10

Таблица истинности (табл.28.5):

табл.28.5

| Режим работы            | Входы       |     |            |   | Выходы |                |
|-------------------------|-------------|-----|------------|---|--------|----------------|
|                         | асинхронный |     | синхронный |   |        |                |
|                         | PS          | CLR | CLK        | D | $Q$    | $\overline{Q}$ |
| Асинхронная установка 1 | 0           | 1   | ×          | × | 1      | 0              |
| Асинхронная установка 0 | 1           | 0   | ×          | × | 0      | 1              |
| Запрещенное состояние   | 0           | 0   | ×          | × | 1      | 1              |
| Установка 1             | 1           | 1   | ↑          | 1 | 1      | 0              |
| Установка 0             | 1           | 1   | ↑          | 0 | 0      | 1              |

× - любое состояние; ↑ - переход от низкого (0) уровня к высокому (1).

Если входы PS и CLR активны (0 и 0, см. табл. 5.3), то они блокируют входы D и CLK – режим работы асинхронный.

При этом D и CLK могут быть в любом состоянии (×).

Если входы PS и CLR неактивны (1, 1), то D-триггер работает в режиме синхронизации с тактовыми импульсами.

Выход  $Q$  повторяет состояние входа D, пока тактовый импульс имеет значение (1) и запоминает этот логический уровень входа D на все время отрицательного тактового импульса. Это удобная маленькая память широко применяется в измерительных приборах с цифровым отсчетом.

Принцип работы D-триггера (с дополнительными входами)):

а) логический 0 на входе PS инициирует логическую 1 на выходе Q;

б) логический 0 на входе CLR инициирует очистку выхода Q – установку логического 0 на выходе Q;

в) логический 0 на входах CLR и PS – активное состояние входов CLR и PS блокирует действие входов D и CLK, т.е. эти входы не изменяют состояние D-триггера – асинхронный режим;

г) состояние - одновременное наличие логического нуля на входах CLR и PS – запрещённое состояние;

д) если оба асинхронных входа находятся в неактивном состоянии -  $CLR = 1$  и  $PS = 1$ , то D-триггер работает по командам с D и CLK входов как синхронный D-триггер;

е) в синхронном режиме D-триггер по входу D срабатывает при положительном импульсе на входе CLK – по фронту.

## **28.5. JK-триггеры. Схемы фиксаторов. Запуск триггеров. JK-триггер (ждущий мультивибратор)**

Рассмотрим JK-триггер (от англ. *jump keep*), отличающийся от рассмотренных RS-триггеров тем, что появле-

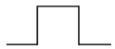
ние на обоих информационных входах ( $J$  и  $K$ ) логических единиц (для прямых входов) приводит к изменению состояния триггера. Такая комбинация сигналов для JK-триггера не является запрещенной. В остальном JK-триггер подобен RS-триггеру, причем роль входа  $S$  играет вход  $J$ , а роль входа  $R$  — вход  $K$ . JK-триггеры реализуют в виде динамических триггеров (будет рассмотрено ниже), т. е. JK-триггеры являются синхронными.

**JK-триггер (ждущий мультивибратор)** - это наиболее широко используемый универсальный триггер, обладающий характеристиками всех других триггеров.

Таблица истинности (табл.28.6):

строка 4 характеризует важный переключательный режим: если на входах  $J$  и  $K$  установлена 1, то следующие друг за другом тактовые импульсы будут вызывать перебросы уровней на выходе от 1 к 0, от 0 к 1, и т.д.

табл.28.6

| Режим работы | Входы                                                                               |   |   | Выходы        |           | Влияние на выход                       |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---------------|-----------|----------------------------------------|
|              | CLK                                                                                 | J | K | $Q$           | $\bar{Q}$ |                                        |
| Хранение     |   | 0 | 0 | Без изменения |           | Без изменения; блокировка              |
| Установка 0  |  | 0 | 1 | 0             | 1         | Сброс или очистка в 0                  |
| Установка 1  |  | 1 | 0 | 1             | 0         | Установка 1                            |
| Переключение |  | 1 | 1 | Переключаются |           | Изменение состояния на противоположное |

Условное обозначение (рис.28.11):

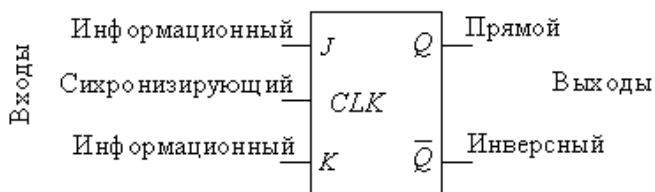


рис. 28.11

### 28.6. JK-триггер с дополнительными входами

JK-триггер в интегральном исполнении имеет два дополнительных входа (асинхронных): предустановки PS и очистки CLR (рис. 28.12)



рис. 28.12

Таблица истинности (табл.28.7):

табл.28.7

| Режим работы            | Входы       |     |                                                                                   |   |   | Выходы                    |                |
|-------------------------|-------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|---|---|---------------------------|----------------|
|                         | асинхронный |     | синхронный                                                                        |   |   |                           |                |
|                         | PS          | CLR | CLK                                                                               | J | K | $Q$                       | $\overline{Q}$ |
| Асинхронная установка 1 | 0           | 1   | X                                                                                 | X | X | 1                         | 0              |
| Асинхронная установка 0 | 1           | 0   | X                                                                                 | X | X | 0                         | 1              |
| Запрещенное состояние   | 0           | 0   | X                                                                                 | X | X | 1                         | 1              |
| Хранение                | 1           | 1   |  | 0 | 0 | Без изменений             |                |
| Установка 0             | 1           | 1   |  | 0 | 1 | 0                         | 1              |
| Установка 1             | 1           | 1   |  | 1 | 0 | 1                         | 0              |
| Переключение            | 1           | 1   |  | 1 | 1 | Противоположное состояние |                |

X - любое состояние;  - положительный тактовый импульс

Входы PS и CLR в активных состояниях блокируют действие синхронных входов (J, K, CLK), и их состояние не отражается на выходных сигналах.

При блокировании входов PS и CLR (1) триггер работает по входам J, K и CLK в синхронном режиме, обеспечивая переключение 0-1, установку 0 и 1 и их хранение (фиксацию).

Триггеры JK широко применяются в основном в счетчиках, в сдвиговых регистрах, элементах задержки сигнала, делителях частоты.

## 28.7. Схемы фиксаторов

Рассмотрим две схемы с шифратором и дешифратором:

а) без буферной памяти (рис 28.13):

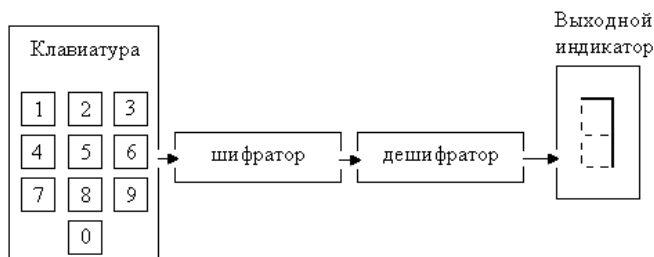


рис 28.13

Если набрать на клавиатуре цифру 7, то после отпускания клавиши цифра 7 на индикаторе погаснет. Для ее сохранения нужно запоминающее устройство для хранения двоично-десятичного кода десятичного числа 7 на входах дешифратора.

б) схема с буферной памятью (рис 28.14):

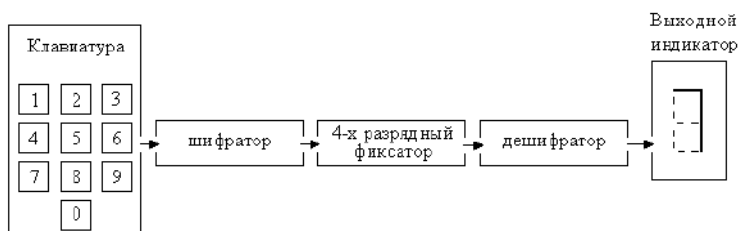


рис 28.14



Такое устройство называют фиксатором (или регистром-защелкой).

Таким устройством памяти может быть, например D-триггер или другие устройства.

Например, четырехразрядный фиксатор (типа 7475) ТТЛ-схемы, состоящий из четырех D-триггеров, объединенных в одной микросхеме (рис 28.15):

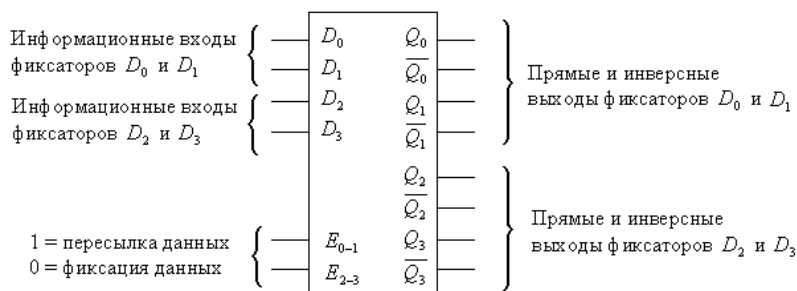


рис 28.15

Разрешающий вход  $E_{0-1}$  аналогичен синхронизирующему входу D-триггера и управляет сразу двумя триггерами  $D_0$  и  $D_1$ . Если на разрешающем входе имеется 1, то данные с входов  $D_0$  и  $D_1$  сразу передаются на выходы  $Q_0$  и  $Q_1$  (без ожидания тактовых импульсов). В этом режиме – режиме пересылки данных сигналы на  $Q$  выходах повторяют сигналы на D входах.

Таблица истинности (табл.28.8):

табл.28.8

| Режим работы     | Входы |     | Выходы        |                |
|------------------|-------|-----|---------------|----------------|
|                  | $E$   | $D$ | $Q$           | $\overline{Q}$ |
| Пересылка данных | 1     | 0   | 0             | 1              |
|                  | 1     | 1   | 1             | 0              |
| Фиксация данных  | 0     | ×   | Без изменений |                |

В режиме фиксации данных сигналы на входах «запоминаются» в момент перехода в режим фиксации и далее не изменяется независимо от изменений сигналов на D-входах.

## 28.8. Запуск триггеров

Многие синхронные триггеры подразделяются также на триггеры с управлением (запуском) или по фронту или по срезу тактового импульса, а также на триггеры типа ведущий/ведомый (так называемые MS-триггеры). Триггеры типа ведущий/ведомый называют также триггерами с динамическим управлением.

### 28.8.1. Триггеры с управлением (запуском) или по фронту или по срезу тактового импульса

Работа триггера с управлением по фронту и по срезу тактового импульса представлена на рис 28.16:

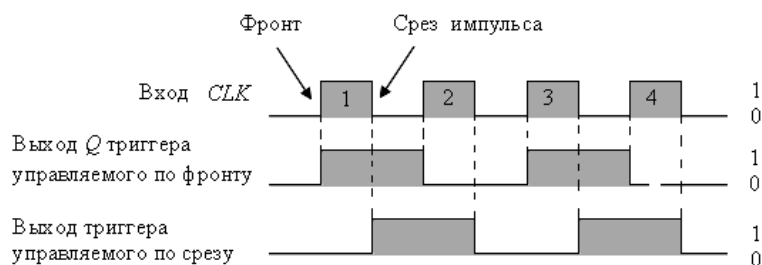


рис 28.16

Условное обозначение триггера с управлением по фронту (значок  $>$  у синхронизирующего входа - рис.28.17):

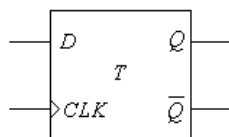


рис 28.17

Триггер, управляемый по срезу (добавлен кружок «О» у синхронизирующего входа - рис 28.18):

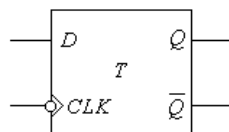


Рис.28.18

Другое обозначение динамического управления:

- управлении по фронту (рис 28.19):

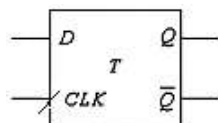


рис.28.19

- управление по срезу (рис.28.20):

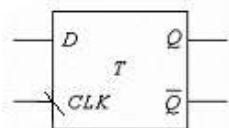


рис 28.20

Триггер-фиксатор обозначается (рис 28.21):

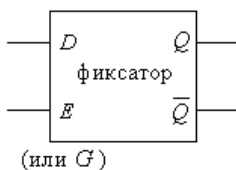


рис 28.21

D-фиксатор не рассматривается как схема с управлением по фронту или срезу тактового импульса.

Напомним, что фиксатор – это асинхронное устройство как и RS-триггер. При наличии разрешения (1) на входе E сигнал на выходе повторяет сигнал на входе. При сигнале 0 на

входе Е сигнал на выходе просто фиксируется (запоминается).

Для исключения ошибок в работе цифровых схем необходимо, чтобы за время действия тактового импульса (см. рис. 28.16) сигналы на входах J и K или D (информационные сигналы) не изменялись, т.е. не должно быть «быстрых» изменений сигналов по сравнению с длительностью тактового импульса. Иначе сигнал «проскочит» по цепочке триггеров, не запоминаясь ни в одном триггере.

### 28.8.2. Триггеры типа ведущий/ведомый (триггеры с динамическим управлением)

Для исключения «проскакивания» применяют способ запуска триггеров типа ведущий/ведомый (или триггер с динамическим запуском (MS-триггер)). При этом используются в тактовом импульсе и фронт, и срез (рис. 28.22):

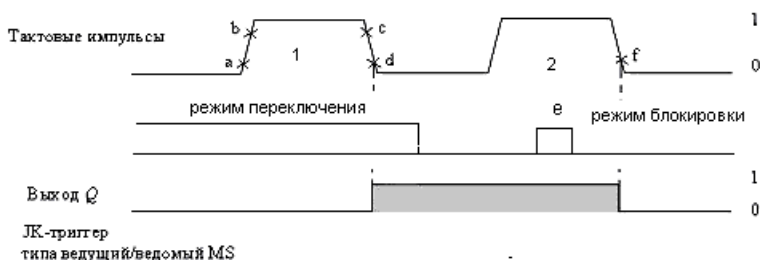


рис 28.22

- в точке «а» (фронт импульса) входы изолируются от выходов;

- в точке «b» (фронт импульса) информация поступает в триггер с J и K входов;

- в точке «с» (срез импульса) входы J и K отключаются;

- в точке «d» (срез импульса) информация передается на Q-выход.

Т.е. в качестве активного сигнала выступает не сам уровень, а его перепад (изменение) на фронте или срезе.

Такие триггеры с динамическим управлением не чувствительны к изменению информационных сигналов в течение длительности тактового импульса синхронизации.

Практически зона «запрета» изменения информационного сигнала сократилась до промежутка  $t_{ab}$  или  $t_{cd}$ . Реально это время сейчас обеспечивается  $t_{ab} \approx 20нс$  и  $t_{cd} \approx 5нс$ .

Такое время достигается за счет особых схемотехнических решений.

Очень интересная характеристика триггера типа ведущий/ведомый показана на рис 28.22 – во время действия импульса 2. В начале импульса 2 выходы триггера блокируются. На очень короткое время входы J и K переводятся в состояние, соответствующее режиму переключения (точка e), затем возвращаются в исходное состояние, соответствующее режиму блокировки. JK-триггер типа ведущий/ведомый запоминает, что J и K – входы находились в режиме переключения, и переключаются в точке f на срезе тактового импульса. Такая характерная память проявляется только на вершине импульса 2 (на уровне логической единицы).

## Выводы по теме

1. Все логические схемы разделяют на два класса:

-комбинационные логические схемы, в которых используются логические элементы «И», «ИЛИ», «НЕ» и др.

-последовательностные схемы, к которым относятся времязадающие и запоминающие устройства. В последова-

тельностных схемах состояние на выходе зависит от состояния входов в предыдущие моменты времени.

2. Исходной ячейкой в комбинационных схемах являются логические элементы. Для последовательностных схем роль структурной ячейки играет триггер. Соединение триггеров позволяет получать счетчики, регистры, запоминающие устройства.

3. Триггером называется устройство, способное формировать два устойчивых значения выходного сигнала и скачкообразно изменять эти значения под действием внешнего управляющего сигнала.

4. Способность формировать на выходе два устойчивых значения сигнала, которые могут поддерживаться без изменения сколь угодно долго, и позволяет применять триггер в качестве элемента памяти. В качестве триггера, как правило, используется операционный усилитель с цепью положительной обратной связи.

5. RS-триггер (асинхронный) имеет два выхода:  $Q$  и  $\bar{Q}$  (прямой и инверсный), и два входа: R-вход (установка 0) и S-вход (установка 1). RS-триггер называют также RS-фиксатором, или триггером с отдельными входами.

6. RS-триггер можно приобрести в готовом виде (однокорпусная микросхема), либо собрать из логических элементов «И-НЕ».

7. Режим синхронного (тактируемого) RS-триггера изменяется только в моменты тактовых импульсов, т.е. синхронный (тактируемый) RS-триггер работает синхронно (находится в синхронизме) с тактовыми импульсами.

8. Исключительную роль играет характеристика синхронного RS-триггера – режим хранения, или режим наличия памяти: если триггер установлен в состояние 0 или 1, то он может оставаться в этом состоянии даже при изменении входных сигналов.

9. D-триггер называется триггером с задержкой. Слово “задержка” здесь характеризует то, что информация со входа  $D$  (0,1) задерживается в триггере ровно на один такт, прежде чем появляется на выходе  $Q$ .

10. D-триггер с дополнительными входами работает в режиме синхронизации с тактовыми импульсами. Выход  $Q$  повторяет состояние входа  $D$ , пока тактовый импульс имеет значение (1) и запоминает этот логический уровень входа  $D$  на все время отрицательного тактового импульса. Это удобная маленькая память широко применяется в измерительных приборах с цифровым отсчетом.

11. JK-триггер отличается от рассмотренных RS-триггеров тем, что появление на обоих информационных входах ( $J$  и  $K$ ) логических единиц (для прямых входов) приводит к изменению состояния триггера. Такая комбинация сигналов для JK-триггера не является запрещенной.

12. JK-триггер подобен RS-триггеру, причем роль входа  $S$  играет вход  $J$ , а роль входа  $R$  — вход  $K$ . JK-триггеры реализуют в виде динамических триггеров, т. е. JK-триггеры являются синхронными.

13. JK-триггер является наиболее широко используемым, универсальным триггером, обладающим характеристиками всех других триггеров.

14. Триггеры JK широко применяются в основном в счетчиках, в сдвиговых регистрах, элементах задержки сигнала, делителях частоты.

### Контрольные вопросы

1. Что такое триггер и его особенность как ячейки памяти?
2. По каким признакам классифицируют триггеры?
3. В чем заключается суть работы синхронного триггера?



4. В чем заключается суть работы асинхронного триггера?

5. Как подразделяют синхронные триггеры по входу синхронизации  $C$ ?

6. В чем отличие статических триггеров от динамических?

7. В чем заключается отличие одноступенчатых триггеров от двухступенчатых?

8. На какие классы разделяют триггеры по функциональным возможностям?

9. Как обозначаются входы триггеров?

10. Приведите схему RS-триггера (асинхронного); объясните принцип его работы и его особенности.

11. Приведите схему синхронного (тактируемого) RS-триггера; объясните принцип его работы и его особенности.

12. Приведите схему D-триггера; объясните принцип его работы и его особенности.

13. Приведите схему D-триггера с дополнительными входами; объясните принцип его работы и его особенности.

14. Чем отличается JK-триггер от ранее рассмотренных RS-триггеров?

15. Где применяются JK-триггеры?

16. Приведите таблицу истинности для JK-триггера (ждущего мультивибратора) и объясните особенности его работы.

17. Приведите таблицу истинности для JK-триггера с дополнительными входами и объясните особенности его работы.

18. Приведите особенности работы четырехразрядного фиксатора состоящего из четырех D-триггеров, объединенных в одной микросхеме.

19. Объясните работу триггера с управлением (запуском) или по фронту, или по срезу тактового импульса.

20. Объясните работу триггера с динамическим управлением (типа ведущий/ведомый).

## 29. Счетчики. Регистры. Сумматоры

Счетчиком называется последовательностное устройство, предназначенное для счета входных импульсов и фиксации их числа в двоичном коде.

Счетчики строятся на основе  $N$  однотипных, связанных между собой разрядных схем, каждая из которых в общем случае состоит из триггера и некоторой комбинационной схемы, предназначенной для формирования сигналов управления триггером.

Почти каждая цифровая система содержит несколько счетчиков.

Основной параметр счетчика — модуль счета. Это максимальное число единичных сигналов, которое может быть сосчитано счетчиком. Счетчики обозначают через СТ (от англ. *counter*).

Счетчики классифицируют:

по модулю счета:

- двоично-десятичные;
- двоичные;
- с произвольным постоянным модулем счета;
- с переменным модулем счета;

по направлению счета:

- суммирующие;
- вычитающие;
- реверсивные;

по способу формирования внутренних связей:

- с последовательным переносом;
- с параллельным переносом;
- с комбинированным переносом;
- кольцевые.

Помимо непосредственно функции счета, счетчики могут выполнять не столь очевидные функции: адресация; делители частоты; элементы памяти.

Цифровые схемы с функцией счета можно собрать из триггеров.

### 29.1. Счетчики со сквозным переносом

Процедуры двоичного и десятичного счета приведены в табл.29.1.

табл.29.1

| Двоичный счет |   |   |   | Десятичный счет |
|---------------|---|---|---|-----------------|
| D             | C | B | A |                 |
| 8             | 4 | 2 | 1 |                 |
| 0             | 0 | 0 | 0 | 0               |
| 0             | 0 | 0 | 1 | 1               |
| 0             | 0 | 1 | 0 | 2               |
| 0             | 0 | 1 | 1 | 3               |
| 0             | 1 | 0 | 0 | 4               |
| 0             | 1 | 0 | 1 | 5               |
| 0             | 1 | 1 | 0 | 6               |
| 0             | 1 | 1 | 1 | 7               |
| 1             | 0 | 0 | 0 | 8               |
| 1             | 0 | 0 | 1 | 9               |
| 1             | 0 | 1 | 0 | 10              |
| 1             | 0 | 1 | 1 | 11              |
| 1             | 1 | 0 | 0 | 12              |
| 1             | 1 | 0 | 1 | 13              |
| 1             | 1 | 1 | 0 | 14              |
| 1             | 1 | 1 | 1 | 15              |

(Число состояний от 0000 до 1111 равно 16)

Столбец А – самый младший разряд в двоичном разряде единиц. Столбец D – самый старший разряд в двоичном разряде восьмерок.

Модуль счета – число состояний счетчика в процесс полного цикла.

В данном случае имеем счетчик по модулю 16.

Функциональная схема счетчика по модулю 16 (рис.29.1):

T1...T4 – JK-триггеры, работающие в режиме переключения ( $J=K=1$ ).

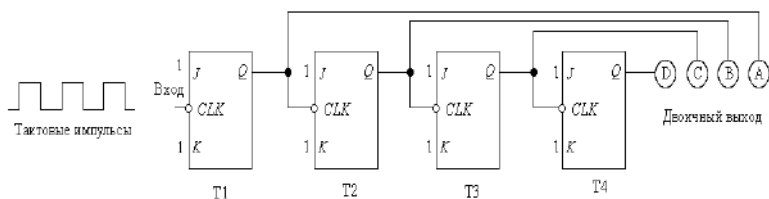


рис. 29.1

Работа счетчика показана на временных диаграммах (рис. 29.2):

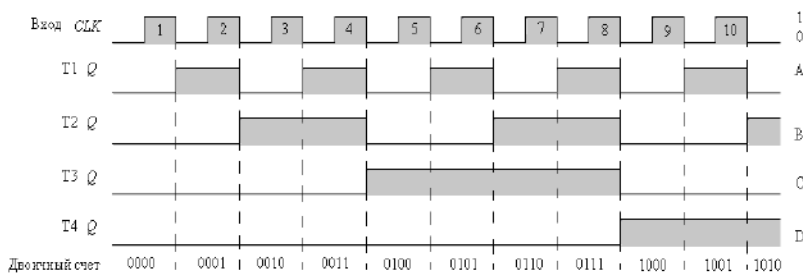


рис. 29.2

Если начальное состояние счетчика было 0000 (счетчик очищен), то после прохождения первого импульса (по срезу) срабатывает триггер Т1 ( $Q = 1$ ) и на индикаторе появится двоичное число 0001.

После прохождения импульса 2 триггер Т1 переходит в исходное состояние 0 ( $Q=0$ ), переключается триггер Т2 ( $Q=1$ ), и на выходе триггера Т2 появится число 0010. Счет продолжается – срез сигнала на выходе каждого триггера запускает следующий триггер.

В столбце А таблице цифры 0 и 1 переключаются на каждом этапе счета. В столбце В – в два раза реже и т.д., каждый раз в два раза реже.

Изменение состояний последовательно распространяется от триггера к триггеру – это счетчик со сквозным переносом, или четырехразрядный счетчик, или асинхронный счетчик.

## 29.2. Асинхронный счетчик по модулю 10

Счетчик по модулю 10 считает от 0000 до 1001 (от 0 до 9 в десятичной системе – до жирной черты по таблице 29.1). Схема представлена на рис. 29.3:

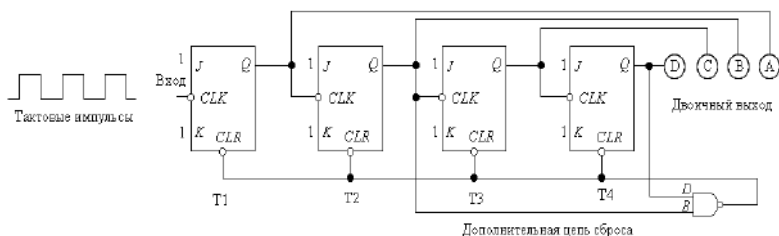


рис. 29.3

В схему асинхронного счетчика добавлен элемент «И-НЕ» для установки всех триггеров в нулевое состояние (очистка

счетчика) с приходом десятого импульса (т.е. с приходом первого импульса после того, как счетчик сосчитал 1001 или до 9 в десятичной системе).

Из таблицы 29.1 видно, что с приходом числа 1010 (10 в десятичной системе) на входы логического элемента «И-НЕ» попадут 1 из разряда двоек и 1 из разряда восьмерок. При этом элемент «И-НЕ» установит все триггеры в состояние 0, или на выходе счетчика получим 0000. Это – асинхронный счетчик по модулю 10, или декадный (десятичный) счетчик.

### 29.3. Синхронные счетчики

Недостаток асинхронных счетчиков – относительно низкое быстродействие, так как работа триггеров идет последовательно.

Для увеличения скорости счета применяют синхронные счетчики, где все ступени счетчика работают одновременно.

Рассмотрим работу синхронного счетчика на примере трех разрядного счетчика (по модулю 8) - рис. 29.4:

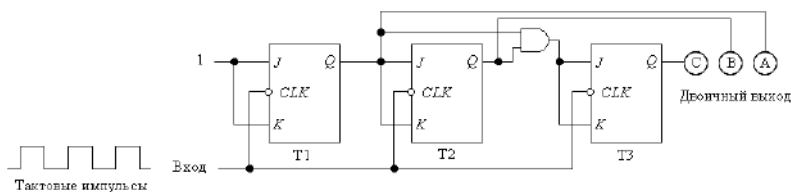


рис. 29.4

Таблица истинности (табл.29.2):

табл.29.2

| Строка | Номер<br>тактового<br>импульса | Двоичная счетная<br>последовательность |   |   | Десятичные<br>числа |
|--------|--------------------------------|----------------------------------------|---|---|---------------------|
|        |                                | С                                      | В | А |                     |
| 1      | 0                              | 0                                      | 0 | 0 | 0                   |
| 2      | 1                              | 0                                      | 0 | 1 | 1                   |
| 3      | 2                              | 0                                      | 1 | 0 | 2                   |
| 4      | 3                              | 0                                      | 1 | 1 | 3                   |
| 5      | 4                              | 1                                      | 0 | 0 | 4                   |
| 6      | 5                              | 1                                      | 0 | 1 | 5                   |
| 7      | 6                              | 1                                      | 1 | 0 | 6                   |
| 8      | 7                              | 1                                      | 1 | 1 | 7                   |
| 9      | 8                              | 0                                      | 0 | 0 | 0                   |

Столбец А – двоичный разряд единиц; счет в этом разряде ведет триггер Т1. Столбец В – двоичный разряд двоек – счет ведет триггер Т2. Столбец С – двоичный разряд четверок – счет ведет триггер Т3. Тактовые импульсы поступают на входы CLK одновременно на все триггеры.

Первый импульс (строка 2) – переключается из состояния 0 в состояние 1 только триггер Т1, так как только у него имеется одновременно на входах J и К логическая единица. На выходе счетчика – 001 (десятичное число 1).

Второй импульс (строка 3) – переключаются два триггера: первый переходит в состояние 0, второй триггер – в состояние 1.

На выходе счетчика 010 (цифра 2).

Третий импульс (строка 4) – переключается только один триггер: Т1 переходит из состояния 0 в 1. На выходе – 011 (число 3) и т.д. (по таблице).

Логика работы: первый триггер работает с каждым тактовым импульсом; второй триггер – только когда на его входах J, K имеется 1 (т.е.  $A=1$ ); третий триггер – только когда  $A=1$  и  $B=1$  (таблица 29.2), т.е. когда на их входах  $J=K=1$ . Синхронные счетчики – довольно сложные устройства.

## 29.4. Вычитающие счетчики

В ряде случаев необходим обратный счет – от больших чисел к меньшим. Такие счетчики называют вычитающими счетчиками, или счетчиками обратного действия (рис. 29.5):

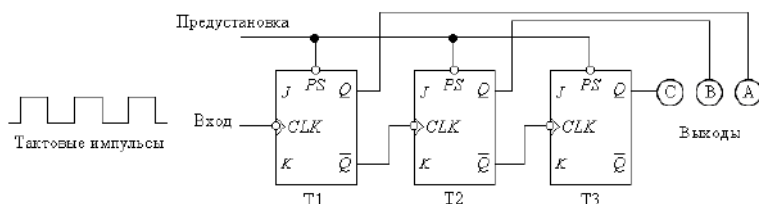


рис. 29.5

## 29.5. Асинхронный трехразрядный счетчик по модулю 8

Таблица истинности приведена в табл.29.3:

В счетчиках прямого действия синхронизирующий вход каждого последующего триггера связан с выходом  $Q$  предыдущего триггера (с прямым выходом). В вычитающем счетчике синхронизирующий вход триггера связан с инверсным выходом  $\bar{Q}$  предыдущего триггера.



Перед началом счета в вычитающем счетчике предусмотрена предустановка в состояние 111 (число 7) с помощью входа PS.

табл.29.3

| Номер тактового импульса | Двоичная счетная последовательность |   |   | Десятичные числа |
|--------------------------|-------------------------------------|---|---|------------------|
|                          | C                                   | B | A |                  |
| 0                        | 1                                   | 1 | 1 | 7                |
| 1                        | 1                                   | 1 | 0 | 6                |
| 2                        | 1                                   | 0 | 1 | 5                |
| 3                        | 1                                   | 0 | 0 | 4                |
| 4                        | 0                                   | 1 | 1 | 3                |
| 5                        | 0                                   | 1 | 0 | 2                |
| 6                        | 0                                   | 0 | 1 | 1                |
| 7                        | 0                                   | 0 | 0 | 0                |
| 8                        |                                     |   |   | 7                |
| 9                        |                                     |   |   | 6                |

Триггер Т1 «ведет» столбец А; триггер Т2 – столбец В; триггер Т3 – столбец С.

## 29.6. Самоостанавливающиеся счетчики

Рассмотренный выше вычитающий счетчик является счетчиком циклического типа – после перехода в состояние 000 он снова начинает считать с 111 и далее. В ряде случаев нужно, чтобы счет был остановлен после исчерпания счетной последовательности.

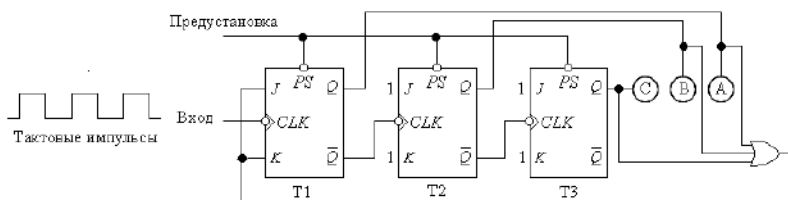


рис.29.6

Для остановки счета в схему вычитающего счетчика включен логический элемент «ИЛИ», который будет устанавливать на входах J и K триггера T1 уровень логического 0, когда на выходе счетчика будет установлено число 000. При этом счетчик будет останавливать работу.

Для возобновления работы счетчика необходимо на его вход предустановки PS подать 0 (счет начнется с числа 111 (7)).

Можно останавливать счетчик на любом, заранее заданном числе.

## 29.7. Регистры

Регистр – последовательностное устройство, предназначенное для записи, хранения и (или) сдвига информации, представленной в виде многоразрядного кода. Регистр представляет собой упорядоченную последовательность триггеров, число которых соответствует числу разрядов в слове. С каждым регистром обычно связано комбинационное цифровое устройство, с помощью которого обеспечивается выполнение некоторых операций над словами.

Типичными являются следующие операции:

- прием слова в регистр;
- передача слова из регистра;
- поразрядные логические операции;
- сдвиг слова влево или вправо на заданное число разрядов;
- преобразование последовательного кода слова в параллельный и обратно;
- установка регистра в начальное состояние (сброс).

Фактически любое цифровое устройство можно представить в виде совокупности регистров, соединенных друг с другом при помощи комбинационных цифровых устройств.

Работу регистра сдвига (сдвигового регистра) можно наблюдать в микрокалькуляторах, когда при наборе новой цифры числа на индикаторе сдвигается влево.

Работу регистра сдвига (сдвигового регистра) можно наблюдать в микрокалькуляторах, когда при наборе новой цифры числа на индикаторе сдвигается влево.

При этом можно выделить два важных момента для характеристики регистра сдвига (рис.29.7):

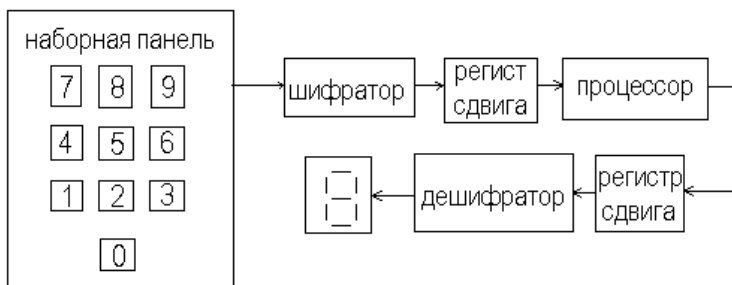


рис.29.7

1) регистр сдвига – устройство, обладающее временной памятью, благодаря чему числа остаются на индикаторе.

2) Устройство сдвига сдвигает числа на индикаторе влево каждый раз при наборе новой цифры.

Регистры сдвига можно получить, соединяя друг с другом несколько триггеров, обладающих памятью.

Регистры сдвига используют для временного хранения данных: (между шифратором и процессором и между процессором и дешифратором)

### 29.7.1. Последовательные регистры сдвига

Схема последовательного регистра сдвига на D-триггерах показана на рис.29.8. – 4-х разрядный регистр сдвига, хранящий 4 двоичных разряда данных A, B, C и D.

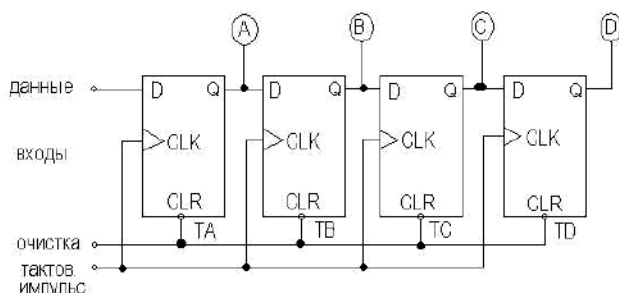


рис.29.8

(Примечание: знак  $\triangle > \text{CLK}$  – обозначает срабатывание триггера по фронту тактового импульса; -  $\square > \text{CLK}$  - по срезу).

Этапы работы регистра:

1) очистка регистра – установка 0 на выходах A, B, C и D при подаче 0 на входы CLR (строка 1 табл. 29.4);

2) до прихода тактового импульса (номер тактового импульса 0) на выходах сохраняется состояние 0000 (строка 2) – независимо от состояний входа D и входа очистки CLR;

3) при подаче 1-го тактового импульса (строка 3) информационная 1 (вход D) переместится на выход Q; с приходом каждого последующего тактового импульса эта 1 будет перемещаться от A до C (строки 4 и 5; импульсы 2 и 3 при сохранении на входе D сигнала 1).

4) Точно также при подаче на информационный вход логического 0 (импульсы 4-8) этот 0 будет передан на вы-

хода А и с каждым последующим тактовым импульсом этот 0 будет перемещаться вправо от А до D.

табл.29.4

| Входы        |                  |               |                                     | Выходы |    |    |    |
|--------------|------------------|---------------|-------------------------------------|--------|----|----|----|
| Номер строки | Очистка Вход CLR | Данные Вход D | Номер тактового импульса (Вход CLK) | ТА     | ТВ | ТС | TD |
|              |                  |               |                                     | А      | В  | С  | Д  |
| 1            | 0                | 0             | 0                                   | 0      | 0  | 0  | 0  |
| 2            | 1                | 1             | 0                                   | 0      | 0  | 0  | 0  |
| 3            | 1                | 1             | 1                                   | 1      | 0  | 0  | 0  |
| 4            | 1                | 1             | 2                                   | 1      | 1  | 0  | 0  |
| 5            | 1                | 1             | 3                                   | 1      | 1  | 1  | 0  |
| 6            | 1                | 0             | 4                                   | 0      | 1  | 1  | 1  |
| 7            | 1                | 0             | 5                                   | 0      | 0  | 1  | 1  |
| 8            | 1                | 0             | 6                                   | 0      | 0  | 0  | 1  |
| 9            | 1                | 0             | 7                                   | 0      | 0  | 0  | 0  |
| 10           | 1                | 0             | 8                                   | 0      | 0  | 0  | 0  |
| 11           | 1                | 1             | 9                                   | 1      | 0  | 0  | 0  |
| 12           | 1                | 0             | 10                                  | 0      | 1  | 0  | 0  |
| 13           | 1                | 0             | 11                                  | 0      | 0  | 1  | 0  |
| 14           | 1                | 0             | 12                                  | 0      | 0  | 0  | 1  |
| 15           | 1                | 0             | 13                                  | 0      | 0  | 0  | 0  |

5) перед приходом тактового импульса 9 на информационном входе устанавливается 1, а перед 10-м импульсом и далее – снова логический 0; в связи с этим поданная на 9 такте информационная 1 будет смещаться на индикаторе вправо (см. табл.30.1 строки 11-14).

Термин последовательный означает, что данные (информация) вводится в регистр поразрядно. Строка 15 показывает, что на 13 импульсе единица покидает крайний правый разряд регистра и теряется.

Недостатки последовательного регистра:

- ввод только по одному биту информации на каждом тактовом импульсе;
- каждый раз после цикла работы теряется крайний правый информационный бит.

Рассмотренный регистр сдвига можно трансформировать в 5-разрядный, добавив схему еще один D-триггер. Обычно применяют 4-, 5- и 8-разрядные регистры. Можно использовать не только D-триггеры, но и JK-триггеры и синхронные RS-триггеры.

### 29.7.2. Параллельные регистры сдвига

Структурная схема параллельного кольцевого регистра сдвига приведена на рис. 29.9, принципиальная – на рис.29.10.

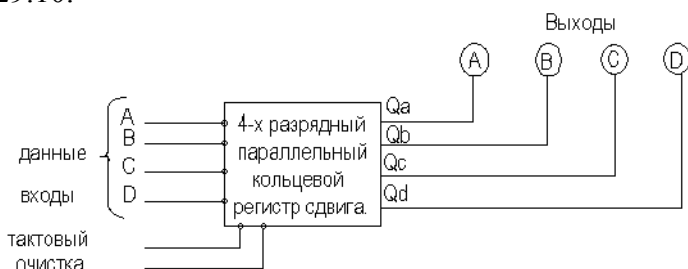


рис. 29.9

В этом регистре используются четыре JK – триггера. Необходимо обратить внимание на цепи обратной связи с выходов  $Q$  и  $\bar{Q}$  триггера TD на входы J и K триггера TA – введенная в триггера информация, которая обычно теряется на выходе триггера TD, сохраняется и циркулирует по регистру сдвига. Слово «параллельный» имеет смысл параллельно загружаемого регистра. Таблица истинности приведена в таблице 29.5.

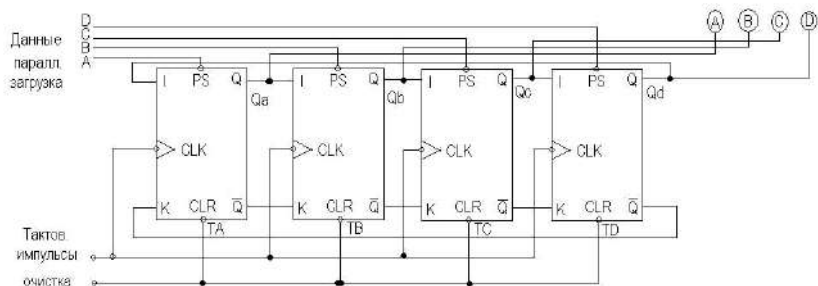


рис. 29.10

Сигналом очистки регистра (установка на выходе 0000) является уровень логического 0 на входе CLR (строка 2 табл.29.5).

табл.29.5

| Номер строки | Входы   |                              |   |   |   |                          | Выходы |    |    |    |
|--------------|---------|------------------------------|---|---|---|--------------------------|--------|----|----|----|
|              | Очистка | Параллельная загрузка данных |   |   |   | Номер тактового импульса | TA     | TB | TC | TD |
|              |         | A                            | B | C | D |                          | A      | B  | C  | D  |
| 1            | 1       | 1                            | 1 | 1 | 1 | 0                        | 1      | 1  | 1  | 0  |
| 2            | 0       | 1                            | 1 | 1 | 1 | 0                        | 0      | 0  | 0  | 0  |
| 3            | 1       | 1                            | 0 | 1 | 1 | 0                        | 0      | 1  | 0  | 0  |
| 4            | 1       | 1                            | 1 | 1 | 1 | 1                        | 0      | 0  | 1  | 0  |
| 5            | 1       | 1                            | 1 | 1 | 1 | 2                        | 0      | 0  | 0  | 1  |
| 6            | 1       | 1                            | 1 | 1 | 1 | 3                        | 1      | 0  | 0  | 0  |
| 7            | 1       | 1                            | 1 | 1 | 1 | 4                        | 0      | 1  | 0  | 0  |
| 8            | 1       | 1                            | 1 | 1 | 1 | 5                        | 0      | 0  | 1  | 1  |
| 9            | 0       | 1                            | 1 | 1 | 1 |                          | 0      | 0  | 0  | 0  |
| 10           | 1       | 1                            | 0 | 0 | 1 |                          | 0      | 1  | 1  | 0  |
| 11           | 1       | 1                            | 1 | 1 | 1 | 6                        | 0      | 0  | 1  | 1  |
| 12           | 1       | 1                            | 1 | 1 | 1 | 7                        | 1      | 0  | 0  | 1  |
| 13           | 1       | 1                            | 1 | 1 | 1 | 8                        | 1      | 1  | 0  | 0  |
| 14           | 1       | 1                            | 1 | 1 | 1 | 9                        | 0      | 1  | 1  | 0  |
| 15           | 1       | 1                            | 1 | 1 | 1 | 10                       | 0      | 0  | 1  | 1  |

Входы параллельной загрузки связаны со входами предварительной установки PS триггеров, что позволяет установить на любом выходе А, В, С и D уровень логической 1.

Если на любой из входов даже кратковременно подать 0, то на соответствующем выходе установится 1.

Подача тактовых импульсов на входы CLK всех JK – триггеров приведёт к сдвигу информации вправо в регистре. Из триггера TD данные передаются в триггер ТА (кольцевое перемещение).

При включении питания на выходах может установиться любая информация – например, по строке 1 таблицы.

Подача логического 0 на входы CLR приведёт к очистке регистра (строка 2).

Далее загрузим, например, в регистр число 0100 (по выходу) – строка 3. Последовательные тактовые импульсы вызывают сдвиг введённой информации вправо (строки 4-8). Особое внимание – строки 5 и 6 – единица из крайнего правого триггера TD переносится в крайний левый триггер ТА (идёт кольцевое перемещение единицы в регистре).

Далее – строка 9 – инициируется очистка регистра (вход CLR). Загружается новая двоичная комбинация (например, 0110, строка 10).

Подача 5 тактовых импульсов (строки 11-15) сдвигает информацию по кольцу вправо на 5 позиций (и т.д.).

### **29.7.3. Классификация регистров**

Регистры классифицируются по следующим видам:

- накопительные (регистры памяти, хранения);
- сдвигающие;
- по направлению передачи информации на:
  - однаправленные,
  - реверсивные /1/.
- по способу приёма информации:



параллельные (статические), в которых информация записывается и считывается только в параллельной форме;

последовательные (сдвигающие), в которых информация записывается и считывается только последовательно;

последовательно – параллельные (комбинация первых двух).

- по числу каналов передачи информации:

парафазные, в которых информация записывается и считывается в прямом  $Q$  и обратном  $\bar{Q}$  кодах;

однофазные, в которых информация записывается и считывается либо в прямом  $Q$ , либо в обратном  $\bar{Q}$  коде.

- по способу тактирования:

однотактные, управляемые одной управляющей последовательностью импульсов;

многотактные, управляемые несколькими управляющими последовательностями тактовых импульсов.

## 29.8. Арифметические устройства. Сумматоры

Сумматором называется комбинационное логическое устройство, предназначенное для выполнения операции арифметического сложения чисел, представленных в виде двоичных кодов.

### 29.8.1. Двоичное сложение

Напомним, что самый крайний левый разряд двоичного числа, например  $101001_2$ , называют самым старшим разрядом (ССР), а крайний правый – самым младшим разрядом СМР. Веса разрядов слева направо – 1, 2, 4, 8, 16 - ... и т.д.

а) Сложение для разряда единиц (двоичных):

$$\begin{array}{r} 0 \\ + 0 \\ \hline 0 \end{array} \quad \begin{array}{r} 1 \\ + 0 \\ \hline 1 \end{array} \quad \begin{array}{r} 0 \\ + 1 \\ \hline 1 \end{array} \quad \begin{array}{r} 1 \\ + 1 \\ \hline 0 \end{array} + \text{перенос } 1 \text{ в старший двоичный разряд (соседний)}.$$

Например:

$$\begin{array}{r} + 101 \\ + 10 \\ \hline 111 \end{array} \left[ \begin{array}{r} 5 \\ + 2 \\ \hline 7 \end{array} \right] \quad \begin{array}{r} \text{перенос} \\ \downarrow 1 \\ + 10:10 \\ \quad 11 \\ \hline 11 \quad 01 \end{array} \left[ \begin{array}{r} 10 \\ + 3 \\ \hline 13 \end{array} \right] \quad \begin{array}{r} \text{перенос} \\ \downarrow 1:1 \\ + 1:1010 \\ \quad 1100 \\ \hline 10 \quad 0110 \end{array} \left[ \begin{array}{r} 26 \\ + 12 \\ \hline 38 \end{array} \right]$$

В десятичной системе  $1+1=2$ .

Но в двоичной системе число 2 будет записано как 10, т.е. 0 в разряде единиц и 1 в разряде двоек.

Тогда  $1+1$  в двоичной системе равно 0 в разряде единиц и перенос 1 в разряд двоек.

Соответственно, этот перенос 1 осуществляется и в других разрядах.

б) Но в разряде двоек и других старших разрядах может возникнуть другая ситуация:

Например, нужно найти сумму  $1+1+1$  в двоичной системе. В десятичной системе  $1+1+1=3$ , или 11 в двоичной системе. Тогда имеем:

$$\begin{array}{r}
 +0 \\
 \hline
 0
 \end{array}
 \begin{array}{r}
 +1 \\
 \hline
 1
 \end{array}
 \begin{array}{r}
 +0 \\
 \hline
 1
 \end{array}
 \begin{array}{r}
 +1 \\
 \hline
 0
 \end{array}
 + \text{перенос } 1 \text{ в старший}$$

двоичный разряд (соседний).

$$\begin{array}{r}
 +1 \\
 +1 \\
 +1 \\
 \hline
 1 + \text{перенос } 1
 \end{array}$$

или

$$\begin{array}{r}
 \text{перенос} \\
 \uparrow \\
 1 \\
 \uparrow \\
 1 \\
 \uparrow \\
 +1 \\
 \hline
 110
 \end{array}
 \left[ \begin{array}{r}
 +3 \\
 3 \\
 \hline
 6
 \end{array} \right]$$

- это справедливо для всех старших разрядов, за исключением разряда единиц

## 29.8.2. Сложение в разряде единиц (полусумматор)

Таблица истинности (табл.29.6):

табл.29.6

| Входы                      |   | Выходы          |         |
|----------------------------|---|-----------------|---------|
| В                          | А | $\Sigma$        | $C_0$   |
| 0                          | 0 | 0               | 0       |
| 0                          | 1 | 1               | 0       |
| 1                          | 0 | 1               | 0       |
| 1                          | 1 | 0               | 1       |
| Двоичные числа - слагаемые |   | сумма           | перенос |
|                            |   | Исключающее ИЛИ | И       |

Слагаемые – это входы А и В. Кроме того, должен быть выход ( $\Sigma^0$ ) и столбец для переноса ( $C_0$ ).

Сокращенное

обозначение - от англ. Output (выход переноса).

Символическое обозначение сумматора, работающего по таб-лице 29.6 представлено на рис.29.11.



рис.29.11

Данная схема называется полусумматором. У полусумматора имеется два входа (A и B) и два выхода ( $\Sigma$  и  $C_0$ ).

Как видно из табл.29.6 выход  $C_0 = A \cdot B$ , т.е. для получения выхода  $C_0$  нужно входы A и B подать на схему И.

Выход  $\Sigma = \bar{A} \cdot B + A \cdot \bar{B}$ , т.е. для реализации этого выхода нужны два элемента И и один элемент ИЛИ. Такая комбинация называется «исключающее ИЛИ»:

$$\Sigma = A \oplus B$$

(символ  $\oplus$  - исключающее ИЛИ)

Т.о., схема полусумматора может быть представлена (рис.29.12):

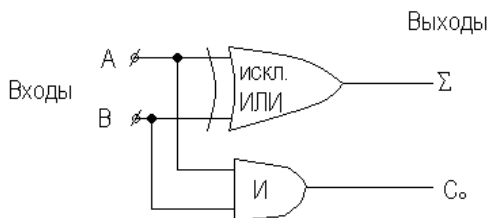


рис.29.12

### 29.8.3. Полные сумматоры

применяются для сложения в разрядах двоек, четвёрок и т.д., за исключением разряда единиц.

Обозначение полного сумматора (рис.29.13):

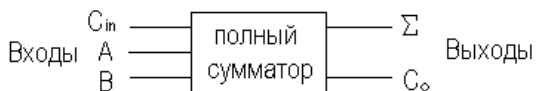


рис.29.13

Таблица истинности (табл.29.7):

табл.29.7

| Входы           |   |   | Выходы   |         |
|-----------------|---|---|----------|---------|
| Cin             | B | A | $\Sigma$ | C0      |
| 0               | 0 | 0 | 0        | 0       |
| 0               | 0 | 1 | 1        | 0       |
| 0               | 1 | 0 | 1        | 0       |
| 0               | 1 | 1 | 0        | 1       |
| 1               | 0 | 0 | 1        | 0       |
| 1               | 0 | 1 | 0        | 1       |
| 1               | 1 | 0 | 0        | 1       |
| 1               | 1 | 1 | 1        | 1       |
| Перенос + A + B |   |   | Сумма    | Перенос |

Структурная схема полного сумматора (рис.29.14):

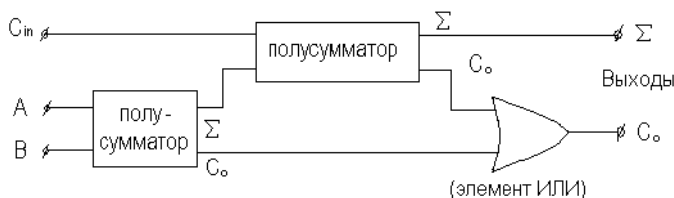


рис.29.14

Cin- от англ. (Input – вход) – сигнал переноса для входа (дополнительного) (см. рис.29.13).

Полусумматоры и сумматоры обычно используется вместе. Они входят в состав арифметически – логических устройств (АЛУ) микропроцессоров.

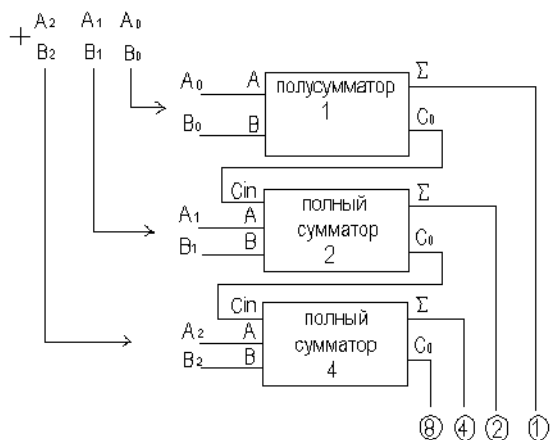
### 29.8.4. 3-х разрядный сумматор

Соединяя полусумматоры и полные сумматоры получают устройства, выполняющие сложение нескольких разрядов. Например, 3-х разрядный сумматор может быть представлен (рис.29.15):

Входными сигналами  $n$ -ного сумматора разряда двоек являются сигнал переноса  $C_{n-1}$  полусумматора и числа  $A_1, B_1$ , разряда двоек.

Полный сумматор разряда четвёрок складывает сигналы переноса полного сумматора двоек и сигналы  $A_2, B_2$  разряда четвёрок.

Так как в результате сложения 3-х разрядных чисел может получиться четырёх разрядное число, то на выходе имеется дополнительный разряд восьмёрок.



В параллельном сумматоре информационные биты всех разрядов поступают на входы одновременно, работа идёт практически мгновенно.

Для фиксации данных на входах и выходах сумматоров обычно используют различные регистры.

### Выводы по теме

1. Счетчиком называется последовательностное устройство, предназначенное для счета входных импульсов и фиксации их числа в двоичном коде.

2. Счетчики строятся на основе  $N$  однотипных, связанных между собой разрядных схем, каждая из которых в общем случае состоит из триггера и некоторой комбинационной схемы, предназначенной для формирования сигналов управления триггером.

Почти каждая цифровая система содержит несколько счетчиков.

3. Основной параметр счетчика — модуль счета. Это максимальное число единичных сигналов, которое может быть сосчитано счетчиком.

4. Счетчики классифицируют: по модулю счета; по направлению счета; по способу формирования внутренних связей.

5. Помимо непосредственно функции счета, счетчики могут выполнять не столь очевидные функции: адресация; делители частоты; элементы памяти.

6. Регистр — последовательностное устройство, предназначенное для записи, хранения и (или) сдвига информации, представленной в виде многоразрядного кода.

7. Регистр представляет собой упорядоченную последовательность триггеров, число которых соответствует числу

разрядов в слове. С каждым регистром обычно связано комбинационное цифровое устройство, с помощью которого обеспечивается выполнение некоторых операций над словами.

8. Регистры сдвига можно получить, соединяя друг с другом несколько триггеров, обладающих памятью.

9. Регистры сдвига используют для временного хранения данных: (между шифратором и процессором и между процессором и дешифратором).

10. Сумматором называется комбинационное логическое устройство, предназначенное для выполнения операции арифметического сложения чисел, представленных в виде двоичных кодов.

11. У полусумматора имеется два входа (А и В) и два выхода ( $\sum$  и  $C_0$ ). Выход  $C_0 = A \bullet B$  предполагает, что входы А и В нужно подать на схему И. Выход  $\sum = \bar{A} \bullet B + A \bullet \bar{B}$  означает, что для реализации этого выхода нужны два элемента И и один элемент ИЛИ. Такая комбинация называется «исключающее ИЛИ».

12. Полные сумматоры применяются для сложения в разрядах двоек, четвёрок и т.д., за исключением разряда единиц.

13. Полусумматоры и сумматоры обычно используются вместе. Они входят в состав арифметически – логических устройств (АЛУ) микропроцессоров.

## Контрольные вопросы

1. Что называется счетчиком импульсов и каков принцип их построения?
2. Что является основным параметром счетчика?
3. Приведите классификацию счетчиков.



4. Какие функции могут выполнять счетчики кроме функции счета?

5. Приведите схему счетчика со сквозным переносом и особенности его работы.

6. Приведите схему асинхронного счетчика по модулю 10 и особенности его работы.

7. Приведите схему синхронного счетчика и особенности его работы.

8. Приведите схему вычитающего счетчика и особенности его работы.

9. Приведите схему асинхронного трехразрядного счетчика по модулю 8 и особенности его работы.

10. Приведите схему самоостанавливающегося счетчика и особенности его работы.

11. Для чего предназначаются регистры?

12. Что представляет собой регистр? С помощью чего обеспечивается выполнение некоторых операций над словами?

13. Приведите классификацию регистров по направлению передачи информации.

14. Приведите классификацию регистров по способу приёма информации.

15. Приведите классификацию регистров по числу каналов передачи информации.

16. Приведите классификацию регистров по способу тактирования.

17. Приведите классификацию регистров по принципу функционирования.

18. Какие операции являются типичными для функционирования регистров?

19. Приведите схему последовательного регистра сдвига на D-триггерах (4-х разрядный регистр сдвига) и объясните принцип его функционирования.

20. Приведите структурную и принципиальную схемы параллельного кольцевого регистра сдвига и объясните принцип его функционирования.

21. Для чего предназначены сумматоры в цифровых устройствах?

22. Объясните назначение входов и выходов в полусумматорах.

23. Для чего предназначены полные сумматоры?

24. Где применяются совместно и сумматоры и полусумматоры?

25. Приведите схему полусумматора и объясните его работу.

26. Приведите схему полного сумматора и объясните его работу.

27. Приведите схему 3-х разрядного сумматора объясните его работу.

## 30. Запоминающие устройства.

### Схемотехника запоминающих устройств

Для кратковременного хранения небольших объёмов информации обычно используют регистры. Для длительного хранения и хранения больших объёмов информации применяют запоминающие устройства (ЗУ), выполненные на специализированных микросхемах.

Для целей хранения информации существует много технических решений. В порядке их развития можно перечислить: логические элементы, магнитные сердечники, полупроводниковые элементы, перфокарты, перфоленты, магнитные ленты, диски (винчестеры или жёсткие диски), оптическая запись (CD).

Любое ЗУ независимо от назначения имеет следующие параметры: емкость ЗУ ( $M$ ) – определяет максимально возможный объём информации, хранящийся в ЗУ. Единица измерения является бит – один разряд двоичного числа (логический 0 или логическая 1). Обычно информация, равная 1 биту хранится в одном элементарном ЗУ (ЭЗУ). 8 – разрядное кодовое слово называют байтом. Используют понятие «организация ЗУ», под которым понимают число кодовых слов  $N$ , хранимых в ЗУ, с указанием их длины (разрядности)  $L$ . Тогда ёмкость  $M$  для ЗУ может быть определена как  $M = N \times L$ . При одном и том же объёме информации ЗУ может иметь различную организацию:  $32 \times 8$  или  $256 \times 1$  имеют один и тот же объём памяти 256 байт.

Временные параметры ЗУ:

- время выборки  $t_A$  - временной интервал между подачей на вход памяти заданного сигнала и получением на

выходе данных при условии, что все остальные сигналы поданы.

- время цикла адреса в режиме записи  $t_{\text{ЦИКЛЗАПИСИ}}$  - это минимальное время совпадения сигналов на управляющих входах памяти, необходимое для надёжной записи информации; для режима считывания -  $t_{\text{ЦИКЛСЧИТЫВ}}$ .

Существуют другие задаваемые временные параметры: цикл установления, длительность действия и сохранения и др.

По функциям ЗУ подразделяется:

- оперативные ЗУ (ОЗУ)

- постоянные ЗУ (ПЗУ)

К ОЗУ относят ЗУ, использующиеся для хранения информации в процессе работы и обеспечивающие соизмеримые времена её считывания и записи.

Оперативные ЗУ могут быть статическими и динамическими.

В статических ОЗУ записанная информация хранится в выделенном для неё месте и не разрушается при её считывании.

Разрушение информации происходит при её принудительном стирании или выключении питания.

В динамических ОЗУ информация постоянно циркулирует в выделенном массиве, отведённом для её хранения.

При этом она (информация) разрушается после её считывания. Для сохранения информации её нужно переписать заново.

Основное требование к ОЗУ – быстродействие при заданном объёме и организации.

На принципиальных схемах ОЗУ обозначается RAM (random access memory).

Постоянные ЗУ предназначены для хранения информации, остающейся неизменной в течение времени эксплуатации устройства.

Основой любого ЗУ является матрица памяти (накопитель).

### 30.1. Принципы работы ОЗУ. ЗУ с произвольной выборкой (ЗУПВ)

ОЗУ (их обозначают английской аббревиатурой RAM) подразделяются на статические и динамические. В статических ОЗУ запоминающая ячейка представляет собой триггер на биполярных или полевых транзисторах, что определяет потенциальный характер управляющих сигналов и возможность считывания информации без ее разрушения. Статические ОЗУ выполняются по различным технологиям (ТТЛ, ЭСЛ, КМОП, n-МОП, И<sup>2</sup>Л) и обладают теми же достоинствами и недостатками, что и элементы, изготовленные по той или иной технологии. Так, для получения высокого быстродействия статические ОЗУ выполняются по ЭСЛ-технологии, а И<sup>2</sup>Л-технология позволяет увеличивать функциональную плотность ЗУ в несколько раз по сравнению с ТТЛ-технологией. В последнее время интенсивно развиваются статические ОЗУ по КМОП-технологии.

Благодаря высокому быстродействию статические ОЗУ широко используются в КЭШ-памяти. КЭШ-память (или буферная память) предназначена для запоминания копий информации, передаваемой между различными устройствами, прежде всего между процессором и основной памятью различных вычислительных устройств.

КЭШ-память имеет небольшую информационную емкость по сравнению с основной памятью, но более высокое быстродействие и особенно эффективна, когда требуется многократное использование одних и тех же данных.

Так, например, микросхема K1500 представляет собой статическое ОЗУ, выполненное по ЭСЛ-технологии, име-

ющее организацию 64 x 4 и предназначенное для построения локальных и буферных ОЗУ (КЭШ-память).

В динамических ОЗУ элементом памяти является емкость (например, входная емкость полевого транзистора), что требует периодического восстановления (регенерации) записанной информации в процессе ее хранения.

ОЗУ динамического типа позволяют реализовать большой объем памяти, но они сложнее в использовании, так как необходимо наличие специальной схемы управления режимами работы. В современных динамических ОЗУ имеются встроенные системы регенерации и синхронизации. Такие ОЗУ по внешним сигналам управления не отличаются от статических ОЗУ.

Плотность упаковки элементов памяти динамических ОЗУ в несколько раз превышает плотность упаковки в статических ОЗУ, т. е. они имеют большую информационную емкость. Они в несколько раз дешевле статических ОЗУ.

Динамические ОЗУ имеют ряд особенностей, существенно отличающих их от статических, одной из которых является использование в них последовательной адресации.

К динамическим ОЗУ относятся микросхемы серии K565. Выводы микросхем имеют следующие назначения: CS — выбор микросхемы, Ai — адресные входы, Di — информационные входы, DOi — информационные выходы, W/R — разрешение записи/считывания, RAS — строб адреса строки, CAS — строб адреса столбца, CE — сигнал разрешения.

Микросхема K155PY2 — это статическое ОЗУ с открытым коллекторным выходом — выполнена на основе ТТЛ-структур емкостью 64 бит. Имеет структуру 16 x 4, т. е. может хранить 16 слов длиной 4 разряда каждое.

Микросхема K537PY8 — это статическое ОЗУ объемом 2 Кбайта, выполнена на основе структур КМОП, по входу и

выходу совместима с TTL-структурами. Имеет двунаправленную 8-разрядную шину данных, которая используется и для записи, и для считывания информации.

Микросхема K565PY5 — это динамическое ОЗУ на основе и-МОП-структур, по входам и выходам совместима с TTL-структурами, имеет организацию 64К x 1. Шина адреса работает в мультиплексном режиме. Вначале на ней выставляются адреса строк, которые запоминаются во внутреннем регистре по спаду сигнала RAS. Затем выставляются адреса столбцов, которые запоминаются по спаду сигнала CAS.

Микросхемы K537PY8 и K565PY5 имеют выходы с тремя состояниями.

Структурная организация ОЗУ с 64 позициями размещения 0 и 1 показана в табл.30.1.

табл.30.1

| Адрес    | Разряд D | Разряд C | Разряд B | Разряд A |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| Слово 0  |          |          |          |          |
| Слово 1  |          |          |          |          |
| Слово 2  |          |          |          |          |
| Слово 3  | 0        | 1        | 1        | 0        |
| Слово 4  |          |          |          |          |
| Слово 5  |          |          |          |          |
| Слово 6  |          |          |          |          |
| Слово 7  |          |          |          |          |
| Слово 8  |          |          |          |          |
| Слово 9  |          |          |          |          |
| Слово 10 |          |          |          |          |
| Слово 11 |          |          |          |          |
| Слово 12 |          |          |          |          |
| Слово 13 |          |          |          |          |
| Слово 14 |          |          |          |          |
| Слово 15 |          |          |          |          |

В данной таблице можно заполнить 64 позиции любыми данными. 64 позиции организованы в 16 групп, называемых словами. Каждое слово содержит 4 информационных разряда. Другими словами, данное ОЗУ содержит 16 слов длиной 4 разряда каждое (можно было организовать как ОЗУ  $32 \times 2$  или  $64 \times 1$ ). Например, в строке «Слово 3» запишем значение слова 3 – 0110, т.е. поместили на хранение, или записали слово в память. Это операция записи.

Чтобы узнать, какая информация находится в памяти на месте слова 3, нужно прочитать запись на месте слова 3 – это операция считывания.

ЗУ по табл.30.1 называется ЗУ с произвольной выборкой (ЗУПВ), так как мы можем непосредственно обратиться к слову 3 или любому другому и считывать их значения. Ячейка памяти, отведённая для записи слова, называют адресом этого слова. В данном примере адресом слова 3 является двоичное число  $0011_2$  ( $3_{10}$ ). По этому адресу записано слово 0110 (значение слова 3). Условное графическое обозначение ОЗУ выполненного на микросхеме 7489 с ёмкостью на 64 бита (рис.30.1):

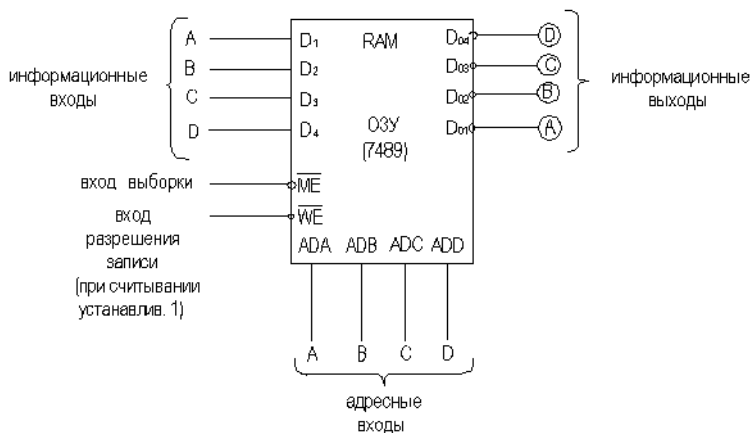


рис.30.1



Для записи двоичного слова 0110 в ячейку памяти, отведённую под слово 3 необходимо подать на адресные входы двоичную комбинацию 0011 ( $3_{10}$ ), а на информационные входы – подать входные сигналы  $A = 0; B = 1; C = 1; D = 0$  (0110 – значение слова). Затем на входе «разрешение записи» - подать 0, и при подаче 0 на вход выборки – данные заносятся в память. Это – процесс записи.

Для считывания информации по адресу 3 нужно снова подать на адресные входы сигналы 0011 ( $3_{10}$ ). Вход «разрешения записи» устанавливаем в состояние считывания (1); на входе выборки – 0

При этом на выходе появится двоичная комбинация 0110 (слово  $3_{10}$ ) – это процесс считывания.

### 30.2. Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ)

Все ПЗУ можно разделить на следующие группы:

- программируемые при изготовлении (обозначают как ПЗУ или ROM);
- с однократным программированием, позволяющим пользователю однократно изменить состояние матрицы памяти электрическим путем по заданной программе (обозначают как ППЗУ или PROM);
- перепрограммируемые (репрограммируемые), с возможностью многократного электрического перепрограммирования, с ультрафиолетовым (обозначают как РПЗУ УФ или EPROM) или электрическим (обозначают как РПЗУ ЭС или EEPROM, или E<sup>2</sup>PROM) стиранием информации.

Для обеспечения возможности объединения по выходу при наращивании памяти все ПЗУ имеют выходы с тремя состояниями или открытые коллекторные выходы.

В запоминающие устройства, программируемые при изготовлении (ПЗУ или ROM), информация записывается не-

посредственно в процессе их изготовления с помощью фотошаблона, называемого маской, на завершающем этапе технологического процесса.

Такие ПЗУ называются масочными ПЗУ, они могут быть построены на диодах, биполярных или МОП-транзисторах. В ППЗУ накопитель часто построен на запоминающих ячейках с плавкими перемычками, изготовленными из нихрома или других тугоплавких материалов. Процесс записи состоит в избирательном пережигании плавких перемычек.

В РПЗУ запоминающие ячейки строятся на основе МОП-технологий. Используются различные физические явления хранения заряда на границе между двумя различными диэлектрическими средами или проводящей и диэлектрической средой.

В первом случае диэлектрик под затвором МОП-транзистора делают из двух слоев: нитрида кремния и двуокиси кремния ( $\text{SiN}_4$  —  $\text{SiO}_2$ ). Было обнаружено, что в сложной структуре  $\text{SiN}_4$  —  $\text{SiO}_2$  при изменении электрического напряжения возникает гистерезис заряда на границе раздела двух слоев, что и позволяет создавать запоминающие ячейки.

Такие транзисторы называют МНОП-транзисторами в соответствии с их структурой: металл-нитрид кремния-окисел-полупроводник.

Запись информации в ячейки на МНОП-транзисторах осуществляется подачей относительно высоких напряжений (около 20 В), а перед записью осуществляется электрическое стирание старой информации (запись 0 во все запоминающие элементы). Таким образом, ЗУ на МНОП-транзисторах — это РПЗУ ЭС или EPROM. Они позволяют осуществлять  $10^4$  —  $10^6$  перезаписей, энергонезависимы и могут хранить информацию годами.

В обозначении микросхем с электрическим стиранием после номера серии указывают две буквы РР.

Так, микросхема К1601РР1 выполнена на основе р-МНОП-транзисторов, по входу и выходу совместима с ТТЛ-структурами, имеет выходы с тремя состояниями и организацию 1Кх 4. Время хранения информации 500 часов.

Во втором случае основой запоминающей ячейки является лавинно-инжекционный МОП-транзистор с плавающим затвором (ЛИЗМОП-транзисторы).

В лавинно-инжекционном транзисторе с плавающим затвором при достаточно большом напряжении на стоке происходит обратимый лавинный пробой диэлектрика, и в область плавающего затвора инжектируются носители заряда. Поскольку плавающий затвор окружен диэлектриком, то ток утечки мал и хранение информации обеспечивается в течение длительного промежутка времени (десятки лет). При подаче напряжения на основной затвор происходит рассасывание заряда за счет туннельного эффекта, т. е. стирание информации.

С использованием ЛИЗМОП-транзисторов строятся РПЗУ как с ультрафиолетовым (EPROM), так и электрическим (E<sup>2</sup>PROM) стиранием информации.

В ЗУ с ультрафиолетовым стиранием в корпусе микросхемы имеется специальное прозрачное окошко для облучения кристалла, причем информация стирается во всем кристалле.

При электрическом стирании информацию можно стереть не со всего кристалла, а выборочно. Кроме того, длительность электрического стирания значительно меньше, чем ультрафиолетового, а число циклов перезаписи значительно больше. Поэтому ЗУ с электрическим стиранием информации вытесняют ЗУ с ультрафиолетовым стиранием. В обозначении микросхем с ультрафиолетовым стиранием после трех цифр серии указывают две буквы РФ.РПЗУ с ультрафиолетовым стиранием информации серии 573 вы-

полнены на основе ЛИЗМОП-транзисторов, по входу и по выходу совместимы с ТТЛ-структурами.

Флэш-память. По основным принципам работы и типу запоминающих элементов флэш-память (Flash-Memory) подобна ППЗУ с электрической записью и стиранием информации. Флэш-память имеет ряд особенностей, что и позволяет выделить ее в отдельный класс. В ней осуществляется стирание или всей записанной информации одновременно, или больших блоков информации, а не стирание отдельных слов (Flash-вспышка, мгновение).

Флэш-память предназначена для хранения редко обновляемой информации и замены памяти на магнитных дисках (жесткий диск) в портативных компьютерах.

Матрица запоминающих элементов флэш-памяти, построенная на ЛИЗМОП-транзисторах с их параллельным включением, обеспечивает режим быстрого произвольного доступа и используется для построения памяти хранения редко обновляемой информации.

Так, фирма Intel разработала флэш-память, которая допускает до  $10^5$  циклов стирания, причем время стирания и время программирования всей памяти составляет 0,6—4 с для памяти емкостью 256 Кбит—2 Мбит, а время доступа при чтении составляет примерно 100 нс.

Для замены файлов на магнитных дисках разработана файловая флэш-память (Flash-File-Memory), в которой накопитель (матрица запоминающих элементов) делится на блоки, являющиеся аналогами секторов магнитных дисков.

Так, файловая флэш-память фирмы Intel имеет информационную емкость до 32 Мбит (организация 2М x 16 или 4М x 8) при времени доступа 70—150 нс и допускает до  $10^6$  циклов стирания на блок.

Постоянные ЗУ предназначены для хранения информации, которая останется неизменной в течении всего времени эксплуатации; информация не исчезает при снятии напря-

жения питания. В ПЗУ возможен только режим считывания, причём считывание не сопровождается разрушением информации. Информация в ПЗУ представляется в виде наличия или отсутствия соединения между шинами адреса (ША) и шинами данных (ШД). Например, ПЗУ с организацией  $4 \times 8$  (рис.30.2):

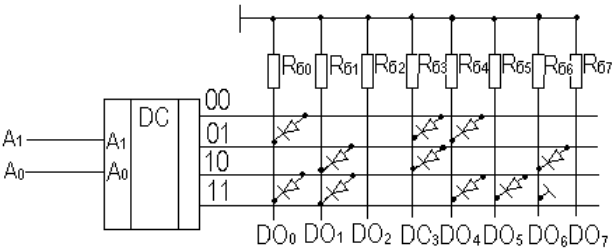


рис.30.2

ПЗУ включает дешифратор с двумя адресными шинами  $A_0 A_1$ ; восемь балластных резисторов  $R_{60}...R_{67}$ ; диоды, число которых равно числу логических 1, записных в ПЗУ.Работа ПЗУ: после появления на выходе дешифратора на-пряжения логической единицы при наличии связи междушинами адреса и шинами данных, это напряжение прикла-дывается к соответствующему резистору, что воспринима-ется как появление на шине данных логической 1. При от-сутствии связи между ША и ШД ток через резистор непротекает, что воспринимается как логический 0. Инфор-мация, записанная в ПЗУ на рис.30.2 соответствует табли-це истинности (табл.30.2)

табл.30.2

| A1 | A0 | D00 | D01 | D02 | D03 | D04 | D05 | D06 | D07 |
|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0  | 0  | 1   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   |
| 0  | 1  | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   | 0   | 1   | 0   |
| 1  | 0  | 1   | 1   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   | 0   |
| 1  | 1  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

### 30.3. Схемотехника ЗУ

Среди отечественных серий микросхем статических ОЗУ серии К500, К1500 выполнены по ЭСЛ-технологии, К132, К1809 - по n-МОП-технологии, К176, К561, К573, К581 — по КМОП-технологии, К555 — по ТТЛ-технологии, К541, К185 — по И<sup>2</sup>Л-технологии.

К масочным ПЗУ относят микросхемы серий 155, 568, 1656, 541, 555, 1656, 1801 и др., выполненные по технологии ТТЛ, ТТЛШ, n-МОП, КМОП. Для обозначения данного вида ПЗУ после номера серии помещают две буквы РЕ. Так, микросхемы К155РЕ21 и К155РЕ22 предназначены для воспроизведения соответственно букв русского (за исключением буквы Ъ) и латинского алфавитов, а также некоторых знаков.

ППЗУ выпускаются в составе серий микросхем 155, 541, 565, 1608. В обозначениях таких ЗУ используют буквы РТ.

Так, например, микросхема К541РТ1 выполнена по ТТЛШ-технологии с открытым коллекторным выходом и имеет организацию 256 x 4.

Микросхема К573РФ5 — это репрограммируемое ПЗУ (РПЗУУФ) с ультрафиолетовым стиранием, имеющее структуру 2К x 8. По входу и выходу эта микросхема совместима с ТТЛ-структурами. Время хранения информации — 50 тыс. часов.

Микросхема К556РТ5 — это однократно программируемая ПЗУ, выполнена на основе ТТЛШ-структур, по входу и

выходу совместима с ТТЛ-структурами, имеющая структуру 512 бит x

### 30.3.1. Статические ОЗУ на биполярных транзисторах

Статические элементарные ЗУ или ЗЭ (элементы) на биполярных транзисторах – это дорогостоящие ЗЭ; они выполнены на основе триггерных устройств. Этот класс устройств обладает максимальным быстродействием. Принципиальная схема ЭЗЭ на основе биполярного транзистора проверена на рис. 30.3.

Основу ЭЗЭ составляет два инвертора на трёхэмиттерных транзисторах  $VT_1$  и  $VT_2$ . Инверторы включены последовательно с глубокой ПОС.  $CS_1$  и  $CS_2$  – выводы выборки элемента;  $P_1$  – прямой;  $P_2$  – обратный выходы ЭЗЭ; Эти выходы через усилители считывания ( $R_{BXC}$ ) подключаются к общей шине.

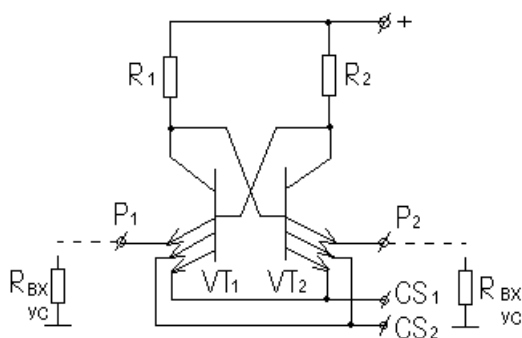


рис. 30.3

В режиме хранения на один или оба входа  $CS_1$  ( $CS_2$ ) подан 0. При этом триггер, образованный двумя инверторами, находится в устойчивом состоянии – например,

$VT_1$  насыщен, а  $VT_2$  – заперт. Весь ток насыщенного транзистора  $VT_1$  через вывод выборки ( $CS_1$  или  $CS_2$ ) попадает на общую шину; на выходе  $P_1$  напряжение отсутствует, и информация из ЭЗЭ не попадает на вход усилителя ( $U_{Rex} = 0$ ). Для считывания информации нужно на оба входа выборки подать 1. При этом единственным путём протекания тока  $VT_1$  останется вывод  $P_1$  – на входе усилителя будет считывание  $U_{Rex}$  в зависимости от записанной в ЭЗЭ информации. При этом информация в ЭЗЭ сохраняется (триггер не изменяет своего состояния). Кроме того, триггер не изменяет своего состояния, если на оба входа  $CS_1$ ,  $CS_2$  подать 0. При необходимости записать новую информацию первоначально на ЭЗЭ подаются сигналы выборки. На вывод  $P_1$  подаётся 1, на  $P_2$  – 0. При этом цепи протекания токов для  $VT_1$  кругом разорваны; на коллекторе  $VT_1$  – высокий уровень; это напряжение насыщает  $VT_2$ , подтверждает закрытое состояние  $VT_1$ . В ЭЗЭ записывается новая информация, которая будет храниться до новой перезаписи.

### 30.3.2. Статические ОЗУ на основе полевых транзисторах

Применение в ЭЗЭ статических ОЗУ полевых транзисторов позволяет получить более высокую «упаковку» элементов, уменьшить их стоимость и потребляемую мощность. Однако, при этом снижается быстродействие ОЗУ. Транзисторы  $VT_1$  и  $VT_2$  с нагрузочными МДП транзисторами (рис. 30.4) образуют инверторы; за счёт глубокой ПОС образуется структура триггера. Выходы триггера через  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $VT_5$  и  $VT_6$  соединены с выводами  $P_1$  и  $P_2$ , соответственно. Объединённые затворы  $VT_5$  и  $VT_6$  образуют вывод выборки  $CS$ .



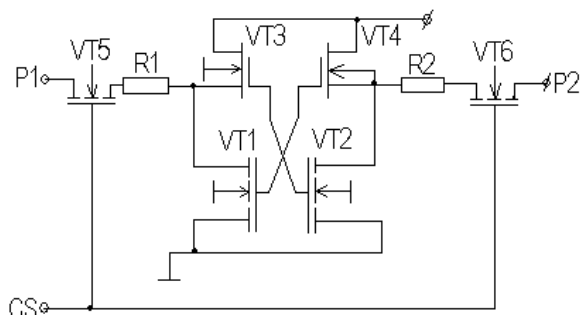


рис. 30.4

Допустим, что в некоторый момент времени VT1 включен, VT2 заперт. Если на вход выборки подано напряжение, недостаточное для открывания VT5 и VT6, то триггер отключён от выводов P1 и P2, информация на них отсутствует – это режим хранения, который может длиться сколь угодно долго.

Если на вход CS выборки подать напряжение, достаточное для открывания VT5 и VT6, то на выводах P1 и P2 появится информация о состоянии триггера – для нашего случая на P1 – 0, на P2 – 1; это процесс считывания.

Для записи (изменения) новой информации необходимо на P1 подать 1, а на P2 – 0. Напряжение на P2=0 шунтируя VT2, снимает с затвора VT1 напряжение, поддерживающее его в открытом состоянии – транзистор VT1 закрывается. Напряжение на его стоке увеличится, за счёт чего откроется VT2, дополнительно закрыв VT1. В триггере будет записана новая информация – это процесс перезаписи информации. Она также может храниться сколь угодно долго. Удобство данной схемы – чтение и запись информации идёт по одним и тем же выводам.

Условное обозначение ИС ОЗУ (рис. 30.5):

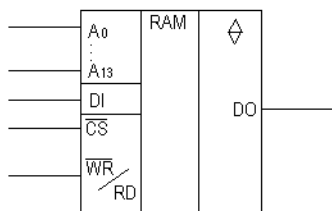


рис. 30.5

Это статическое ОЗУ типа 132PY6, выполненное на п-МОП – транзисторах с организацией  $16K \times 1$ . ИС имеет 14 адресных входов ( $A_0 \dots A_{13}$ ), вход ввода информации  $DI$ ,

выход  $DO$ , вывод разрешения работы  $\overline{CS}$  и вывод управления режимами чтения – записи  $\overline{WR}/RD$ . При подаче лог. 0 ( $\overline{WR}/RD = 0$ ) выполняется запись, а при  $\overline{WR}/RD = 1$  – чтение информации. Значок  $\overline{\wedge}$  означает, что выход ИС имеет три состояния, т.е. информация подключается к выходному выводу  $DO$  только при выборке ИС.

### 30.3.3. Динамические ОЗУ

В ЭЗЭ динамических ОЗУ информация хранится в виде заряда на конденсаторе. При этом должны быть предприняты достаточно сложные схемотехнические решения по поддержанию уровня заряда, так как в любом случае происходит собственный саморазряд. При этом для увеличения достоверности необходимо выполнение условия  $t_{ХРАН} \gg t_{ВОССТ}$ . Кроме того, периодически заряд восста-

навливается (информация периодически считывается и повторно записывается) каждые 1...2 мсек (с частотой регенерации 0,5 – 1 кГц).

Быстродействие таких ОЗУ меньше, чем у ОЗУ на БП транзисторах, но они существенно проще, дешевле и обес-

печивают высокую плотность концентрации. Пример ЭЗЭ с динамическим ЗУ приведен на рис. 30.6:

На рис. 20.4 кроме собственно ЭЗЭ показаны дополнительные цепи, необходимые для записи – считывания.

Собственно ЭЗЭ включает в себя конденсатор  $C_{\Pi}$  и ключ на VT1, подключающий конденсатор к шине данных (ШД). Затвор VT1 подключается к выходу дешифратора адреса CS. Конденсатор подключается к ШД при CS=1 (при этом VT1 открывается). В этом случае можно либо считывать информацию, либо дописывать новую.

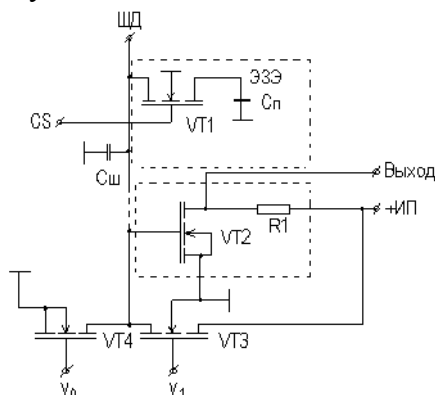


рис. 30.6

VT2 – усилитель считывания; после подключения к шине данных конденсатора нужного ЭЗЭ с выхода усилителя считывается напряжение, пропорциональное установленному ранее (исходному) на выбранном  $C_{\Pi}$ .

Особенности процесса обусловлены тем, что шина данных имеет большую длину и большую собственную ёмкость  $C_{\Pi}^* \gg C_{\Pi}$ .

Подключение  $C_{II}$  к ШД за счёт перераспределения зарядов незначительно изменяет потенциал ШД, и необходимо «уловить» это изменение.

Для этого:

- непосредственно перед считыванием информации фиксируют уровень ШД, подключая её при помощи ключа VT3 к +ИП и заряжая  $C_{III}$  до +ИП;
- на нужный ЭЗЭ подают сигнал выборки CS.  $C_{II}$  подключается к ШД, изменяя её потенциал (изменяется напряжение на ШД);
- с выхода усилителя считывают сигнал, пропорциональный заряду конденсатора выбранного ЭЗЭ.

Как видно из данного алгоритма, считывание информации приводит к её разрушению.

Поэтому для дальнейшего её хранения она записывается заново.

Запись информации в ЭЗЭ выполняется с использованием транзисторов VT3 и VT4, которые по сигналам управления подключают ШД либо к +ИП, либо к входным сигналам (при этом заранее был подключен выбранный ЭЗЭ).

Реальная схема много сложнее. Регенерацией сигналов управляет или общий процессор, или специальное самостоятельное устройство.

#### 30.4. Постоянные ЗУ (ПЗУ; ROM - Read – Only Memory)

служат для хранения фиксированных данных и программ. Будучи похожими на динамические ОЗУ, ПЗУ представляют собой, по сути, решётку из транзисторов, но конфигурация хранимых данных определяется в момент изготовления в соответствии с заданной таблицей истинности.

### 30.4.1. Масочные ПЗУ

Фрагмент масочного ПЗУ на полевых транзисторах (рис. 30.7):

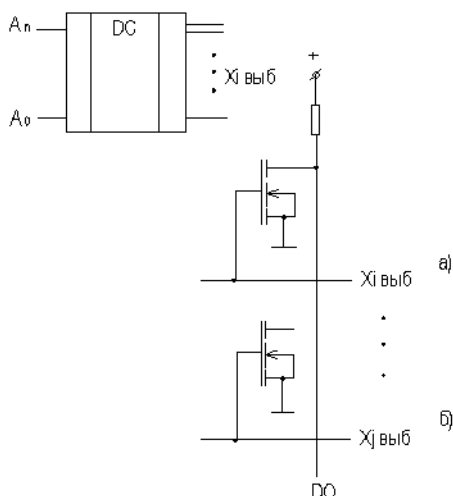


рис. 30.7

Нанесение рисунков схем (структуры) производится в процессе фотолитографии с помощью фотошаблонов (масок).

В соответствии с таблицей истинности транзистор либо подключается к схеме (а), либо не подключается (б). Тогда в соответствии с адресом на шине данных либо можно будет считывать информацию ( $X_i \text{ Вых}$ ), либо информация будет отсутствовать ( $X_j \text{ Вых}$ ).

Масочные ПЗУ имеют простую структуру, способную хранить большие объёмы информации.

### 30.4.2. Прожигаемые ПЗУ (однократно программируемые ПЗУ)

Физически процесс записи осуществляется путём разрушения (пережигания) специально предусмотренных перемычек между шинами дешифратора и выходными шинами. Разрушение осуществляется импульсами тока короткой длительности с помощью программатора, работающего по таблице истинности для данной конкретной схемы (рис. 30.8).

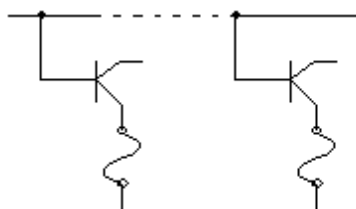


рис. 30.8

Условное графическое обозначение ИС ПЗУ типа 556PT16. Её организация  $8K \times 8$ . Время выборки адреса 85 нс (см рис. 30.9):

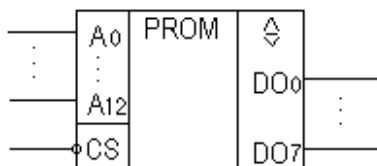


рис. 30.9

### 30.4.3. *Репрограммируемые ПЗУ (стираемое ППЗУ – Erasable PROM, EPROM; РПЗУ)*

Такие ПЗУ являются по сути электростатическими ЗУ. Логика их работы аналогична работе ЭЗЭ динамического ОЗУ. Отличие состоит в том, что вместо конденсатора носителем информации является специализированный МДП – транзистор. В зависимости от типа транзистора различают два вида РПЗУ:

- РПЗУ с МДП – транзистором с «плавающим затвором»;

- РПЗУ с МДП – транзистором с двухслойным диэлектриком (МНОП – транзистором – транзистором со структурой «металл – нитрид кремния – оксид – полупроводник»).

Для РПЗУ обоих видов имеется возможность неоднократной перезаписи с помощью специальных программатор. Типовая схема ЭЗЭ РПЗУ приведена на рис. 30.10.

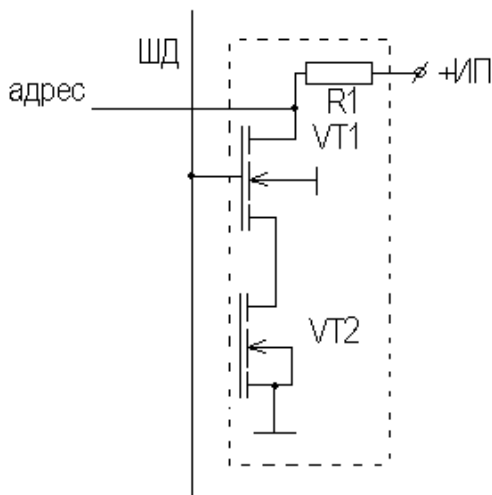


рис. 30.10

Транзистор VT1 служит для выбора по сигналу с выхода дешифратора адреса нужной ячейки памяти (VT2). Шина данных подключена к +ИП через резистор R1.

При отпирании VT1 протекание по нему тока в цепи стока зависит от состояния (ранее записанного) транзистора VT2 – наличие или отсутствие тока классифицируется как хранение сигналов 0 или 1. (ток есть – 0, тока нет – 1).

Устройство МДП транзистора с «плавающим затвором» представлено на рис. 30.11.

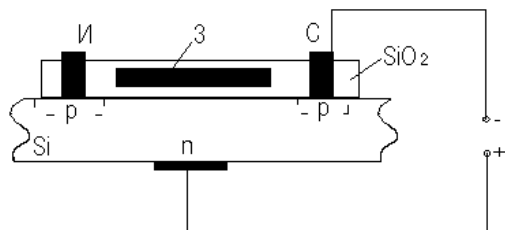


рис. 30.11

Для этого транзистора затвор представляет собой проводящую область (включение), изолированную от других частей прибора слоем диэлектрика. Отсутствие связей затвора позволяет ему долгое время «держат» достаточно большой заряд. Под действием этого заряда в n – полупроводнике образуется проводящий канал – через транзистор может протекать некоторый ток – транзистор открыт (0); Если заряд на затворе отсутствует, ток стока транзистора равен нулю (транзистор закрыт)(1).

Процесс записи проходит в два этапа:

- стирание старой информации;
- запись новой информации.

На первом этапе поверхность транзисторов примерно 15 – 20 минут облучают ультрафиолетовым излучением. При



этом происходит удаление существовавших зарядов на затворах (РПЗУ с ультрафиолетовым стиранием).

На втором этапе для записи новой информации р-п переход, образованный стоком и подложкой смещают в обратном направлении. Величина напряжения должна быть достаточной для пробоя перехода. Часть носителей заряда при пробое инжектируется в затвор, образуя заряд последнего – режим записи.

Для МНОП – транзисторов (МНОП – транзистор со структурой «металл – нитрид кремния - оксид – полупроводник») между затвором и полупроводником находится два слоя (различных) диэлектриков.

Между этими слоями возникает заряд, действие которого на проводимость аналогично «плавающему заряду». Запись проводится аналогично выше рассмотренному процессу, но стирание производится за счёт приложенного электрического поля (а не ультрафиолетового излучения) – электрически стираемые РПЗУ. Для этого необходимо меньшее время. В популярных EPROM (флэшках) можно стирать и переписывать информацию при +5В, т.е. «флэшки» можно считать энергонезависимыми РПЗУ (ОЗУ). Гарантировать время хранения информации для РПЗУ при подключенном ИП – не менее 20 000 часов, без подключения ИП – до 5 лет; число перепрограммирований – до 25.

### Выводы по теме

1. Для кратковременного хранения небольших объёмов информации обычно используют регистры. Для длительного хранения и хранения больших объёмов информации применяют запоминающие устройства (ЗУ), выполненные на специализированных микросхемах.

2. Любое ЗУ независимо от назначения имеет следующие параметры: ёмкость ЗУ (М) – определяет максимально

возможный объём информации, хранящийся в ЗУ. Единица измерения является бит – один разряд двоичного числа (логический 0 или логическая 1). Обычно информация, равная 1 биту хранится в одном элементарном ЗУ (ЭЗУ). 8 – разрядное кодовое слово называют байтом. Используют понятие «организация ЗУ», под которым понимают число кодовых слов  $N$ , хранимых в ЗУ, с указанием их длины (разрядности)  $L$ . Тогда ёмкость  $M$  для ЗУ может быть определена как

3. Временные параметры ЗУ: время выборки, время цикла адреса в режиме записи, цикл установления, длительность действия и сохранения и др.

4. По функциям ЗУ подразделяется:

- оперативные ЗУ (ОЗУ)
- постоянные ЗУ (ПЗУ).

К ОЗУ относят ЗУ, использующиеся для хранения информации в процессе работы и обеспечивающие соизмеримые времена её считывания и записи.

Постоянные ЗУ предназначены для хранения информации, остающейся неизменной в течение времени эксплуатации устройства.

5. Оперативные ЗУ могут быть статическими и динамическими.

В статических ОЗУ записанная информация хранится в выделенном для неё месте и не разрушается при её считывании. Разрушение информации происходит при её принудительном стирании или выключении питания.

В динамических ОЗУ информация постоянно циркулирует в выделенном массиве, отведённом для её хранения. При этом она (информация) разрушается после её считывания. Для сохранения информации её нужно переписать заново.

6. Основное требование к ОЗУ – быстродействие при заданном объёме и организации. На принципиальных схемах ОЗУ обозначается RAM (random access memory).

7. Все ПЗУ можно разделить на следующие группы:

- программируемые при изготовлении;
- с однократным программированием;
- перепрограммируемые (репрограммируемые).

8. Статические элементарные ЗУ или ЗЭ (элементы) на биполярных транзисторах – это дорогостоящие ЗЭ; они выполнены на основе триггерных устройств. Этот класс устройств обладает максимальным быстродействием.

9. Применение в ЭЗЭ статических ОЗУ полевых транзисторов позволяет получить более высокую «упаковку» элементов, уменьшить их стоимость и потребляемую мощность. Однако, при этом снижается быстродействие ОЗУ.

10. В ЭЗЭ динамических ОЗУ информация хранится в виде заряда на конденсаторе. Быстродействие таких ОЗУ меньше, чем у ОЗУ на БП транзисторах, но они существенно проще, дешевле и обеспечивают высокую плотность концентрации.

11. Будучи похожими на динамические ОЗУ, ПЗУ представляют собой, по сути, решётку из транзисторов, но конфигурация хранимых данных определяется в момент изготовления в соответствии с заданной таблицей истинности.

12. Нанесение рисунков схем (структуры) для масочных ПЗУ производится в процессе фотолитографии с помощью фотошаблонов (масок) в соответствии с таблицей истинности. Масочные ПЗУ имеют простую структуру, способную хранить большие объёмы информации.

13. Физически процесс записи в прожигаемых ПЗУ (однократно программируемых ППЗУ) осуществляется путём разрушения (пережигания) специально предусмотренных перемычек между шинами дешифратора и выходными шинами. Разрушение осуществляется импульсами тока ко-

роткой длительности с помощью программатора, работающего по таблице истинности для данной конкретной схемы.

14. Репрограммируемые ПЗУ (стираемое ППЗУ - Erasable PROM, EPROM; РПЗУ) являются по сути электростатическими ЗУ. Логика их работы аналогична работе ЭЗЭ динамического ОЗУ. Отличие состоит в том, что вместо конденсатора носителем информации является специализированный МДП – транзистор.

### Контрольные вопросы

1. Что применяют для длительного хранения и хранения больших объёмов информации?
2. Какими параметрами характеризуется ЗУ?
3. Для чего предназначены ОЗУ?
4. Для чего предназначены ПЗУ?
5. В чем принципиальное отличие статических ОЗУ от динамических.
6. Какому основному требованию должны отвечать ОЗУ?
7. На какие основные группы подразделяются ПЗУ?
8. По каким технологиям выполняются статические ОЗУ?
9. Для чего предназначена КЭШ-память (или буферная память)? В чем заключаются ее особенности?
10. Что является запоминающей ячейкой в статических ОЗУ?
11. Что является элементом памяти в динамических ОЗУ?
12. В чем заключается особенность ЗУ с произвольной выборкой (ЗУПВ)?
13. В чем заключается особенность функционирования масочных ПЗУ?
14. В чем заключается особенность функционирования ППЗУ?

15. В чем заключается особенность функционирования РПЗУ?

16. В чем заключается особенность функционирования запоминающей ячейки на основе лавинно-инжекционного МОП-транзистора с плавающим затвором (ЛИЗМОП-транзистор)?

17. В чем заключаются особенности и различия электрического и ультрафиолетового стирания информации?

18. Какие основные принципы работы запоминающих элементов Флэш-памяти (Flash-Memory)? Для чего она предназначена?

19. Приведите пример ПЗУ с организацией  $4 \times 8$ .

20. Какой класс устройств ЭЗЭ имеет максимальное быстродействие?

21. Какой класс устройств ЭЗЭ имеет максимальную «упаковку», меньшую стоимость и потребляемую мощность?

22. Чем характеризуются ЭЗЭ динамических ОЗУ?

23. В чем состоит принципиальное отличие ПЗУ от динамического ОЗУ?

24. В чем заключается особенность изготовления масочных ПЗУ?

25. В чем заключается процесс записи в прожигаемых ПЗУ?

26. Что является носителем информации в репрограммируемых ПЗУ (стираемое ППЗУ - Erasable PROM, EPROM; РПЗУ)?

27. Приведите схему и объясните работу статического элементарного ЗУ или ЗЭ (элемента) на биполярных транзисторах.

28. Приведите схему и объясните работу ЭЗЭ с динамическим ЗУ.

29. Приведите схему фрагмента масочного ПЗУ на полевых транзисторах и объясните его работу.

30. Объясните, как осуществляется процесс записи в прожигаемых ПЗУ (однократно программируемых ППЗУ).

31. Объясните устройство МДП-транзистора с «плавающим затвором» как ячейки памяти (носителя информации).

32. Приведите типовую схему ЭЗЭ РПЗУ и объясните его работу.

33. Объясните, как проходит процесс записи и стирания информации в РПЗУ с МДП – транзистором с «плавающим затвором».

## 31. Сопряжение цифровых и аналоговых устройств.

### Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП)

Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) предназначены для преобразования цифровых сигналов в аналоговые. Такое преобразование необходимо, например, при восстановлении аналогового сигнала, предварительно преобразованного в цифровой для передачи на большое расстояние или хранения (таким сигналом, в частности, может быть звук). Другой пример использования такого преобразования — получение управляющего сигнала при цифровом управлении устройствами, режим работы которых определяется непосредственно аналоговым сигналом (что, в частности, имеет место при управлении двигателями).

Как и рассматриваемые ниже аналого-цифровые преобразователи (АЦП), ЦАП являются «связующим звеном» между аналоговой и цифровой электроникой /1/.

Наиболее распространенными являются ЦАП серий микросхем 572, 594, 1108, 1118 и др. В табл. 31.1 приведены параметры некоторых ЦАП.

табл.31.1

| Тип схемы | Число разрядов | $t_{уст}, мкс$ | $U_0, В$  | $U_{пит}/I_{пит}, В/А$ | $I_{вых}, мА$ |
|-----------|----------------|----------------|-----------|------------------------|---------------|
| К594ПА1   | 12             | 3,5            | 9-11      | $(5+15)/2,5 - 15/3,5$  | 2             |
| К1108ПА1  | 12             | 0,4            | 2,2-10,5  | $+5/15 - 16/46$        | 5             |
| К572ПА1А  | 10             | 5              | -17 - +17 | $(5-17)/2$             | 1             |
| К575ПА2А  | 10             | 15             | -15 - +15 | $5/2 - 15/2$           | 0,8           |

Цифровая система с аналоговым входом и аналоговым выходом может быть представлена (рис.31.1):

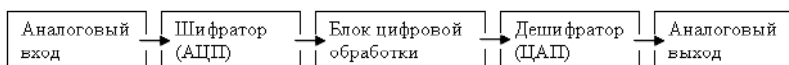


рис.31.1

В данной системе шифратор и дешифратор являются специальными устройствами – АЦП и ЦАП.

### 31.1. Цифроаналоговые преобразователи

Схемотехника цифроаналоговых преобразователей весьма разнообразна. На рис.31.2 представлена общая классификация ЦАП по способам преобразования входного кода и схе-мам формирования выходного сигнала.

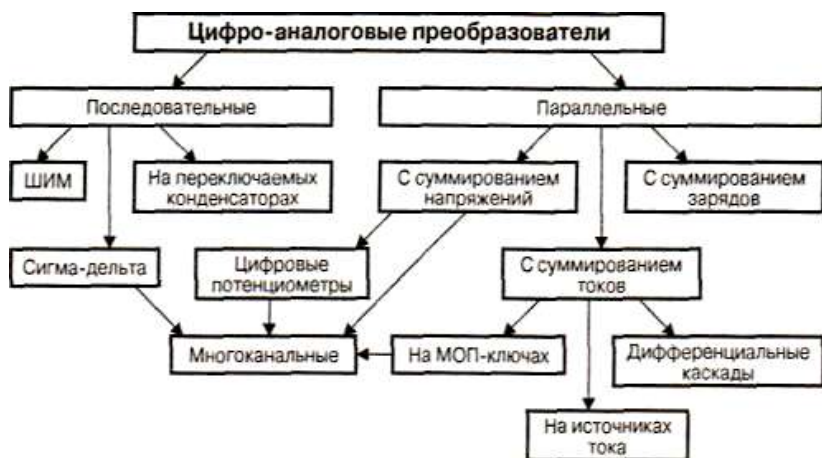


рис.31.2.

Дальнейшую классификацию ИМС цифроаналоговых преобразователей можно провести по ряду специфических признаков, например: по роду выходного сигнала: преобразовате-



ли с токовым выходом или с выходом по напряжению; по типу цифрового интерфейса: с последовательным вводом или с параллельным вводом; по числу ЦАП на кристалле: одноканальные и многоканальные; по быстродействию: низкого, среднего и высокого быстродействия; по разрядности.

Предположим, что необходимо преобразовать выходные двоичные сигналы с выхода процессора в аналоговый сигнал в диапазоне 0-3В. Для этого необходимо составить таблицу истинности для ЦАП (табл.31.2):

табл.31.2

|           | Цифровой вход |   |   |   | Аналоговый выход |
|-----------|---------------|---|---|---|------------------|
|           | D             | C | B | A | Вольты           |
| Строка 1  | 0             | 0 | 0 | 0 | 0                |
| Строка 2  | 0             | 0 | 0 | 1 | 0,2              |
| Строка 3  | 0             | 0 | 1 | 0 | 0,4              |
| Строка 4  | 0             | 0 | 1 | 1 | 0,6              |
| Строка 5  | 0             | 1 | 0 | 0 | 0,8              |
| Строка 6  | 0             | 1 | 0 | 1 | 1,0              |
| Строка 7  | 0             | 1 | 1 | 0 | 1,2              |
| Строка 8  | 0             | 1 | 1 | 1 | 1,4              |
| Строка 9  | 1             | 0 | 0 | 0 | 1,6              |
| Строка 10 | 1             | 0 | 0 | 1 | 1,8              |
| Строка 11 | 1             | 0 | 1 | 0 | 2,0              |
| Строка 12 | 1             | 0 | 1 | 1 | 2,2              |
| Строка 13 | 1             | 1 | 0 | 0 | 2,4              |
| Строка 14 | 1             | 1 | 0 | 1 | 2,6              |
| Строка 15 | 1             | 1 | 1 | 0 | 2,8              |
| Строка 16 | 1             | 1 | 1 | 1 | 3,0              |

Входные сигналы ЦАП в виде логической 1 и логического 0 представлены в двоичной форме: логическая 1 – соответствует уровню от +3 до +5В; логический 0  $\approx$  0В.

Как видно из таблицы каждый шаг по таблице «вниз» изменяет выходной уровень на 0,2В.

### 31.2. Общая структурная схема ЦАП

представлена на рис. 31.3:

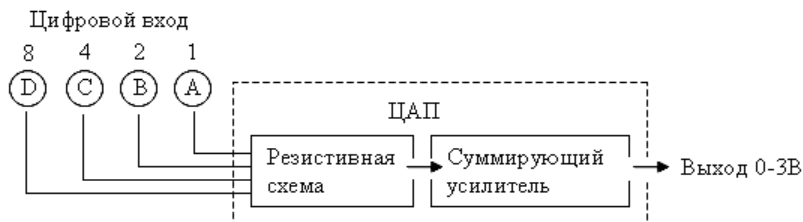


рис. 31.3

ЦАП состоит из двух блоков: группы резисторов, образующих многозвенную регистровую схему лестничного типа (резистивную матрицу), и операционного усилителя (ОУ), используемого в качестве суммирующего (масштабирующего) усилителя.

Назначения резистивной схемы – учет весовых коэффициентов для цифровых сигналов (вес 1 на входе В в 2 два раза больше веса на входе А, вес 1 на входе С в 4 раза больше веса на входе А и т.д.).

Назначение усилителя – усилить сигналы с выхода резистивной схемы до уровней, соответствующих таблице 31.2. Основная схема усилителя (рис. 31.4):

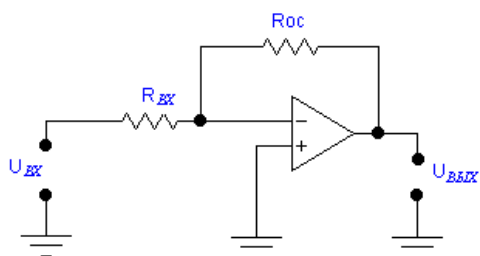


рис. 31.4

а коэффициент передачи по напряжению равен  $K_{\Pi} = \frac{R_{OC}}{R_{BX}}$ .

### 31.3. Основная схема простого ЦАП

приведена на рис. 31.5:

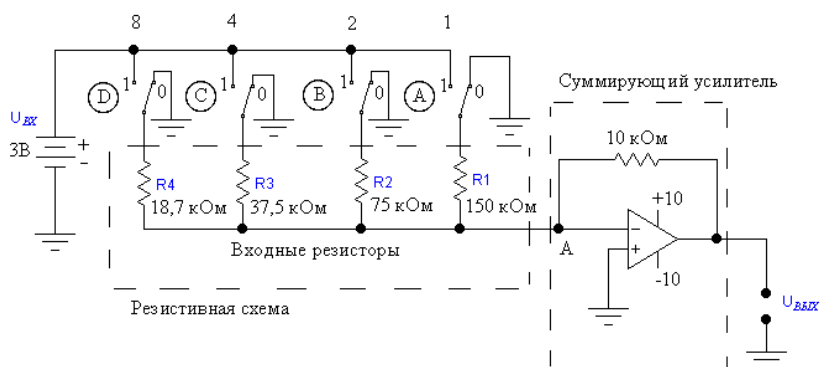


рис. 31.5

Особенность схемы – ОУ требует симметричного питания  $\pm 10В$  (двуполярного, достаточно высокого уровня).

При положении переключателей положение «0» - на выходе ОУ будет  $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ .

Эта ситуация соответствует первой строке таблицы 31.2.

При положении  $A=1$ ,  $U_{\text{ВХ}} = 3B$  приложенного к входу усилителя.

Коэффициент передачи:  $K_{\text{П}} = \frac{R_{0C}}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{10}{150} = 0,066$  и напря-

жение на выходе составит  $3 \times 0,066 = -0,2B$ , что соответствует двоичной комбинации на входе 0001 (строка 2 таблица 31.2).

Подадим комбинацию 0010 ( $B=1$ ). При этом

$K_{\text{П}} = \frac{10}{75} = 0,133$ ,  $U_{\text{ВЫХ}} = 3 \times 0,133 = -0,4B$ , что соответствует строке 3 таблицы 31.2, и т.д.

При установлении  $A=1$ ,  $B=1$ ,  $C=1$ ,  $D=1$   $R_{\text{ВХ}} = 10 \text{ кОм}$ ,  $K_{\text{П}} = 1$  и  $U_{\text{ВЫХ}} = 3B$ .

В качестве входного устройства может быть выбран 5-разрядный коммутатор – уровень  $U_{\text{ВЫХ}}$  останется прежним, изменится только «шаг» ступеньки и их количество.

#### 31.4. Цифроаналоговый преобразователь лестничного типа

Одна из возможных схем ЦАП лестничного типа приведена на рис.31.6:

Эту резистивную схему иногда называют R-2R-схемой лестничного типа. Ее преимущество - используются резисторы только двух номиналов: номиналы «горизонтальных» резисторов «лестницы» в два раза больше номиналов «вертикальных» (отсюда и название схемы).

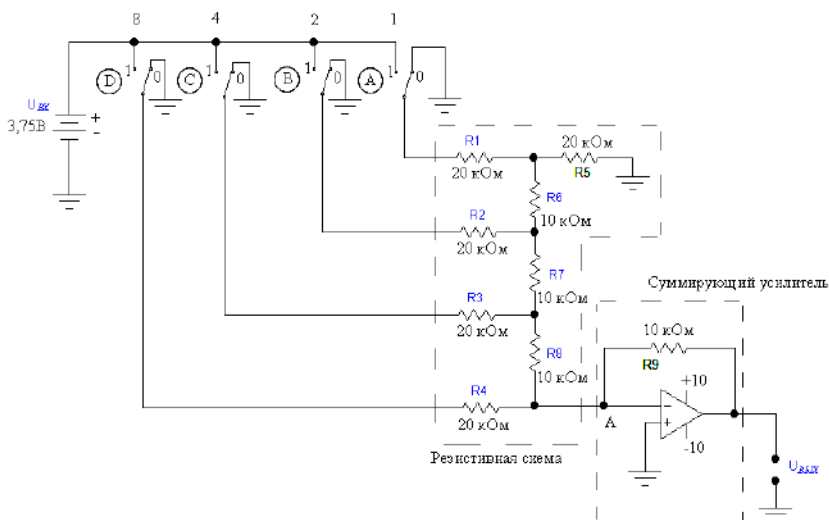


рис.31.6

Работа схемы аналогична предыдущей и ее суть отображена на таблице истинности (табл.31.3).

Входное напряжение  $3,75В$  выбрано как наиболее близкое к уровню ТТЛ–логики, т.е. входы А, В, С и D можно непосредственно присоединять к ИС любой ТТЛ-ИС. Возможно применение большего числа входов (разряды свесом 16, 32 и т.д.), однако структура входной резисторной цепи останется прежней.

Недостатком первой схемы является необходимость использования резисторов очень высокой точностью и большим диапазоном номиналов, а также невысокая точность преобразования.

табл.31.3

| Двоичный вход |   |   |   | Аналоговый выход |
|---------------|---|---|---|------------------|
| 8             | 4 | 2 | 1 | Вольты           |
| D             | C | B | A |                  |
| 0             | 0 | 0 | 0 | 0                |
| 0             | 0 | 0 | 1 | 0,25             |
| 0             | 0 | 1 | 0 | 0,5              |
| 0             | 0 | 1 | 1 | 0,75             |
| 0             | 1 | 0 | 0 | 1,0              |
| 0             | 1 | 0 | 1 | 1,25             |
| 0             | 1 | 1 | 0 | 1,5              |
| 0             | 1 | 1 | 1 | 1,75             |
| 1             | 0 | 0 | 0 | 2,0              |
| 1             | 0 | 0 | 1 | 2,25             |
| 1             | 0 | 1 | 0 | 2,5              |
| 1             | 0 | 1 | 1 | 2,75             |
| 1             | 1 | 0 | 0 | 3,0              |
| 1             | 1 | 0 | 1 | 3,25             |
| 1             | 1 | 1 | 0 | 3,5              |
| 1             | 1 | 1 | 1 | 3,75             |

## Выводы по теме

1. Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) предназначены для преобразования цифровых сигналов в аналоговые. Такое преобразование необходимо, например, при восстановлении аналогового сигнала, предварительно преобразованного в цифровой.

2. Классификацию ИМС цифроаналоговых преобразователей можно провести по ряду специфических признаков:

- по роду выходного сигнала: преобразователи с токовым выходом или с выходом по напряжению;
- по типу цифрового интерфейса: с последовательным вводом или с параллельным вводом;
- по числу ЦАП на кристалле: одноканальные и многоканальные;
- по быстродействию: низкого, среднего и высокого быстродействия;
- по разрядности.

3. Общая классификация ЦАП по способам преобразования входного кода и схемам формирования выходного сигнала может быть представлена:

- последовательные, которые различаются по способу построения (ШИМ, сигма-дельта, на переключаемых конденсаторах);
- параллельные, которые также различаются по способу построения (с суммированием напряжений, с суммированием зарядов, с суммированием токов);

ЦАП, построенные по схеме с суммированием токов, подразделяются: на МОП – ключах, на источниках тока, на дифференциальных каскадах.

## Контрольные вопросы

1. Для чего необходимы ЦАП в цифровой технике?
2. Приведите классификацию ЦАП по породу выходного сигнала.
3. Приведите классификацию ЦАП по типу цифрового интерфейса.
4. Приведите классификацию по числу ЦАП на кристалле.
5. Приведите классификацию ЦАП по быстродействию.
6. Приведите классификацию последовательных ЦАП.
7. Приведите классификацию параллельных ЦАП.
8. Приведите классификацию ЦАП по применению элементной базы.
9. Приведите структурную схему простого ЦАП; объясните работу схемы.
10. Приведите схему ЦАП лестничного типа; объясните работу схемы.
11. Для чего предназначены АЦП?
12. Что положено в основу классификации АЦП?
13. Что лежит в основе преобразования выборочных значений сигнала в цифровые эквиваленты?
14. Какие процедуры приближения цифрового эквивалента преобразуемой величине используются в АЦП?
15. Какой вид преобразования дает наилучшее быстродействие АЦП?
16. Приведите базовую структурную схему АЦП. Объясните принцип ее функционирования.
17. Приведите структурную схему АЦП с динамической компенсацией. Объясните принцип ее функционирования.
18. Приведите структурную схему интегрирующего АЦП. Объясните принцип ее функционирования.
19. Приведите структурную схему АЦП последовательного приближения
20. Какие операции предполагает в общем случае процесс работы АЦП?



## 32. Сопряжение цифровых и аналоговых устройств.

### Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) — это устройства, предназначенные для преобразования аналоговых сигналов в цифровые. Для такого преобразования необходимо осуществить квантование аналогового сигнала, т. е. мгновенные значения аналогового сигнала ограничить определенными уровнями, называемыми уровнями квантования.

В настоящее время известно большое число методов преобразования напряжение код. Эти методы существенно отличаются друг от друга потенциальной точностью, скоростью преобразования и сложностью аппаратной реализации. На рис.32.1 представлена классификация АЦП по методам преобразования.



рис. 32.1

В основу классификации АЦП положен признак, указывающий на то, как во времени разворачивается процесс преобразования аналоговой величины в цифровую. В основе преобразования выборочных значений сигнала в цифровые эквиваленты лежат операции квантования и кодирования. Они могут осуществляться с помощью либо последовательной, либо параллельной, либо последовательно-параллельной процедур приближения цифрового эквивалента к преобразуемой величине.

Наиболее распространенными являются АЦП серий микросхем 572, 1107, 1138 и др. (табл.32.1).

Из таблицы видно, что наилучшим быстродействием обладает АЦП параллельного преобразования, а наихудшим АЦП последовательного преобразования.

табл.32.1

| Тип м/схемы | Число разрядов | tnp, мкс | Uпр, В   | Pпотрм Вт мВт | Преобразование   |
|-------------|----------------|----------|----------|---------------|------------------|
| K1107ПВ1    | 6              | 0,1      | +5 -6    | 800           | Параллельное     |
| K1107ПВ2    | 8              | од       | +5 -6    | 3000          | Параллельное     |
| KP572ПВ1А   | 12             | ПО       | 5-15 -15 | 30            | Последовательное |
| K572ПВ3     | 8              | 15       | 5        | 25            | Последовательное |
| K572ПВ4     | 8              | 32       | 5        | 15            | Последовательное |
| K1108ПВ1А   | 10             | 0,9      | 9 -5,2   | 800           | Последовательное |
| K1138ПВ1А   | 10             | 30       | 5 -15    | 225           | Последовательное |

### 32.1. Базовая структурная схема аналого-цифрового преобразователя (АЦП)

АЦП специальная схема шифратора (шифратор специального типа).

Базовая структурная схема АЦП приведена на рис.32.2.

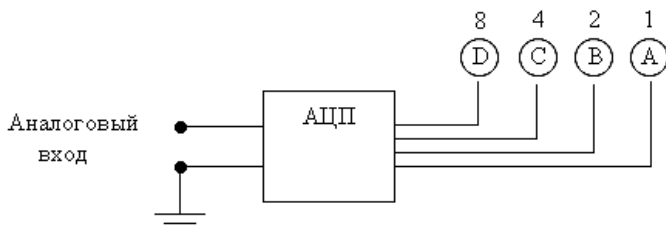


рис. 32.2

На входе действует изменяющийся аналоговый сигнал, на выходе имеем двоичные сигналы.

Таблица истинности представлена в табл.32.2:

табл.32.2

|           | Аналоговый<br>вход | Двоичный выход |   |   |   |
|-----------|--------------------|----------------|---|---|---|
|           |                    | 8              | 4 | 2 | 1 |
|           | Вольты             | D              | C | B | A |
| Строка 1  | 0                  | 0              | 0 | 0 | 0 |
| Строка 2  | 0,2                | 0              | 0 | 0 | 1 |
| Строка 3  | 0,4                | 0              | 0 | 1 | 0 |
| Строка 4  | 0,6                | 0              | 0 | 1 | 1 |
| Строка 5  | 0,8                | 0              | 1 | 0 | 0 |
| Строка 6  | 1,0                | 0              | 1 | 0 | 1 |
| Строка 7  | 1,2                | 0              | 1 | 1 | 0 |
| Строка 8  | 1,4                | 0              | 1 | 1 | 1 |
| Строка 9  | 1,6                | 1              | 0 | 0 | 0 |
| Строка 10 | 1,8                | 1              | 0 | 0 | 1 |
| Строка 11 | 2,0                | 1              | 0 | 1 | 0 |
| Строка 12 | 2,2                | 1              | 0 | 1 | 1 |
| Строка 13 | 2,4                | 1              | 1 | 0 | 0 |
| Строка 14 | 2,6                | 1              | 1 | 0 | 1 |
| Строка 15 | 2,8                | 1              | 1 | 1 | 0 |
| Строка 16 | 3,0                | 1              | 1 | 1 | 1 |

Как видно из таблицы 32.2, каждый раз увеличение входного уровня на 0,2 В приводит к увеличению на 1 на двоичном выходе. Как видно, таблица 21.5 является зеркальным отображением табл. 32.2 (ЦАП).

## 32.2. Структурная схема АЦП с динамической компенсацией

представлена на рис.32.3:

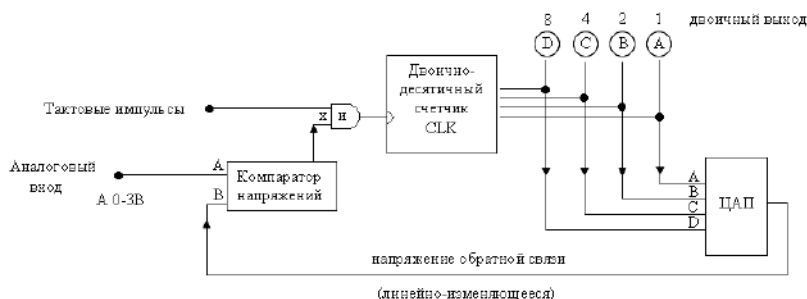


рис. 32.3

К входу АЦП приложено аналоговое напряжение.

Компаратор «проверяет» величину напряжения, поступающего от ЦАП. Если напряжение на входе А больше напряжения на входе В, разрешается прохождение тактовых импульсов на вход счетчика. Счетчик с каждым новым импульсом «добавляет» уровень на двоичном выходе. Счет продолжается до тех пор, пока напряжение обратной связи на входе В не превысит аналоговое напряжение по входу А. В этой точке компаратор останавливает счетчик. Вспомним работу компаратора (рис.32.4).

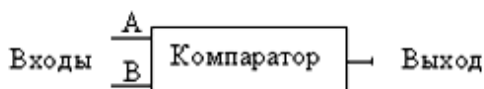


рис. 32.4

Основа компаратора – операционный усилитель. Суть его работы: если  $A > B$ , то на выходе имеется логическая 1; если  $A < B$ , то на выходе – логический 0, причем уровни 1 и 0 устанавливаются равными уровням ТТЛ-логики.

На вход В компаратора с выхода ЦАП по цепи обратной связи подается линейно-возрастающее напряжение (пилообразной формы), так как в процессе счета перед началом нового цикла счета уровень напряжения с выхода ЦАП начинается с нуля.

### 32.3. Интегрирующий АЦП

Структурная схема интегрирующего АЦП приведена на рис.32.5.



рис. 32.5

Работа АЦП может быть пояснена рис.32.6:

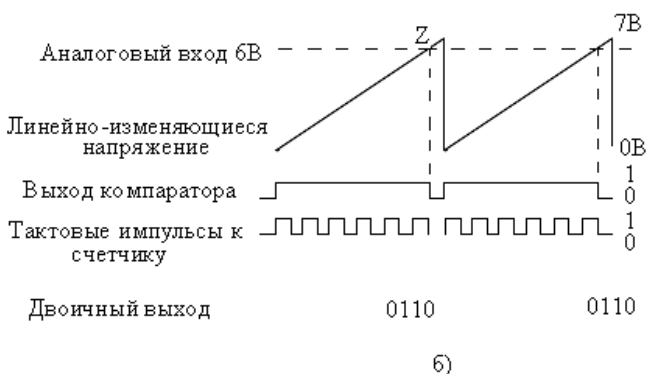


рис. 32.6

Предположим, что аналоговое напряжение на входе АЦП равно 3В (а). Линейно-изменяющееся напряжение нарастает с 0В, и пока оно не достигнет точки У, оно меньше входного, и с выхода компаратора действует логическая 1, каждая «разрешает» работу схемы И, через которую проходят тактовые импульсы (по нашему рисунку – прошло 3 тактовых импульса).

В точке У напряжение на выходе компаратора устанавливается равным логическому 0 – счетчик останавливается, так как схема И «закрылась». Счет останавливается на числе 0011 (3В).

Если на входе установлено  $U_{BX} = 6B$  (6), то линейно-возрастающее напряжение сравнивается с входным в точке Z – здесь компаратор «закроет» схему И, счет прекратится при выходном двоичном напряжении 0110 (6B).

Недостаток данной схемы – слишком велико время при преобразовании больших напряжений.

#### 32.4. АЦП последовательного приближения

Структурная схема представлена на рис.32.7.

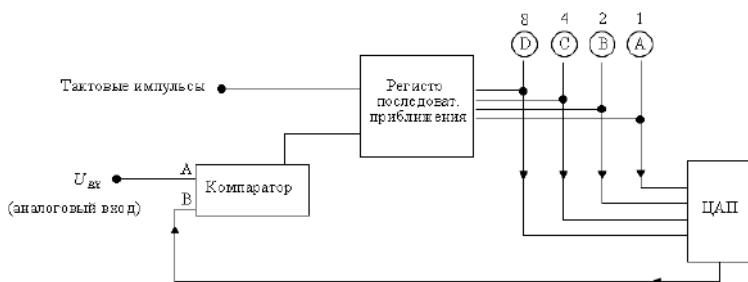


рис.32.7

Здесь имеется новый блок – регистр последовательного приближения.

Работа данной схемы поясняется рис. 32.8. Предположим, что на вход подадим  $U_{BX} = 7B$ .

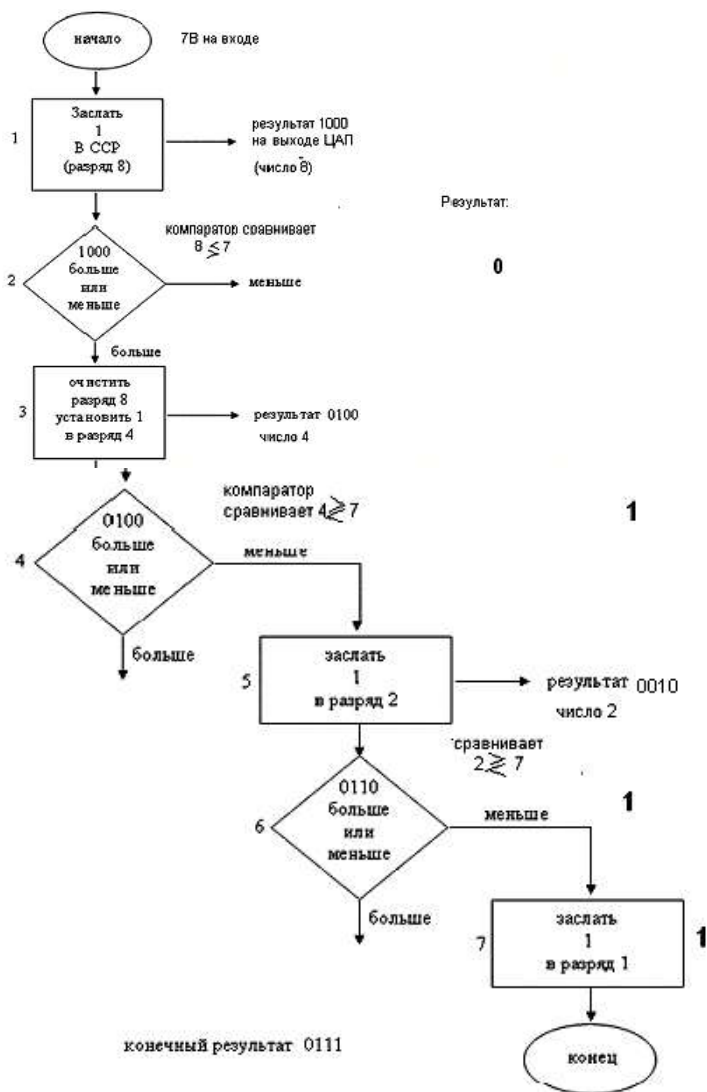


рис. 32.8



Как видно из рисунка 32.8, если на втором шаге ответ компаратора «больше», то этот разряд «очищается» (устанавливается 0 в этом разряде) и процесс «опроса» идет к следующему шагу. Если ответ «меньше», то разряд устанавливается 1, и регистр последовательного приближения засылает запрос (1) в ниже следующий разряд и т.д. до конца (0111) или ( $7_{10}$ ).

Т.о., регистр последовательного приближения выполняет операции (в прямоугольниках); на поставленные вопросы отвечает компаратор.

Преимущество данной схемы АЦП – небольшое количество опросов – процесс достаточно быстрый. Данный вид АЦП имеет широкое применение.

Имеется много других схем АЦП.

### 32.5. Характеристики АЦП и ЦАП

а) процесс работы АЦП предполагает в общем случае ряд операций:

- дискретизация сигнала по времени (определение наперед заданных дискретных моментов времени и определение в эти моменты времени значений непрерывной функции).

- квантование (округление до некоторых известных величин) полученных в дискретные моменты времени значений исходной аналоговой величины по уровню;

- кодирование – замена найденных значений (квантованных) некоторыми числовыми кодами.

Данная последовательность операций изображена на рисунке 32.9.

Пусть задана аналоговая зависимость  $U(t)$ . Для получения ее дискретного эквивалента необходимо провести выборку ее значений в дискретные моменты времени  $n \cdot T_d$ ,

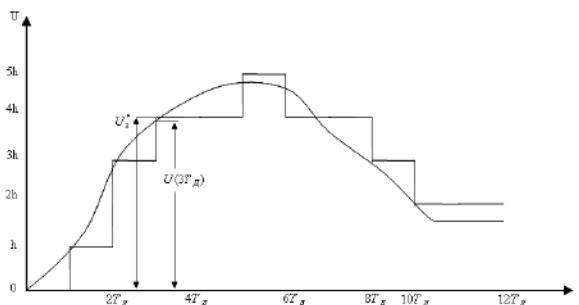


рис.32.9

где  $n=0, 1, 2, 3 \dots$  - целое число:  
 $U(n \cdot T_d) = \{U(0); U(T_d); U(2T_d); \dots\}$ . Постоянная величина  $T_d$  - называется периодом дискретизации, а сам процесс замены исходной аналоговой функции  $U(t)$  некоторой дискретной функцией  $U(n \cdot T_d)$  называется дискретизацией сигнала по времени. Необходимо отметить, что дискретная функция  $U(n \cdot T_d)$  относительно самого сигнала  $U(t)$  является по-прежнему аналоговой функцией.

Значение уровня, например,  $U(3T_d)$  (см. рис.21.15) округляется до ближайшего уровня  $U_3^*$ .

Весь динамический диапазон изменения функции  $U(t)$  от  $U_{\max}$  до  $U_{\min}$  разбивается на некоторое заданное число  $N$  уровней:

$$D = U_{\max} - U_{\min} ,$$

и величина  $h = \frac{D}{N}$  носит название шага квантования (см. рис. 32.9).

Каждому дискретному значению  $U^*(n \cdot T_d)$ , присваивается значение в двоичной форме (например, по рис.35.9: 000; 001; 011; 100; 100; 101; 100; 100; 011; 010; 010).

Процесс квантования по уровню всегда связан с внесением некоторой погрешности  $\varepsilon_i$ , которая называется шумом квантования, величина которой (погрешности) определяется числом допустимых значений функций  $U_H^*$ , т.е. разрядностью числового кода.

При увеличении разрядности шум квантования можно сделать сколь угодно малым (но принципиально не может быть равна нулю).

В соответствии с теоремой Котельникова, если период дискретизации  $T_d$  отвечает условию  $T_d \leq \frac{1}{2} f_{\max}$ , где  $f_{\max}$

- частота максимальной гармоники исходного сигнала (а исходный сигнал по рис. 21.15 может быть представлен конечной суммой гармонических сигналов, т.е. ее спектр

ограничен:  $U(t) = \sum_{i=1}^K U_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$ ), то дискретные зна-

чения полностью определяют исходную зависимость и погрешность преобразования по времени на этапе дискретизации отсутствует.

б) процесс работы ЦАП предполагает выполнение следующих операций:

- формирование в заданном диапазоне изменения выходного сигнала  $M$ , его дискретных значений  $U_M^*$ , отличающихся на некоторые значения  $\alpha$ ;

- постановка каждому сформированному уровню соответствующего двоичного кода;

- последовательное, с заданными временными интервалами  $T_1$ , присвоение выходному сигналу значений

выделенных уровней в соответствии с входной кодовой последовательностью.

Если предположить, что  $\alpha = h$  и  $T_1 = T_d$ , то результатом ЦАП полученной двоичной последовательности будет ступенчатая функция по рис. 21.15 (последовательность 000; 001; 011; 100; 100; 101; 100; 100; 011; 010; 010 с интервалом  $T_d$  и шагом квантования  $h$  в диапазоне  $0 - 5h$ ). Эта функция хоть и непрерывна по времени, дискретна по уровням, что является результатом погрешности, обусловленной шумом квантования. Сам процесс ЦАП не вносит погрешности, лишь материализует погрешности предыдущего АЦП. Т.е., погрешности возникают только при АЦП и их можно уменьшить за счет уменьшения шага квантования  $h$  и периода дискретизации  $T_d$ .

Основные характеристики АЦП и ЦАП:

- статические, определяющие точность преобразования и

- динамические, характеризующие быстродействие данного класса устройств.

К статическим характеристикам относят:

- число разрядов ( $v$ ), отображающих исходную аналоговую величину (на выходе АЦП или входе ЦАП)

- абсолютная разрешающая способность – средние значения минимального изменения сигнала, обусловленное изменением разряда кода на единицу (как правило, младшего разряда).

- напряжение смещения нуля  $U_0$  - это напряжение ( $U_{BX0}$ ), которое нужно приложить к входу АЦП, чтобы получить на выходе нулевой выходной код; для ЦАП – это напряжение, присутствующее на его выходе при подаче на вход нулевого кода.

- нелинейность – отклонение действительной характеристики преобразования от оговоренной линейной.

К динамическим характеристикам относят:

- максимальная частота преобразования ( $f_{\max}$ ) – наибольшая частота преобразования, при которой заданные параметры соответствуют установленным нормам;
- время установления выходного сигнала – интервал времени от момента заданного изменения кода на входе ЦАП до момента установления выходного аналогового сигнала.

### Выводы по теме

1. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) – это устройства, предназначенные для преобразования аналоговых сигналов в цифровые.
2. В основу классификации АЦП положен признак, указывающий на то, как во времени разворачивается процесс преобразования аналоговой величины в цифровую. В основе преобразования выборочных значений сигнала в цифровые эквиваленты лежат операции квантования и кодирования.
3. Операции квантования и кодирования могут осуществляться с помощью либо последовательной, либо параллельной, либо последовательно-параллельной процедур приближения цифрового эквивалента к преобразуемой величине.
4. Наилучшим быстродействием обладает АЦП параллельного преобразования, а наихудшим – АЦП последовательного преобразования.

### Контрольные вопросы

1. Какие операции предполагает в общем случае процесс работы ЦАП?
2. Что такое «дискретизация сигнала повремени»?
3. Что такое «шаг квантования»?
4. Что такое «шум квантования»?
5. Приведите основные характеристики АЦП и ЦАП.
6. Что относится к статическим характеристикам АЦП и ЦАП?
7. Что относится к динамическим характеристикам АЦП и ЦАП?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизация проектирования и моделирования печатных узлов радиоэлектронной аппаратуры: монография / Ю. Н. Кофанов, А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов и др. – М.: Радио и связь, 2000. – 389 с.
2. Бородулин, В. Н. Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин, А. С. Воробьев, В. М. Матюнин. – М.: Academia, 2007. – 280 с.
3. Волин, М. Л. Паразитные процессы в РЭА / М. Л. Волин. – М.: Радио и связь, 1981. – 296 с.
4. Волоконно-оптические системы передачи: учеб. для вузов / М. М. Бутусов, С. М. Верник, С. Л. Галкин и др.; ред. В. Н. Гомзин. – М.: Радио и связь, 1992. – 416 с.
5. Гелль, П. П. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры / П. П. Гелль, Н. К. Иванов-Есипович. – Л.: Энергия, 1985.
6. Глушицкий, И. В. Охлаждение бортовой аппаратуры авиационной техники / И. В. Глушицкий. – М.: Машиностроение, 1987. – 120 с.
7. Грачев, А. А. Конструирование электронной аппаратуры на основе поверхностного монтажа компонентов / А. А. Грачев, А. А. Мельник, Л. И. Панов. – М.: НТ Пресс, 2006. – 384 с.
8. Григорьян, С. Г. Конструирование электронных устройств систем автоматизации и вычислительной техники: учеб. пособие / С. Г. Григорьян. – М.: Высш. шк., 2007. – 303 с.
9. Дульнев, Г. Н. Методы расчета тепловых режимов прибора / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
10. Жаднов, В. В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств / В. В. Жаднов, А. В. Сарафанов. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 464 с. (Серия «Библиотека инженера»).
11. Каленкович, Н. И. Механические воздействия и защита радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов / Н. И. Каленкович, Е. П. Фастовец, Ю. В. Шамгин. – М.: Высш. шк., 1989. – 244 с.
12. Кечиев, Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстросействующей аппаратуры. / Л. Н. Кечиев. – М.: Группа ИДТ, 2007. – 616 с.
13. Компоновка и конструкции микροэлектронной аппаратуры / ред.: Б. Ф. Высоцкий, В. Б. Пестряков, О. А. Пятлин. – М.: Радио и связь, 1982. – 208 с.
14. Конструирование радиоэлектронных средств / В. Ф. Борисов, О. П. Лавренов, А. С. Назаров, А. Н. Чекмарев; ред. А. С. Назаров. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 380 с.
15. Конструкторское проектирование электронной аппаратуры: учеб. для вузов / К. И. Билибин, А. И. Власов, Л. В. Журавлев и др.; ред. В. А. Шахнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. – 568 с.

16. Коммутационные устройства радиоэлектронной аппаратуры / Г. Я. Рыбин, Б. Ф. Ивакин, Н. В. Вьюков и др.; ред. Г. Я. Рыбин. – М.: Радио и связь, 1985. – 240 с.

17. Кофанов, Ю. Н. Автоматизация проектирования РЭС. Топологическое проектирование печатных плат: учеб. пособие / Ю. Н. Кофанов, А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2001. – 220 с.

18. Кофанов, Ю. Н. Разработка унифицированного конструктива БНК-3 судовой навигационной аппаратуры с унифицированной системой охлаждения и виброизоляции при помощи системы «АСОНИКА» / Ю. Н. Кофанов, А. И. Манохин, А. В. Сарафанов // Системные проблемы надежности, математического моделирования и информационных технологий: материалы междунар. науч.-техн. конф. и Российской науч. шк.: в 8-ми ч. Ч. 3. – М.: НИИ «Автоэлектроника», 2000. – С. 97–98.

19. Кофанов, Ю. Н. Моделирование и обеспечение надежности технических систем / Ю. Н. Кофанов. – М.: Горячая линия, 2006, – 360 с.

20. Кочкин, В. Ф. Лакокрасочные материалы и покрытия в производстве радиоаппаратуры / В. Ф. Кочкин, А. Е. Гуревич. – Л.: Химия, 1991. – 128 с.

21. Куземин, А. Я. Конструирование и микроминиатюризация электронной вычислительной аппаратуры / А. Я. Куземин. – М.: Радио и связь, 1985. – 280 с.

22. Лярский, В. В. Электрические соединители: справ. / В. В. Лярский, О. Б. Мурадян. – М.: Радио и связь, 1988. – 272 с.

23. Медведев, А. Технология производства печатных плат / А. Медведев. – М.: Техносфера, 2005. – 360 с.

24. Ненашев, А. П. Конструирование радиоэлектронных средств: учеб. для радиотехн. спец. вузов / А. П. Ненашев. – М.: Высш. шк., 1990. – 432 с.

25. Несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры / П. И. Овсищер, Ю. В. Голованов, В. П. Ковешников и др.; ред. П. И. Овсищер. – М.: Радио и связь, 1988. – 232 с.

26. Операционный усилитель с малым входным током LMC6001 // Интегральные микросхемы. Перспективные изделия. – М.: ДОДЭКА, 1996. – Вып. 2. – С. 43.

27. Оптические кабели связи российского производства: справ. / А. С. Воронцов, О. И. Гурин, С. Х. Мифтахетдинов, К. К. Никольский, С. Э. Питерских. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 288 с.

28. Охрана труда в электроустановках: учеб. для вузов / ред. Б. А. Князевский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.

29. Парфенов, Е. М. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие для вузов / Е. М. Парфенов, Э. Н. Камышная, В. П. Усачов. – М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.

30. Пирогова, Е. В. Проектирование и технология печатных плат: учеб. / Е. В. Пирогова. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. – 560 с.

31. Портнов, Э. Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи: учеб. пособие для вузов / Э. Л. Портнов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 464 с.
32. Потапов, Ю. В. Система проектирования печатных плат Protel / Ю. В. Потапов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2003. – 704 с.
33. Потапов, Ю. В. Protel DXP / Ю. В. Потапов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2006. – 276 с.
34. Преснухин, Л. Н. Конструирование электронных вычислительных машин и систем / Л. Н. Преснухин, В. Я. Шахнов, В. Я. Кустов. – М.: Высш. шк., 1986. – 572 с.
35. Разевиг, В. Д. Система проектирования печатных плат ACCEL EDA 12.1 (P-CAD для Windows) / В. Д. Разевиг. – М.: СК Пресс, 1997. – 368 с.
36. Разевиг, В. Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (Pspice) / В. Д. Разевиг. – М.: СК Пресс, 1996. – 272 с.
37. Разработка блока цифровой обработки сигналов для авиационной РЭС при помощи системы «АСОНИКА» / А. Г. Алексеев, А. И. Манохин, А. В. Сарафанов и др. // Системные проблемы надежности, математического моделирования и информационных технологий: материалы междунар. науч.-техн. конф. и Российской науч. шк.: в 8-ми ч. Ч. 4. – М.: НИИ «Автоэлектроника», 2000. – С. 117-118.
38. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры: справ. / Э. Т. Романычева, А. К. Иванова, А. С. Куликов и др.; ред. Э. Т. Романычева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 448 с.
39. Сарафанов, А. В. Автоматизация проектирования РЭС: учеб. пособие / А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов; Краснояр. гос. техн. ун-т. – Красноярск: КГТУ, 1999. – 183 с.
40. Сарафанов, А. В. Основы проектирования электронных средств. Техническое задание и его анализ: учеб. пособие / А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов; Краснояр. гос. техн. ун-т. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – 140 с.
41. Сарафанов, А. В. Электрические, электрофизические, эксплуатационные, теплофизические, физико-механические и надежность параметры электрорадиоэлементов и материалов конструкций РЭС: учеб. пособие / А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов; Краснояр. гос. техн. ун-т. – Красноярск: КГТУ, 1998. – 176 с.
42. Справочник конструктора РЭА. Общие принципы конструирования / ред. Р. Г. Варламов. – М.: Сов. радио, 1980. – 480 с.
43. Справочник конструктора-приборостроителя. Проектирование. Основные нормы / В. Л. Соломахо, Р. И. Томилин, Б. В. Цитович, Л. Г. Юдович. – Минск.: Высш. шк., 1988. – 272 с.
44. Справочник конструктора точного приборостроения / Г. А. Веркович, Е. Н. Головенкин, В. А. Глубков и др.; ред.: К. Н. Явленский, Б. П. Тимофеев, Е. Е. Чаадаева. – Л.: Машиностроение, 1989. – 792 с.



45. Средства и технологии проектирования и производства электронных устройств. – 2000. – № 1. – 32 с.

46. Сучков, Д. И. Основы проектирования печатных плат в САПР P-CAD 4.5, P-CAD 8.5-8.7 и ACCEL EDA / Д. И. Сучков. – М.: «Горячая линия–Телеком», 2000. – 476 с.

47. Электротехнические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры: справ. / И. Д. Груев, Н. И. Матвеев, Н. Г. Сергеева. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.

48. Яцук, О. Г. Компьютерные технологии в дизайне. Эффективная реклама / О. Г. Яцук, Э. Т. Романычева. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 432 с.

49. <http://physics.nad.ru>

50. [www.ect.ru](http://www.ect.ru)

51. [www.Rodnik.ru/htmls/eda/14/1.pdf](http://www.Rodnik.ru/htmls/eda/14/1.pdf)

52. Компоненты и технологии. 2000–2007.

53. Сети и системы связи. 2002–2007.

54. Исследование тепловых характеристик РЭС методами математического моделирования: монография / В. В. Гольдин, А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов и др.; ред. А. В. Сарафанов. – М.: Радио и связь, 2003. – 456 с

1. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника: учебное пособие. 4-е изд. Ростов н/Д: изд-во «Феникс», 2004-576с.

2. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: Издательский дом «Додэка-21», 2005 – 528с.

3. В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев Электроника: учебное пособие – М.: Высш. школа 1991 – 622с.

4. Основы электроники, радиотехники и связи: учебное пособие для вузов / А.Д. Гуменюк, В.И. Журавлев, Ю.Ю. Мартюшев и др.; под ред. Г.Д. Петрухина – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 480с.

5. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств. М., Радио и связь, 320 стр., 2003г., (учебник для ВУЗ-ов).

6. Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров. Аналоговая и цифровая электроника. Учебник для Вузов. М. Р и С 2003 г.

## **Приложение**

### **КРАТКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ**

**Абонентский громкоговоритель** – бытовой радиоэлектронный аппарат, предназначенный для приема и воспроизведения трансляционных программ, передаваемых по сети проводного вещания.

**Абсолютная погрешность прибора** – значение, получаемое при вычитании истинного значения из показываемого значения. Для вспомогательной части прибора это значение, получаемое при вычитании истинного значения из маркированного (заданного) значения.

**Адаптация** – изменение чувствительности глаза в зависимости от воздействия на него раздражителей. Различают темновую и световую адаптацию.

**Адаптер видеотекста** – бытовой радиоэлектронный аппарат, предназначенный для приема и запоминания электрических сигналов справочной алфавитно-цифровой информации, поступающих по телефонному каналу связи, с последующим отображением на экране телевизионного приемника или бытового видеомонитора.

**Адаптер телетекста** – бытовой радиоэлектронный аппарат, предназначенный для приема и запоминания электрических сигналов справочной алфавитно-цифровой информации телевизионных программ, передаваемых за время обратного хода луча по кадру с последующим отображением на экране телевизионного приемника или бытового видеомонитора.

**Аддитивный процесс** – процесс получения проводящих рисунков, заключающийся в избирательном осаждении проводникового материала на нефольгированный материал основания.

**Аккомодация** – процесс фокусирования хрусталика глаза на объекте.

**Активная антенна** – антенна с встроенным усилителем принимаемых сигналов, предназначенная для приема и усиления радио- и телевизионного вещания.

**Активная (бытовая) акустическая система** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, функционально и конструктивно объединяющий громкоговоритель и усилитель мощности сигналов звуковой частоты.

**Активная виброзащита** – вибрационная защита, использующая энергию дополнительного источника.

**Акустический шум** – нерегулярное или статистически случайное звуковое колебание.

**Амплитуда гармонических колебаний (вибрации)** – максимальное значение величины, характеризующей вибрацию при гармонических колебаниях (вибрации).

**Амплитудно-частотная характеристика** – зависимость амплитуды вынужденных колебаний или вибрации системы от частоты гармонического возбуждения с постоянной амплитудой.

**Анодирование** – декоративное покрытие алюминия и его сплавов электрохимическим способом. Защитная пленка химически устойчива, обла-

дает высокими электроизоляционными свойствами, надежно защищает от коррозии, может быть окрашена.

**Антирезонансные колебания (вибрация)** – вынужденные колебания (вибрация) системы с двумя и более степенями свободы, соответствующие одному из минимумов амплитудно-частотной характеристики.

**Атмосферное давление** – абсолютное давление околоземной атмосферы.

**Атмосферные осадки** – выпадающие или конденсированные осадки.

**Атмосферные выпадающие осадки** – вода в жидком и твердом состоянии, выпадающая из облаков.

**Атмосферные конденсированные осадки** – вода в жидком и твердом состоянии, образующаяся на земной поверхности и на предметах, находящихся вблизи от нее, в результате конденсации водяного пара, находящегося в воздухе.

**Аэродинамический удар** – механическое воздействие ударной волны, образующейся при движении летательного аппарата в атмосфере в момент достижения им сверхзвуковой скорости.

**Базовый конструкторский документ** – конструкторский документ, содержащий постоянные данные исполнений двух и более печатных плат.

**Базовый способ выполнения конструкторских документов** – способ выполнения комплекта конструкторских документов на печатные платы, при котором постоянные данные всех исполнений печатной платы содержатся в одном базовом конструкторском документе.

**Бактерия** – микроорганизм, обладающий клеточной оболочкой, но не имеющий клеточного ядра, размножающийся простым делением и способствующий разрушению изделий.

**Биологический внешний воздействующий фактор** – организмы или их сообщества, оказывающие внешние воздействия и вызывающие нарушение исправного и работоспособного состояния изделия.

**Блок** – устройство, обладающее меньшими функциональными возможностями по сравнению с прибором и комплексом; может входить в состав комплекса и прибора; функционально и конструктивно закончен, но самостоятельно не эксплуатируется.

**(Бытовая) акустическая система** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для воспроизведения электрических сигналов звуковой частоты.

**(Бытовой) видеомонитор** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат без высокочастотного тракта, предназначенный для воспроизведения видеoinформации на телевизионном экране со звуковым сопровождением.

**(Бытовой) видеопроигрыватель** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для воспроизведения сигналов видеодиска через телевизионный приемник или (бытовой) видеомонитор.

**(Бытовой) радиоэлектронный аппарат** – радиоэлектронное устройство, применяемое (в быту) для выполнения одной или нескольких функций: приема, обработки, синтеза, записи, усиления и воспроизведения радиовеща-

тельных и телевизионных программ, программ проводного вещания, фонограмм, видеogramм, а также специальных сигналов.

**(Бытовая) радиоэлектронная аппаратура** – совокупность (бытовых) радиоэлектронных аппаратов.

**(Бытовой) предварительный усилитель сигналов звуковой частоты** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для усиления электрических сигналов звуковой частоты до уровня линейного выхода.

**(Бытовой) усилитель мощности сигналов звуковой частоты** – бытовой радиоэлектронный аппарат, предназначенный для усиления мощности электрических сигналов звуковой частоты.

**(Бытовой) электропроигрыватель** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для преобразования сигналов грампластины в электрические сигналы звуковой частоты.

**Бытовой электрофон** – бытовой радиоэлектронный аппарат, конструктивно объединяющий электропроигрыватель, полный усилитель сигналов звуковой частоты и бытовую акустическую систему.

**Блочный бытовой радиоэлектронный аппарат** – бытовой радиоэлектронный аппарат, выполненный в отдельных корпусах и едином художественно-конструкторском исполнении.

**Ветер** – поток воздуха, движущийся со скоростью свыше 0,6 м/с.

**Вибрационная устойчивость (виброустойчивость)** – свойство изделия при заданной вибрации выполнять заданные функции и сохранять в пределах норм значения параметров.

**Вибрационная прочность (вибропрочность)** – прочность при и после заданной вибрации.

**Вибрация** – движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин.

**Виброизоляция** – метод вибрационной защиты посредством устройств, помещаемых между источником возбуждения и защищаемым объектом.

**Виброизолятор** – устройство, осуществляющее виброизоляцию.

**Виброудар** – ударный импульс с высокочастотным вибрационным заполнением.

**Виброускорение** – производная виброскорости по времени.

**Видеообучающее устройство** – радиоэлектронный аппарат, предназначенный для формирования учебной и/или обучающей информации на экране через телевизионный приемник или видеомонитор.

**Внешний воздействующий фактор** – явление, процесс или среда, внешние по отношению к изделию или его составным частям, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособного состояния изделия в процессе эксплуатации.

**Гармонические колебания** – колебания (вибрация), при которых каждое значение колеблющейся величины (характеризующей вибрацию) изменяется во времени по закону  $A = \sin(\omega t + \varphi)$ , где  $A$  – амплитуда;  $t$  – время;  $\omega$  – угловая частота;  $\varphi$  – начальная фаза.

**Гибка** – процесс постепенного изменения формы сечения плоской заготовки до требуемого профиля.

**Гибкая печатная плата** – печатная плата, имеющая гибкое основание.

**Гидравлический удар** – резкое повышение или понижение давления движущейся жидкости при внезапном уменьшении или увеличении скорости потока.

**Давление** – способ обработки материалов, основанной на их способности пластически деформироваться в результате воздействия на деформируемое тело (заготовку) внешних сил.

**Двусторонняя плата** – плата с печатными проводниками и элементами, расположенными с обеих сторон изоляционного основания.

**Двойная изоляция** – изоляция, включающая как основную, так и дополнительную изоляцию.

**Дежурный режим** – условия эксплуатации, при которых основные функции, такие как звук и/или изображение, выключены и аппаратура находится в работе только частично. В этих условиях постоянные функции, такие как часы, остаются и позволяют включить аппаратуру в работу полностью, например, автоматически или при помощи дистанционного управления.

**Действительная мощность** – максимальная мощность, которая может быть получена от питающей цепи при сопротивлении нагрузки, выбранном по максимальному значению мощности за время более 2 мин при отключенной цепи, получающей электропитание.

**Декадная полоса частот** – полоса частот, у которой отношение верхней граничной частоты к нижней равно 10.

**Демпфер** – виброзащитное устройство или его часть, создающие демпфирование вибрации.

**Демпфирование вибрации** – уменьшение вибрации вследствие рассеяния механической энергии.

**Деталь** – изделие, выполненное обычно из однородного по марке и наименованию материала без применения сборочных операций.

**Детерминированные колебания (вибрация)** – колебания (вибрация), представляющие собой детерминированный процесс.

**Диапазон измерений (эффективный диапазон)** – диапазон, определенный двумя значениями измеряемой величины, внутри которого установлены пределы погрешности измерительного прибора (и/или вспомогательной части).

**Динамическая(ий) пыль (песок)** – аэрозоль с твердой дисперсной фазой – пылью (песком), находящийся в динамическом состоянии.

**Динамическое давление** – механическое давление, интенсивность, точка приложения и направление которого изменяются во времени настолько быстро, что силы инерции учитываются.

**Дисплей (видеомодуль, видеомонитор, видеодисплейный терминал)** – выходное электронное устройство, предназначенное для визуального

отображения информации, используемой человеком при индивидуальном взаимодействии с техническими средствами системы.

**Диссипативная(ый) сила (момент)** – сила (момент), возникающая при движении механической системы и вызывающая рассеяние механической энергии.

**Дистанционное управление** – управление аппаратом на расстоянии, например, механическим, электрическим, акустическим способами или с помощью излучения.

**Дифферент** – наклон изделия, при котором его вертикальная ось отклонена в продольной плоскости симметрии от вертикали к земной поверхности.

**Диффузия** – молекулярный перенос вещества в среде, вызванный разностью концентраций (концентрационная диффузия), температур (термодиффузия) или давлений (бародиффузия).

**Длина шкалы** – длина линии дуги или прямой, проходящей через середины всех самых коротких отметок шкалы, расположенных между первой и последней отметками шкалы; выражается в единицах длины.

**Дополнительная изоляция** – независимая изоляция, дополняющая основную изоляцию и служащая для защиты от поражения электрическим током в случае пробоя основной изоляции.

**Доступная часть** – часть ЭС, которой можно коснуться при помощи испытательного пальца, соответствующего МЭК 61032. Любая доступная область непроводящей части рассматривается как область, покрытая токопроводящим слоем.

**Зазор** – кратчайшее расстояние между двумя токопроводящими частями в воздухе.

**Защитная блокировка** – средства, которые либо предотвращают доступ к опасной зоне, пока опасность существует, либо автоматически устраняют опасные условия при осуществлении доступа.

**Защитное разделение** – разделение между цепями посредством основной и дополнительной защиты (основная изоляция плюс дополнительная изоляция или плюс защитное экранирование) или равноценное обеспечение защиты, например посредством усиленной изоляции.

**Защитное экранирование** – отделение от опасных для жизни частей посредством проводящих экранов, соединенных с клеммой защитного заземления.

**Звуковая волна** – процесс распространения деформаций сжатия или разрежения в сплошной среде, происходящий с конечной скоростью (скоростью звука).

**Звуковой процессор** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для создания звуковых эффектов и повышения объемности и выразительности звучания.

**Звуковой удар** – акустический эффект воздействия на окружающую среду ударных волн, образующихся при сверхзвуковом движении летательных аппаратов.

**Звуковое поле** – область среды, в которой возбуждены звуковые волны.

**Земля** – общий провод, линия нулевого потенциала, по которому протекают возвратные токи сигнальных линий и линий электропитания.

**Знак безопасности** – цветографическое изображение определенной геометрической формы с использованием сигнальных и контрастных цветов, графических символов и/или поясняющих надписей, предназначенное для предупреждения людей о непосредственной или возможной опасности, запрещения, предписания или разрешения определенных действий, а также для информации о расположении объектов и средств, использование которых исключает или снижает воздействие опасных и/или вредных факторов.

**Знак качества** – сертификационный знак (как правило, единый), удостоверяющий, что данная продукция прошла аттестацию качества по требованиям национальных или межнациональных стандартов.

**Изотермическая поверхность** – геометрическое место точек, имеющих одинаковую температуру.

**Индустриальные помехи** – электромагнитные помехи, создаваемые устройствами, не предназначенными для излучения электромагнитной энергии (источники электрической энергии, системы зажигания двигателей, электродвигатели, аппаратура промышленного и широкого потребления и т. д.).

**Интегральное солнечное излучение** – электромагнитное излучение, равное селективно фильтрованному спектру частот.

**Интервал измерений** – алгебраическая разность между верхним и нижним пределами диапазона измерений; выражается в единицах измеряемой величины.

**Исполнение печатной платы** – конструкция одной из печатных плат, информация о которой содержится в одном базовом конструкторском документе.

**Источник питания** – аппарат, получающий энергию от сети и питающий один или несколько других аппаратов.

**Источник питания общего назначения** – источник питания, который может быть использован без специальных мер не только для питания аппаратуры, относящейся к области применения настоящего стандарта, но и к другим устройствам или аппаратам.

**Кассивер** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, конструктивно объединяющий тюнер и лентопротяжный механизм.

**Кассета** – функционально и конструктивно законченная сборочная единица, состоящая из ограниченного количества субблоков, расположенных в одной или нескольких плоскостях, заключенных в рамочную конструкцию, на задней панели которой имеется разъем врубного типа.

**Качка** – колебание изделия, при котором его вертикальная ось отклоняется от вертикали к земной поверхности.

**Квалифицированное лицо** – лицо с соответствующим образованием и опытом работы, которые дают ему (ей) возможность избежать опасностей и предотвратить риск, который может создать электрический ток.

**Класс I** – конструкция аппарата, в которой защита от поражения электрическим током осуществляется не только посредством основной изоляции,

но и дополнительными мерами безопасности, предусматривающими подключение доступных токопроводящих частей к защитному (заземляющему) проводу в фиксированной проводке аппарата таким образом, чтобы доступные токопроводящие части не могли стать опасными для жизни в случае повреждения основной изоляции.

**Класс II** – конструкция аппарата, в которой защита от поражения электрическим током осуществляется не только посредством основной изоляции, но и дополнительными мерами безопасности, такими как двойная или усиленная изоляция. Эти меры не предусматривают подключение защитного заземления или выполнение специальных условий монтажа.

**Класс точности** – обобщенная характеристика, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средства измерения, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений.

**Клеймение** – нанесение на изделие знаков, удостоверяющих его качество.

**Клеймо** – знак, удостоверяющий качество изделия.

**Клемма защитного заземления** – клемма, с которой соединены части аппаратуры, которые должны быть заземлены в целях безопасности.

**Ковка** – процесс изготовления детали, заключающийся в изменении формы и размеров заготовки путем последовательного воздействия универсальным инструментом на отдельные участки заготовки.

**Компаунд** – композиция на основе органических (смола, битумов, масел) или неорганических (алюмофосфатов, металлометафосфатов) веществ.

**Комплекс** – конструктивно и функционально законченная единица, состоящая из отдельных устройств, не соединенных на предприятии-изготовителе в единое целое.

**Комплект** – два или более изделия, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями и предназначенные для вспомогательных целей.

**Конвекция** – перемещение макроскопических частей среды (жидкости или газа), приводящее к переносу массы, теплоты и других физических величин.

**Конвективный массообмен** – перенос вещества, вызванный совместным действием конвективного переноса вещества и молекулярной диффузии.

**Конвергенция глаз** – физиологический акт сведения зрительных осей глаз в одну точку при совместном действии глазных мышц и хрусталика.

**Конструкция** – сложный объект, состоящий из деталей, которые должны быть взаимосвязаны, для выполнения полезных целей.

**Контактная площадка** – токопроводящий участок, предназначенный для присоединения объемных проводников или выводов навесных элементов; при наличии монтажных отверстий это площадка, окружающая отверстия или примыкающая к ним, при отсутствии отверстий – площадка на конце проводника.



**Контактный переход** – токопроводящий участок, обеспечивающий электрический контакт между проводниками, находящимися в разных слоях многослойной платы.

**Контактное отверстие** – отверстие в двусторонней плате, предназначенное для осуществления электрического соединения проводников, расположенных с двух сторон изоляционного основания или в разных слоях многослойной платы, нанесением металлического покрытия на стенки отверстия или установки пустотелой заклепки (пистона).

**Концевой контакт** – контакт на краю платы, предназначенный для штекерного соединения с ответной частью соединителя (разъема).

**Координатная сетка** – сетка, определяющая положение контактных и монтажных отверстий, а также печатных проводников и других элементов на изображении платы в прямоугольной или полярной системе координат.

**Коррозионно-активный агент морской воды (почвенно-грунтовой среды)** – вещество, находящееся в морской воде (в почве и грунте) и приводящее к ускорению процессов разрушения изделия за счет коррозии.

**Коррозионно-активный агент окружающей среды** – вещество, находящееся в атмосфере и приводящее к ускорению процессов разрушения изделия за счет коррозии.

**Коэффициент жесткости** – взятая с противоположным знаком производная характеристики восстанавливающей силы или момента.

**Коэффициент податливости** – величина, обратная коэффициенту жесткости.

**Коэффициент эффективности вибрационной защиты** – отношение пикового или среднего квадратического значения виброперемещения (виброскорость, виброускорение защищаемого объекта или воздействующей на него силы) до введения виброзащиты к значению той же величины после введения виброзащиты.

**Крен** – положение изделия, при котором его вертикальная ось отклонена в поперечной плоскости симметрии от вертикали к земной поверхности.

**Крепежное отверстие** – отверстие, предназначенное для крепления платы в блоке или элементов на плате.

**Крепление типа Z** – такой способ крепления шнура питания, при котором он не может быть заменен без разрушения или повреждения прибора.

**Лазерное излучение** – электромагнитное хроматическое излучение видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазона, основанное на вынужденной эмиссии излучения атомов и молекул.

**Лазерный электропроигрыватель** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для преобразования сигналов компакт-диска в электрические сигналы звуковой частоты.

**Линейные ускорения** – вид механических воздействий, характерных для всех объектов, движущихся с переменной скоростью (например, при разгоне или торможении).

**Магнитоэлектрофон** – бытовой радиоэлектронный аппарат, конструктивно объединяющий магнитофон-приставку, электропроигрыватель и полный усилитель.

**Магнитофон-проигрыватель** – (бытовой) магнитофон, предназначенный для записи и воспроизведения сигналов звуковой частоты.

**Марка производственная** – обозначение предприятия-изготовителя на изделии или упаковке; содержит: полное или сокращенное наименование предприятия, его местонахождение, наименование головной организации, сорт продукции и нормативно-технический документ (ГОСТ, РСТ, ТУ).

**Маркирование** – нанесение на изделие знаков, характеризующих это изделие.

**Маркировка печатной платы** – совокупность знаков и символов на печатной плате.

**Материал на древесной основе** – материал, в котором основной составляющей частью является механически обработанное натуральное дерево в смеси со связующим веществом.

**Материал основания печатной платы** – материал, на котором выполняется рисунок печатной платы.

**Межслойное соединение** – участок проводникового материала, входящий в рисунок печатной платы, предназначенный для электрического соединения проводящих рисунков на разных слоях или сторонах печатной платы.

**Металлизированное отверстие печатной платы** – отверстие в печатной плате с осажденным на стенках проводниковым материалом.

**Механическое воздействие** – передаваемое на конструкцию аппаратуры и ее элементы некоторое количество механической энергии определенного спектрального состава за счет действия на конструкцию внешних или внутренних сил, приводящее к изменению исходного состояния конструкции.

**Механическое давление** – давление, характеризующееся интенсивностью нормальных сил, с которой одно тело или среда действует на поверхность другого тела или среды.

**Механическое крепление электрорадиоэлемента** – крепление соответствующим способом выводов (обжатием или в отверстие контакта детали и др.) или корпуса электрорадиоэлемента (скобками, хомутами, мастикой и др.) к несущей конструкции, отвечающее требованиям электромонтажа.

**Механический удар** – кратковременное механическое воздействие твердых тел при их столкновении между собой и сопутствующие этому процессу явления.

**Миниатюрный (бытовой) радиоэлектронный аппарат** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат с автономным или универсальным электропитанием, предназначенный для эксплуатации в процессе ношения с уменьшенными относительно носимых аппаратов массой и габаритами.

**Многовыводные электрорадиоэлементы** – электрорадиоэлементы с числом выводов больше четырех.

**Многослойная плата** – плата, выполненная в виде изоляционного основания (подложки), на которое нанесена система печатных проводников или проводников и элементов, расположенных в несколько слоев и разделенных промежуточными изоляционными пленками.

**Многослойная сборная плата** – плата, получаемая неразъемным соединением (например, склеиванием) нескольких обычных плат, обеспечивающим непосредственный электрический контакт между проводниками всех отдельных плат.

**Монофонический (бытовой) радиоэлектронный аппарат** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат с монофоническим трактом сигнала.

**Монтаж накруткой** – механическое постоянное соединение металлического штыревого вывода с острыми гранями с накрученными оголенными проводниками.

**Монтажное отверстие** – отверстие, используемое для соединения выводов навесных элементов с печатной платой, а также для любого электрического подсоединения к проводящему рисунку.

**Морской туман** – конденсационные аэрозоли с жидкой дисперсной фазой морской воды, характеризующейся сложившимся постоянством солевого состава, в котором массовая доля ионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  составляет 99,99 %.

**Навесные элементы** – электро- и радиоэлементы, закрепленные на печатной плате пайкой или сваркой, создающей электрический контакт с печатными проводниками.

**Напряжение без пульсаций** – напряжение постоянного тока, среднеквадратическое значение пульсаций которого составляет не более 10 % значения постоянной составляющей напряжения. Максимальное пиковое значение напряжения не превышает 140 В для систем постоянного тока без пульсаций номинальным напряжением 120 В и 70 В – для систем постоянного тока без пульсаций номинальным напряжением 60 В.

**Начальная фаза гармонических колебаний (вибрации)** – фаза гармонических колебаний (вибрации) в начальный момент времени.

**Неискаженная выходная мощность** – мощность сигнала синусоидальной формы, рассеиваемая на номинальном полном сопротивлении нагрузки и измеренная на частоте 1000 Гц в начале ограничения одного либо обоих пиков сигнала.

**Непроводящий рисунок** – рисунок на печатной плате, образованный диэлектрическим материалом.

**Номинальное напряжение питания** – напряжение питания или диапазон напряжений (в случае питания от трехфазной сети – напряжение между фазами), на которые аппарат рассчитан производителем.

**Номинальное полное сопротивление нагрузки** – указанное изготовителем сопротивление, к которому должна быть подключена выходная схема.

**Номинальный ток потребления** – ток потребления аппарата, работающего при номинальном напряжении питания в нормальных условиях эксплуатации.

**Носимый (бытовой) радиоэлектронный аппарат** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат с автономным или универсальным электропитанием, с уменьшенными относительно стационарных аппаратов массой и габаритами, предназначенный для эксплуатации в процессе ношения.

**Обученное лицо** – лицо, соответственно осведомленное или проинструктированное квалифицированными лицами, что дает ему (ей) возможность избежать опасностей и предотвратить риск, который может создать электрический ток.

**Объединенная печатная плата** – печатная плата, предназначенная для электрического соединения двух или более печатных узлов.

**Однокорпусной (бытовой) радиоэлектронный аппарат** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, конструктивно выполненный как единое целое.

**Односторонняя печатная плата** – печатная плата, имеющая одно основание, на одной стороне которого выполнен проводящий рисунок.

**Оксидирование** – получение окисной пленки на стали, алюминии и его сплавах. Такое покрытие имеет хороший внешний вид, антикоррозионные свойства, но непрочное и микропористое. Последнее свойство покрытия позволяет его использовать как грунт под окраску.

**Октавная полоса частот** – полоса частот, у которой отношение верхней граничной частоты к нижней равно 2.

**Опасные для жизни** – условия с такими электрическими параметрами объекта, при которых может возникнуть опасный ток от прикосновения.

**Основание печатной платы** – элемент конструкции печатной платы, на поверхности или в объеме которого выполняется проводящий рисунок.

**Основная изоляция** – изоляция опасных для жизни частей, обеспечивающая основную защиту от поражения электрическим током.

**Относительная толщина печатной платы** – отношение минимального диаметра металлизированного отверстия к толщине платы. Толщина платы определяется толщиной материала основания с учетом толщины фольги.

**Острота зрения (разрешающая способность)** – свойство глаза обнаруживать малые объекты и различать тонкие детали.

**Пассивная виброзащита** – вибрационная защита, не использующая энергию дополнительного источника.

**Передвижной аппарат** – аппарат, специально сконструированный для частых перемещений с одного места на другое.

**Перемычка печатной платы** – отрезок проводникового материала, не входящий в рисунок печатной платы и обеспечивающий электрическое соединение между точками проводящего рисунка на одной стороне печатной платы.

**Переносной (бытовой) радиоэлектронный аппарат** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат с сетевым или универсальным электропитанием,

конструкция которого предусматривает элементы для переноса вручную и имеет уменьшенную относительно стационарных аппаратов массу.

**Период колебаний (вибрации)** – наименьший интервал времени, через который при периодических колебаниях (вибрации) повторяется каждое значение колеблющейся величины (характеризующей вибрацию).

**Периодические колебания** – колебания (вибрация), при которых каждое значение колеблющейся величины (характеризующей вибрацию) повторяется через равные промежутки времени.

**Периодическое испытание** – испытание, которому подвергается каждый образец во время или после изготовления с целью подтверждения его соответствия определенным критериям.

**Печатная плата, печатный ротор, кабель** – изоляционное основание с нанесенными на его поверхность плоскими печатными проводниками, монтажом или печатной схемой.

**Печатная полосковая линия** – изоляционное основание с нанесенной на его поверхность системой плоских печатных металлических проводников различной конфигурации, выполняющих роль высокочастотных передающих трактов и обеспечивающих определенные электрические параметры.

**Печатная схема** – система печатных проводников и печатных электро- и радиоэлементов, нанесенных на общее изоляционное основание.

**Печатный контакт** – участок проводящего рисунка, служащий в качестве одной части контактной системы.

**Печатный монтаж** – система печатных проводников, обеспечивающих электрическое соединение элементов схемы или экранирование.

**Печатный проводник** – участок токопроводящего покрытия (слоя), нанесенного на изоляционное основание.

**Печатный узел** – печатная плата с подсоединенными к ней электрическими и механическими элементами и/или другими печатными платами и со всеми выполненными процессами обработки.

**Печатный элемент** – сопротивление, емкость, индуктивность, разъем, концевой контакт и другие элементы, получаемые нанесением на изоляционное основание слоя металла или диэлектрика.

**Пластичность** – способность материала получать остаточное изменение формы и размера без разрушения.

**Пленочная микросхема** – многослойная плата в миниатюрном или в микроминиатюрном исполнении.

**Плесневый гриб** – микроорганизм, развивающийся на металлах, оптических стеклах и других материалах в виде бархатистого налета, выделяющий органические кислоты, способствующие разрушению изделий.

**Подтравливание печатного проводника** – канавка или выемка у одного края проводника, вызванная процессом травления.

**Поле зрения** – характеристика зрения, определяющая углы обзора в вертикальной и горизонтальной плоскостях при неподвижном положении головы.

**Полный усилитель сигналов звуковой частоты** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, конструктивно объединяющий предварительный уси-

литель сигналов звуковой частоты и усилитель мощности сигналов звуковой частоты.

**Полоса частот** – совокупность частот в рассматриваемых пределах.

**Пользователь** – любое лицо, не являющееся квалифицированным или обученным лицом, которое может соприкасаться с аппаратурой.

**Портативный аппарат** – специальный аппарат массой не более 18 кг, сконструированный для свободной переноски вручную.

**Постоянно подключенная аппаратура** – аппаратура, предназначенная для подключения к сети посредством соединения, которое не может быть разъединено вручную.

**Потенциальный источник воспламенения** – возможная неисправность, такая как плохой контакт или обрыв электрического соединения, включающего токопроводящий рисунок на печатной плате, которая может стать причиной возникновения огня, если в нормальных условиях напряжение разомкнутой цепи превышает 50 В постоянного тока или 50 В амплитудного значения переменного тока, а произведение данного напряжения на измеренный ток, который будет протекать через цепь с возможной неисправностью, превышает  $15 \text{ В} \cdot \text{А}$ .

**Преобразователь входных сигналов** – устройство, предназначенное для преобразования энергии неэлектрического сигнала в электрическую энергию.

**Преобразователь выходных сигналов** – устройство, предназначенное для преобразования энергии электрического сигнала в энергию другого вида.

**Прессование** – процесс изготовления детали, заключающийся в продавливании заготовки, находящейся в замкнутой форме, через отверстие матрицы.

**Прибор** – функционально и конструктивно законченная единица, выполняет определенную задачу, автономно эксплуатируется и, в отличие от комплекса, собирается на заводе-изготовителе.

**Припой** – металл или сплав, предназначенный для соединения деталей пайкой. Температура плавления припоев должна быть ниже температуры плавления материалов паяемых деталей.

**Проводящая фольга** – листовый проводниковый материал, предназначенный для образования проводящего рисунка печатной платы.

**Проводящий рисунок** – рисунок печатной платы, образованный проводниковым материалом.

**Проводящий слой печатной платы** – проводящий рисунок, лежащий в одной плоскости.

**Противопожарный кожух** – часть аппарата, предназначенная для того, чтобы свести к минимуму риск распространения огня или пламени.

**Прочность** – способность изделия сопротивляться деформации или разрушению под действием статических или динамических нагрузок.

**Прочность изделия к внешним воздействующим факторам** – свойство изделия сохранять работоспособное состояние после воздействия на не-

го определенного внешнего воздействующего фактора в пределах заданных значений.

**Путь утечки** – кратчайшее расстояние между двумя токопроводящими частями, измеренное по внешней поверхности изоляционного материала.

**Пыль** – смесь твердых частиц малой массы, находящаяся в воздухе во взвешенном состоянии или медленно оседающая на поверхность предметов. Различают пыль естественную, образованную на поверхности Земли под влиянием Солнца, вулканов и т. д., и техническую, которая является следствием износа оборудования, обработки материалов, сжигания топлива и пр.

**Рабочее напряжение** – наибольшее напряжение, без учета неповторяющихся переходных процессов, которому подвергается или может быть подвергнута рассматриваемая изоляция во время работы аппарата при номинальном напряжении питания в нормальных условиях эксплуатации.

**Рабочее тело** – газообразное или жидкое вещество, с помощью которого осуществляется преобразование какой-либо энергии при получении холода, тепла или механической работы.

**Равномерное поле** – поле температур, в котором температуры всех точек некоторого объема равны между собой в любой момент времени.

**Радиационное разогревание** – повышение температуры конструктивных элементов изделий, облучаемых ионизирующим излучением, в результате превращения поглощенной материалами этих изделий энергии излучения в тепловую энергию.

**Радиовещательный приемник** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для приема и воспроизведения радиовещательных программ.

**Разделительный трансформатор** – трансформатор, у которого входные обмотки отделены от выходных обмоток, по крайней мере, с помощью основной изоляции.

**Реактопласты** – пластические массы, которые при нагревании и сжатии вначале размягчаются и частично плавятся, а затем переходят в неплавкое и нерастворимое соединение.

**Резание** – процесс срезания режущим инструментом с поверхности заготовки слоя материала в виде стружки для получения необходимой геометрической формы, точности размеров, взаиморасположения и шероховатости поверхностей детали.

**Резонансные колебания (вибрация)** – вынужденные колебания (вибрация) системы, соответствующие одному из максимумов амплитудно-частотной характеристики.

**Резонансная частота колебательной системы** – частота, при которой осуществляется резонанс.

**Разъемный (бытовой) радиоэлектронный аппарат** – однокорпусный (бытовой) радиоэлектронный аппарат, конструкция которого предусматривает возможность разъединения его на отдельные функционально и конструктивно законченные части.

**Расстояние между проводниками** – расстояние между краями соседних проводников на одном слое печатной платы.

**Резист** – покрытие диэлектрическое или металлическое, используемое в качестве защиты при выполнении последующих операций.

**Резистивная маска для облуживания** – теплостойкое покрытие, наносимое избирательно для защиты отдельных участков печатной платы в процессе облуживания.

**Рисунок печатной платы** – конфигурация проводниковых и/или диэлектрических материалов на печатной плате.

**Сборочная единица** – изделие, состоящее из двух или более частей с обязательным применением сборочных операций, позволяющих объединить составные элементы в единое целое.

**Сборочные узлы** – конструктивно законченные изделия, изготовленные с выполнением сборочных операций.

**Свободное место печатной платы** – участок печатной платы, где элементы проводящего рисунка и расстояния между ними могут быть выполнены номинальной величины.

**Сейсмический удар** – сейсмическое воздействие, вызванное искусственными взрывами.

**Сейсмическое воздействие** – подземные удары и колебания поверхности, вызванные естественными и искусственными причинами.

**Сеткография** – процесс переноса изображения на основание печатной платы путем продавливания краски через сетчатый трафарет с помощью ракеля.

**Сеть** – источник электроэнергии номинальным напряжением более 35 В (амплитудное значение) переменного или постоянного тока.

**Синхронные колебания (вибрации)** – два или более одновременно совершающихся периодических колебаний (вибрация), имеющих равные частоты.

**Система охлаждения электронного средства** – совокупность устройств и конструктивных элементов, применяемых для обеспечения нормального теплового и влажностного режимов электронного средства.

**Случайные колебания (вибрация)** – колебания (вибрация), представляющие собой случайный процесс.

**Соединение с сетью** – электрическое соединение с сетью, выполненное таким образом, что при его подсоединении к одному из полюсов сети через резистор сопротивлением 2000 Ом в этом резисторе возникает продолжительный ток более 0,7 А (пиковое значение), при этом аппарат не подключается к заземлению.

**Соединитель (клемма)** – часть аппарата, с помощью которой осуществляют соединение с внешними проводниками или другими аппаратами. Соединитель может иметь различное количество контактов.

**Специальная среда** – неорганические и органические соединения, масла, смазки, растворители, топлива, рабочие растворы, рабочие тела, внешние по отношению к изделию, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособного состояния изделия в процессе его эксплуатации и хранения.



**Специальный источник питания** – источник питания, предназначенный для питания только специальной аппаратуры.

**Статическое давление** – механическое давление, интенсивность, точка приложения и направление которого изменяются во времени настолько медленно, что силы инерции не учитываются.

**Статическая(ий) пыль (песок)** – аэрозоль с твердой дисперсной фазой-пылью (песком), находящийся в статическом состоянии.

**Стационарный (бытовой) радиоэлектронный аппарат** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат с сетевым электропитанием, конструкция которого не предусматривает элементы для переноса вручную.

**Стереокomплекс** – комплекс аппаратуры, состоящий из всех видов звуковых источников программ, усилителя и акустической системы в блочном исполнении.

**Стереофонический (бытовой) радиоэлектронный аппарат** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат со стереофоническим трактом сигнала.

**Стойкость изделия к внешним воздействующим факторам** – свойство изделия сохранять работоспособное состояние во время и после воздействия на изделие определенного внешнего воздействующего фактора в течение всего срока службы в пределах заданных значений.

**Сторона монтажа печатной платы** – сторона печатной платы, на которой устанавливается большинство навесных элементов.

**Сторона пайки печатной платы** – сторона печатной платы, с которой производится пайка большинства навесных элементов.

**Субтрактивный процесс** – процесс получения проводящих рисунков, заключающийся в избирательном удалении участков проводящей фольги.

**Суммарная толщина печатной платы** – сумма толщин печатной платы и дополнительного химического или гальванического покрытий, которые являются составной частью печатной платы.

**Твердость** – способность материала сопротивляться внедрению в него другого материала, не получающего остаточных деформаций тела.

**Телевизионный приемник** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для приема и воспроизведения изображения и звука телевизионных программ.

**Телекоммуникационная сеть** – цепь, оканчивающаяся металлическим контактом, предназначенная для передачи телекоммуникационных сигналов звука, информации или другой связи; может быть общедоступной или частной.

**Телемагнитола** – бытовой радиоэлектронный аппарат, конструктивно объединяющий телевизионный приемник, тюнер и магнитофон-приставку.

**Телерадиокомплекс** – комплекс аппаратуры, обеспечивающий прием радиотелевизионных программ, запись аудио- и видеопрограмм, воспроизведение аудио- и видеозаписей с пластинок и других носителей информации.

**Телерадиоприемник** – бытовой радиоэлектронный аппарат, конструктивно объединяющий телевизионный приемник и тюнер.

**Телерадиотюнер** – бытовой радиоэлектронный аппарат, конструктивно объединяющий тюнер и телетюнер.

**Телетюнер** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для приема и преобразования сигналов радиовещательного телевидения в видеосигналы и сигналы звуковой частоты, воспроизведение которых осуществляется (бытовым) видеомонитором.

**Температурное поле** – совокупность числовых значений температуры в различных точках системы в данный момент времени.

**Тепловая труба** – устройство, предназначенное для переноса теплового потока с одного конца в другой за счет использования скрытой теплоты фазового превращения теплоносителя.

**Тепловое излучение** – процесс переноса теплоты, обусловленный превращением внутренней энергии вещества в энергию излучения, переносом ее в виде электромагнитных волн и поглощением веществом.

**Тепловой удар** – воздействие резкого изменения температуры окружающей среды.

**Тепломассообмен** – раздел физики, в котором рассматриваются процессы переноса теплоты (энергии) и массы (вещества).

**Теплопроводность** – молекулярный перенос теплоты в сплошной среде, вызванный разностью температур.

**Термоплавкий предохранитель** – тепловое размыкающее устройство без возврата в исходное положение, которое действует только один раз, после чего требуется полная или частичная его замена.

**Термопласты** – пластические массы, которые при нагревании плавятся и твердеют только при охлаждении.

**Терморезистор с положительным температурным коэффициентом** – термочувствительный полупроводниковый резистор, который скачкообразно увеличивает свое сопротивление при возрастании температуры до определенного значения. Изменение температуры происходит либо при протекании тока через термочувствительный элемент, либо вследствие изменения окружающей температуры, либо при сочетании обоих факторов.

**Технологическое отверстие** – отверстие в печатной плате, предусмотренное для технологических целей и используемое при выполнении технологических операций.

**Товарный знак (логотип, эмблема)** – зарегистрированное в установленном порядке обозначение, помещаемое на товаре (или упаковке) промышленными и торговыми предприятиями для индивидуализации товара и его производителя (продавца).

**Токопроводящий рисунок** – конфигурация, образованная электропроводящим материалом печатной платы.

**Толщина основания печатной платы** – толщина материала основания печатной платы без проводящей фольги или осажденного металла.

**Толщина печатной платы** – толщина материала основания печатной платы, включая проводящий рисунок или рисунки.

**Точность измерительного прибора** – степень близости значений показаний измерительного прибора к истинному значению величины. Для вспомогательной части это качество, которое характеризует близость маркированного (заданного) значения к истинному значению. Точность измерительного прибора или вспомогательной части определяется пределами основной погрешности и пределами изменений показаний.

**Транспортный (бытовой) радиоэлектронный аппарат** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для эксплуатации в транспортных средствах, с питанием от бортовой электросети или с универсальным электропитанием.

**Тюнер** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для приема и преобразования сигналов радиовещания в сигналы звуковой частоты.

**Тюнер-усилитель** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, конструктивно объединяющий тюнер и полный усилитель сигналов звуковой частоты.

**Ударная волна** – распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью переходная область в газе, жидкости или в твердом теле, в которой происходит резкое увеличение плотности, давления и температуры вещества.

**Узел** – сборочная единица, состоящая из ограниченного числа деталей и имеющая конструктивную автономию.

**Узел координатной сетки** – точка пересечения линий координатной сетки.

**Узкое место печатной платы** – участок печатной платы, где элементы проводящего рисунка и расстояния между ними могут быть выполнены только минимально допустимыми значениями.

**Ультразвуковое разогревание** – повышение температуры конструктивных элементов изделия под воздействием ультразвука, в результате превращения энергии ультразвуковых колебаний в тепловую энергию.

**Усиленная изоляция** – единая система изоляции опасных для жизни частей, обеспечивающая степень защиты от поражения электрическим током, эквивалентную двойной изоляции.

**Усилитель звуковой частоты** – автономный аппарат или часть аппарата, предназначенные для усиления сигналов звуковой частоты.

**Установка электрорадиоэлемента** – фиксированное расположение навесного электрорадиоэлемента относительно несущей конструкции и его механическое крепление, отвечающее требованиям электромонтажа.

**Устойчивость изделия к внешним воздействующим факторам** – свойство изделия сохранять работоспособное состояние во время действия на него определенного внешнего воздействующего фактора в пределах заданных значений.

**Устройство дистанционного управления** – вспомогательное радиоэлектронное устройство, предназначенное для управления работой бытового радиоэлектронного аппарата на расстоянии.

**Устройство шумопонижения** – вспомогательное (бытовое) радиоэлектронное устройство, предназначенное для уменьшения шумов при записи и/или воспроизведении звука.

**Фаза гармонических колебаний (вибрации)** – аргумент синуса, которому пропорционально значение колеблющейся величины (характеризующей вибрацию) при гармонических колебаниях (вибрации).

**Фольгированный материал** – материал основания печатной платы, имеющий с одной или двух сторон проводящую фольгу.

**Формирование сигналов изображения** – обработка, редактирование, манипулирование и/или накопление, хранение видеосигналов.

**Формовка выводов электрорадиоэлемента** – придание выводу электрорадиоэлемента конфигурации согласно определенному конструктивному исполнению, отвечающему требованиям электромонтажа.

**Форма ударного импульса** – зависимость ударного ускорения (ударной скорости, ударного перемещения, ударной деформации) от времени.

**Фосфатирование** – процесс образования на стали защитной пленки с высокими антикоррозионными и электроизоляционными свойствами, хорошей адгезией. Получаемое покрытие пористо, недостаточно прочно и используется как грунт под окраску.

**Функциональный узел** – устройство, предназначенное для выполнения одной или ограниченного числа функций.

**Цвет контрастный** – цвет для усиления зрительного восприятия и выделения на окружающем фоне знаков безопасности и сигнальной разметки, выполнения графических символов и поясняющих надписей.

**Цвет сигнальный** – цвет, предназначенный для привлечения внимания людей к непосредственной или возможной опасности, рабочим узлам оборудования, машин, механизмов и/или элементам конструкции, которые могут являться источниками опасных и/или вредных факторов.

**Цветовое восприятие глаза** – способность глаза различать цвета по цветовому фону, насыщенности и контрастности.

**Цветомузыкальное устройство** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для светового цветного сопровождения музыкальных программ, связанного по амплитудно-частотным характеристикам с источником программ.

**Цифровое кодирование** – операция представления численного значения величины определенным цифровым кодом.

**Частота периодических колебаний (вибрации)** – величина, обратная периоду колебаний (вибрации).

**Шаг координатной сетки** – постоянная величина, определяющая расстояние между соседними линиями координатной сетки и кратность расстояний между монтажными отверстиями: для сетки в прямоугольной системе координат – линейный шаг, одинаковый по горизонтали и вертикали; для сетки в полярной системе координат – линейный шаг концентрических окружностей и угловой шаг радиальных линий.

**Ширина гарантийного пояска** – минимально допустимая ширина контактной площадки отверстия печатной платы в узком месте.

**Ширина печатного проводника** – поперечный размер проводника в любой точке, видимый в плате.

**Штамповка** – процесс изготовления детали, заключающийся в изменении формы и размеров заготовки давлением с помощью специализированного инструмента – штампа.

**Шум** – нерегулярное или статистически случайное колебание.

**Эквалайзер** – (бытовой) радиоэлектронный аппарат, предназначенный для коррекции амплитудно- и фазочастотных искажений устройств воспроизведения и записи звука.

**Экран** – металлическая оплетка в линиях связи, обеспечивающая их защиту от воздействия электрических, магнитных и электромагнитных полей.

**Электрическое разогревание** – повышение температуры конструктивных элементов изделия под воздействием электрического поля в результате превращения электрической энергии в тепловую энергию.

**Электромонтаж** – часть конструкции, предназначенная для обеспечения электрически неразрывных связей при объединении нескольких элементов нижестоящего иерархического уровня в элементы вышестоящего конструктивного уровня.

**Электронный музыкальный инструмент** – электронное устройство (электронный орган, электронное пианино или музыкальный синтезатор), которое воспроизводит музыку под управлением музыканта.

**Аналоговые электронные устройства (АЭУ)** – это устройства усиления и обработки аналоговых электронных сигналов, выполненные на основе электронных приборов.

**Аналоговые сигналы** - это сигналы, изменяющиеся по тому же закону, что и описываемые ими физические процессы. Аналоговые сигналы заданы (известны, могут быть измерены) во все моменты времени.

**Усилитель электрических сигналов** – устройство, которое за счет энергии источника питания формирует новое колебание, являющееся по форме копией заданного усиливаемого колебания, но превосходит его по напряжению, току или мощности.

**Устройства на основе усилителей** – это, в основном, преобразователи электрических сигналов (устройства суммирования, вычитания, дифференцирования, интегрирования, логарифмирования, умножения и др.), преобразователи сопротивлений и генераторы различных типов.

**Основные технические характеристики аналоговых электронных усилителей** – входные и выходные сопротивления, коэффициенты передачи (по напряжению, по току, по мощности), амплитудно-частотные, фазочастотные и переходные характеристики, коэффициент полезного действия, амплитудная характеристика и др.

**Линейные искажения усилителей** – это частотные и фазовые искажения амплитудно - и фазочастотных характеристик; линейные искажения меняют форму сложного колебания, а форму гармонического (синусоидального) колебания не изменяют.

**Биполярный транзистор** – полупроводниковый элемент с двумя p-n переходами. Главный отличительный признак

биполярного транзистора – обеспечение его работы за счет носителей зарядов - электронов и дырок - за счет их инжекции.

**Формулы Эберса-Молла** – математическая модель биполярного транзистора в статическом режиме.

**Эффект Эрли** – при увеличении обратного напряжения на коллекторном переходе он расширяется в сторону базы; ширина базы при этом уменьшается; ток коллектора слегка увеличивается.

**Полевой (униполярный, канальный) транзистор** – полупроводниковый прибор, в основе работы которого используются подвижные носители зарядов только одного типа – либо электроны, либо дырки. Принцип действия **полевого транзистора с р-п переходом** основан на изменении сопротивления активного слоя (канала) путем расширения р-п перехода при подаче на него напряжения обратного смещения.

**МДП-транзистор** - транзистор со структурой «металл-диэлектрик-полупроводник».

**МОП-транзистор** – транзистор со структурой «металл-окисел-полупроводник».

В основе принципа работы МДП (МОП) транзисторов – влияние поля, изменяющего величину заряда электропроводимости на границе полупроводника с диэлектриком под действием приложенного напряжения.

**Нестабилизированные схемы смещения транзистора:**

- схема с фиксированным током базы;
- схема с фиксированным напряжением «база-эмиттер».

**Стабилизированные схемы питания транзисторов:**

- схема эмиттерной стабилизации;
- схема коллекторной стабилизации;
- комбинированная (эмиттерно-коллекторная) схема стабилизации;
- установка рабочей точки фиксацией точки эмиттера;

- схемы стабилизации за счет термокомпенсации;
- схемы с ГСТ (с генератором стабильного тока).

**ГСТ – генератор стабильного тока** – специальная схема из двух транзисторов, в которой ток второго транзистора «зеркально» отображает ток первого. Стабилизируя ток первого, получают стабилизацию тока второго транзистора, который и включают в требуемую схему.

**ГСТ – «токовое зеркало»** - при соотношении токов

$$\frac{I_2}{I_1} = 1$$

**ГТС – «отражатель» тока** – при соотношении токов

$$\frac{I_2}{I_1} \neq 1$$

**Активная (динамическая) нагрузка** – ГСТ, у которого сопротивление по переменному току  $R_{дин}$  - очень велико, а статическое (по постоянному току)  $R_{ст}$  - очень мало.

**Глубина обратной связи для замкнутой цепи обратной связи:**

$$F = \frac{K_E}{K_{EF}}$$

где  $K_E$  - сквозной коэффициент усиления без обратной связи;  $K_{EF}$  - при наличии обратной связи.

**Коэффициент петлевого усиления вдоль разомкнутой цепи обратной связи**

$$K_{\Pi} = B \cdot K_E,$$

где  $B$  - коэффициент передачи цепи обратной связи.

**Возвратное отношение для разомкнутой цепи обратной связи:**

$$T = -K_{\Pi}$$



**Формула Блэкмана для определения влияния обратной связи на входные и выходные сопротивления усилителя**

$$Z_F = Z \cdot \frac{F_{KЗ}}{F_{XX}},$$

где  $Z_F$  - величина сопротивления (входного, выходного) при наличии обратной связи;

$Z$  - величина сопротивления (входного, выходного) при отсутствии обратной связи;

$F_{KЗ}$  - глубина обратной связи при коротком замыкании цепи (входной, выходной);

$F_{XX}$  - глубина обратной связи при обрыве цепи (входной, выходной).

**Годограф** – кривая, по которой проходит конец вектора возвратного отношения  $T$  при изменении частоты  $0 \leq \omega \leq \infty$ .

**Критерий Найквиста для устойчивого усилителя** – годограф вектора возвратного отношения  $T(j\omega)$  не охватывает точки с координатами  $(-1, 0)$  в области частот  $0 \leq \omega \leq \infty$ .

**Динамическая характеристика усилителя** – связь между мгновенными значениями тока ( $\Delta I_K$ ) и напряжения ( $\Delta U_K$ ) при наличии сопротивления нагрузки ( $R_H$ ). Различают: входные, передаточные, сквозные динамические характеристики, а также динамические линии нагрузок.

**Уравнение нагрузки для переменного тока** –

$$\Delta U_{KЭ} = -\Delta I_K \cdot R_H$$

**Площадь усиления широкополосного усилителя** –

$$П = K_0 \cdot f_B,$$

где  $K_0$  - коэффициент усиления на средней частоте диапазона усиливаемых частот;  $f_B$  - верхняя граничная частота (на которой коэффициент усиления снижается в  $\sqrt{2}$  раз).

**1. Операционный усилитель (ОУ)** – это многокаскадный усилитель постоянного тока с дифференциальным входным каскадом, большим усилением и несимметричным выходом, предназначенный для работы с глубокой отрицательной обратной связью.

**2. Операционный усилитель (ОУ)** – это модульный многокаскадный усилитель с дифференциальным входом, по своим характеристикам приближающийся к идеальному усилителю со свойствами:

- бесконечно большой коэффициент усиления по напряжению ( $K_U = \infty$ );
- бесконечно большое входное сопротивление ( $R_{вх} = \infty$ );
- нулевое выходное сопротивление ( $Z_{вых} = 0$ );
- равенство  $U_{вых} = 0$  при  $U_{вх1} = U_{вх2}$ ;
- бесконечно большая полоса пропускания частот (отсутствие задержки сигнала).

**Коэффициент усиления дифференциального напряжения:**

$$K_D = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вхд}},$$

где  $\Delta U_{вхд} = U_{вх1} - U_{вх2}$  - изменение (разность) входных напряжений (между двумя входами). Коэффициент усиления дифференциального напряжения идентичен коэффициенту усиления по напряжению ОУ без обратной связи.

**Коэффициент усиления синфазного напряжения:**

$$K_{сф} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вхсф}},$$

где  $\Delta U_{\text{вхсф}} = \frac{\Delta(U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}})}{2}$  - изменение входных напряжений

при  $U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх2}}$  (на обоих входах одновременно).

**Коэффициент относительного ослабления синфазных сигналов (КОСС)**

$$K_{\text{оос}} = 20 \lg \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{сф}}}$$

- основной параметр дифференциального каскада, входящего в состав ОУ, характеризующий способность ослаблять сигналы, приложенные к обоим входам одновременно (синфазные).

**Интегратор Миллера** – интегральный усилитель, состоящий из ОУ, интегратора и емкости Миллера

$$C_{\text{М}} = C_{\text{вх}}(1 + K_{\text{д}}).$$

**Эффект Миллера** – обусловлен тем, что из-за влияния  $U_{\text{вых}}$  увеличивается  $C_{\text{вх}}$  операционного усилителя:

$$C_{\text{вх}} = C_{\text{вх}} + C_{\text{к}}(1 + K_{\text{д}}).$$

**Реализация ARC - фильтра нижних частот первого порядка:**

$$K(P) = \frac{K_0}{1 + a_1 \cdot P},$$

где  $a_1 = 1$ ;  $K_0$  - коэффициент передачи при  $\omega = 0$ ;  $P$  - нормированное значение частоты в операторной форме:

$$P = \frac{j \cdot \omega}{\omega_{\text{ср}}},$$

где  $\omega_{\text{ср}}$  - частота среза фильтра.

**Реализация ARC – фильтра нижних частот второго порядка:**

$$K(P) = \frac{K_0}{1 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot P^2},$$

где  $a_1, b_1$  - коэффициенты (табличные).

Фильтры второго порядка не могут быть реализованы с помощью только пассивных RC – цепей. Они реализуются только при использовании L- элементов или с помощью ОУ.

**Мост Вина** - автогенератор на основе неинвертирующего ОУ с RC – цепью для положительной обратной связи на одной частоте, на которой выполняется баланс фаз и амплитуд.

**RC - генераторы на основе ОУ** - автогенераторы на ОУ с положительной ОС; для инвертирующих усилителей необходим поворот фазы  $\varphi = 180^\circ$ , для неинвертирующих -  $\varphi = 0^\circ$  (для обеспечения баланса фаз).

**1. Компаратор** - (сравнивающее устройство) – служит для определения моментов равенства двух напряжений.

**2. Компаратор** – интегральный ОУ специального назначения, у которого выходные напряжения мгновенно изменяются от максимальных до минимальных значений или обратно при каждом прохождении через нуль разности двух входных напряжений.

**БИС** – большая интегральная схема.

**СБИС** – сверхбольшая интегральная схема.

**ПЛИ** – программируемая логическая матрица.

**ТТЛ** – транзисторно-транзисторная логика;

**Фиксатор** – триггер-защелка(противодребезговое устройство);

**Триггер(фиксатор)** – бистабильный мультивибратор;

**Мультивибратор** – генератор тактовых импульсов, генерирующий непрерывную последовательность импульсов с ТТЛ-уровнями;

**Система счисления** – код, в котором используются специальные символы для обозначения количества каких-либо объектов;

**Вес разряда** – различная значимость разряда системы счисления;

**Логический элемент** – схема, “решающая”, что ей ответить на выходе– “да” или “нет”. Термин “логический” здесь использован по отношению к процедуре принятия решения;

**Булевы выражения** – основной язык, универсальный для цифровой техники. Булева алгебра – алгебра логики;

**Конъюнкция** – логическое умножение;

**Дизъюнкция** – логическое сложение;

**Положительная логика** – высокий уровень сигнала соответствует логической единице, а низкий – нулю;

**Отрицательная логика** – высокий уровень сигнала соответствует нулю, а низкий – логической единице;

**Совместимость уровней** входных и выходных сигналов – обеспечение согласования логических элементов при их покаскадном включении;

**Помехоустойчивость** логических элементов – это свойство их нечувствительности к отклонениям входных сигналов от асимптотических значений;

**Быстродействие** логического элемента – характеризуется временем задержки распространения сигнала (при включении, при выключении, среднее время задержки);

**РТЛ** – резисторно-транзисторная логика;

**ДТЛ** – диодно-транзисторная логика;

**ТТЛ** – транзисторно-транзисторная логика;

**ЭСЛ** – эмиттерно-связанная логика;

**ИИЛ (И<sup>2</sup>Л)** – инжекторно – интегральная логика;

**МОП-ИС** – логическая ячейка с МОП-транзистором;

**КМОП-ИС** – логическая ячейка с КМОП-транзисторами (взаимно дополняющая, комплементарная пара транзисторов с р-п-каналами).

**Шифратор** – устройство для преобразования десятичного числа в какой-либо код;

**Дешифратор** – устройство обратного преобразования кодов в десятичное число;

**Мультиплексор** – устройство для управляемой передачи данных от нескольких источников информации в один выходной канал;

**Демультимплексор** – устройство для управляемой передачи данных от одного источника информации в несколько выходных каналов.

**Триггер** – устройство, способное сформировать два устойчивых значения выходного сигнала и скачкообразно изменять эти два значения под действием внешнего управляющего сигнала;

**Счётчик** – последовательное устройство, предназначенное для счёта входных импульсов и записи их числа в двоичном коде;

**Модуль счета** – число состояний счетчика в процессе полного цикла.

**Регистр** – последовательное счетное устройство, предназначенное для записи, хранения, и (или) сдвига информации, представляемой в виде многоразрядного двоичного кода.

**Сумматор** – комбинационное логическое устройство, предназначенное для выполнения операции арифметического сложения чисел, представленных в виде двоичных чисел;

**Полусумматор** – устройство, предназначенное для сложения двух одноразрядных кодов, имеющее два входа и два выхода и формирующее из сигналов входных слагаемых сигнал суммы и сигнала переноса в старший разряд;

**АЛУ** – арифметическо-логическое устройство, предназначенное для реализации логических и арифметических операций по обработке информации. АЛУ – функционально законченный узел ЭВМ.

**Бит** – один разряд двоичного числа;

**Байт** – 8-разрядное кодовое число;

**ОЗУ** – оперативно запоминающее устройство, используемое для хранения информации в процессе работы;

**ПЗУ** – постоянно запоминающее устройство, предназначенное для хранения информации в течение времени эксплуатации устройства.

**Дискретизация сигнала по времени** – определение номера заданных дискретных моментов времени и определение в эти моменты значений непрерывной функции;

**Квантование** – округление до некоторых известных величин полученных в дискретные моменты времени значений исходной аналоговой величины по уровню;

**Шум квантования** – погрешность, определяемая разрядностью числового кода.

РАЗРАБОТКА УЗЛОВ И БЛОКОВ РЭА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ

по направлению подготовки

11.03.04 Электроника и наноэлектроника

профиль

Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Составитель: Дюдюн Дмитрий Евгеньевич

Редактор: \_\_\_\_\_

---

|              |                          |                      |
|--------------|--------------------------|----------------------|
| Формат _____ | Подписано в печать _____ | Уч.-изд. л. – _____. |
| Бумага _____ | Усл. п. л. – _____       | Заказ _____          |
| Печать _____ | Тираж _____ экз.         |                      |

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»  
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1

---

Издательство Северо-Кавказского федерального университета  
Отпечатано в типографии СКФУ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## **Методические указания**

по организации и проведению самостоятельной работы  
по дисциплине «РАЗРАБОТКА УЗЛОВ И БЛОКОВ РЭА»  
для студентов направления подготовки  
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
Направление (профиль)  
«Интеллектуальные программируемые системы и устройства»

**Ставрополь  
2026**

Печатается по решению  
Учебно-методического совета  
Северо-Кавказского федераль-  
ного университета

УДК  
ББК

Дюдюн Д.Е. Разработка узлов и блоков РЭА: методические указания для студентов по организации самостоятельной работы. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 201\_. – \_ с.

Настоящие методические рекомендации предназначены для организации самостоятельной работы по дисциплине «Разработка узлов и блоков РЭА» для студентов очной формы обучения направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, направленность (профиль) Интеллектуальные программируемые системы и устройства. В методических рекомендациях приведён план график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, представлены вопросы для обсуждения, а также задания и вопросы для формирования и контроля владения компетенциями и список основной литературы, рекомендуемой для самостоятельной работы. Представлен список дополнительной литературы, позволяющий студентам более глубоко познакомиться с изучаемым предметом.

Методические рекомендации к самостоятельной работе студентов составлены в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, направленность (профиль) Интеллектуальные программируемые системы и устройства, рабочими учебными планами и программами дисциплины «Разработка узлов и блоков РЭА».

УДК  
ББК

© ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский  
федеральный университет», 201\_

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                          | 4  |
| 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА<br>ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «РАЗРАБОТКА УЗЛОВ И БЛОКОВ РЭА»..... | 5  |
| 1.1 Цель и задачи самостоятельной работы студентов .....                                                               | 5  |
| 1.2 Тематика выполнения СРС, указания по форме контроля .....                                                          | 9  |
| 2 ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ СРС .....                                                                                     | 11 |
| 3 КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ И ВИДЫ ОТЧЕТНОСТИ ПО НИМ.....                                                                      | 11 |
| 4 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО<br>МАТЕРИАЛА .....                                              | 13 |
| 4.1 Работа с литературой .....                                                                                         | 13 |
| 4.2 Критерии оценки для проверки уровня обученности в рамках текущего<br>контроля.....                                 | 20 |
| 5 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....                                                                                | 22 |
| 5.1 Основная литература.....                                                                                           | 22 |
| 5.2. Дополнительная литература:.....                                                                                   | 22 |

## **Введение**

Современные стандарты подготовки специалистов предусматривают значительный объем внеаудиторной работы. Освоение программы курса предполагает получение как теоретических знаний в области инженерной деятельности, так и формирование навыков практической работы. Поэтому самостоятельная работа в рамках курса ориентирована как на теоретический, так и на практический аспект.

Самостоятельная работа студентов – это выполнение теоретических и практических заданий студентами по усвоению изучаемой дисциплины «Разработка узлов и блоков РЭА».

# **1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «РАЗРАБОТКА УЗЛОВ И БЛОКОВ РЭА»**

## **1.1 Цель и задачи самостоятельной работы студентов**

Целью самостоятельной работы является закрепление и углубление знаний, полученных студентами на лекциях, подготовке к текущим практическим занятиям, промежуточным формам контроля знаний и к итоговому контролю.

Дидактические цели самостоятельных занятий:

- формирование профессиональных умений;
- формирование умений и навыков самостоятельного умственного труда;
- мотивирование регулярной целенаправленной работы по освоению специальности;
- развитие самостоятельности мышления;
- формирование убежденности, волевых черт характера, способности к самоорганизации;
- овладение технологическим учебным инструментом.

Задача самостоятельной работы студентов – систематическое изучение дисциплин в течение семестра, закрепление и углубление полученных знаний и навыков, подготовка к предстоящим занятиям, а также формирование культуры умственного труда и самостоятельности в поиске и приобретении новых знаний и умений, и, в том числе, формирование компетенций.

Основная тенденция инноваций в области образования определяется как переход от «научения к изучению»

Именно систематическое изучение учебной дисциплины позволяет студенту достигнуть уровня требований федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) к профессиональной подготовленности, которые сформулированы следующим образом: знать, уметь, владеть.

В современной науке существует несколько классификаций самостоятельной работы студентов. Один из вариантов такой классификации представлен в табл. 1.

Таблица 1.

**Виды самостоятельной работы студентов**

| Виды                     | Содержание                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Репродуктивная           | Повторение учебного материала, самостоятельный просмотр, прочтение, конспектирование учебной литературы; прослушивание, запоминание, заучивание и пересказ магнитофонных записей лекций, Интернет-ресурсы и др.                            |
| Познавательная-поисковая | Написание курсовых, контрольных работ и рефератов. Разработка сообщений, эссе, докладов, докладов с презентациями. Подготовка выступлений на практических и семинарских занятиях, проработка литературы по дисциплинарным проблемам, и др. |
| Творческая               | Подготовка дипломной работы (дипломного проекта), научных статей, рефератов, участие в научно-исследовательской работе, в студенческих и научно-практических конференциях.                                                                 |

Студенты в ходе выполнения самостоятельной работы должны руководствоваться ориентировочной основой деятельности на каждом этапе:

- 1 этап – определить цели самостоятельной работы;
- 2 этап – конкретизировать познавательные (практические или проблемные) задачи;
- 3 этап – оценить собственную готовность к самостоятельной работе по решению познавательных задач;
- 4 этап – выбрать оптимальный способ действий (технологии, методы и средства), ведущий к достижению поставленной цели через решение конкретных задач;
- 5 этап – спланировать (самостоятельно или с помощью преподавателя) программу самостоятельной работы;
- 6 этап – реализовать программу самостоятельной работы.

Планирование и контроль преподавателем самостоятельной работы студентов необходим для успешного ее выполнения. Преподаватель заранее планирует систему самостоятельной работы, учитывает все ее цели, формы, отбирает учеб-

ную и научную информацию и методические средства коммуникаций, продумывает свое участие и роль студента в этом процессе.

Вопросы для самостоятельной работы студентов, указанные в рабочей программе дисциплины, предлагаются преподавателями в начале изучения дисциплины. Студенты имеют право выбирать дополнительно интересующие их темы для самостоятельной работы.

Содержание деятельности преподавателя и студента при выполнении самостоятельной работы представлено в табл. 2.

Таблица 2.

**Содержание деятельности при выполнении самостоятельной работы**

| Основные характеристики | Деятельность преподавателя                                                                                                                                                                                                                                                                            | Деятельность студентов                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Цель выполнения СР      | <ul style="list-style-type: none"><li>• объяснить смысл и цель самостоятельной работы;</li><li>• дать подробный инструктаж о требованиях, предъявляемых к самостоятельной работе и методах ее выполнения;</li><li>• продемонстрировать образец самостоятельной работы</li></ul>                       | <ul style="list-style-type: none"><li>• понять и принять цель самостоятельной работы как лично значимую;</li><li>• познакомиться с требованиями и образцами самостоятельной работы</li></ul>                                         |
| Мотивация               | <ul style="list-style-type: none"><li>• раскрыть теоретическую и практическую значимость выполнения самостоятельной работы,</li><li>• сформировать познавательную потребность студента и готовность к выполнению самостоятельной работы;</li><li>• мотивировать студента на достижение цели</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• сформировать у себя познавательную потребность в выполнении самостоятельной работы;</li><li>• сформировать целевую установку и принять решение о выполнении самостоятельной работы</li></ul> |
| Управление              | <ul style="list-style-type: none"><li>• осуществлять управление через воздействие на каждом этапе процесса выполнения самостоятельной работы;</li><li>• дать оптимальные технологии выполнения самостоятельной работы</li></ul>                                                                       | самому осуществлять управление самостоятельной работой (проектировать, планировать, рационально распределять время и т.д.) на основе предложенных технологий                                                                         |

Продолжение таблицы 2

| Основные характеристики         | Деятельность преподавателя                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Деятельность студентов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Контроль и коррекция выполнения | <ul style="list-style-type: none"> <li>• осуществлять входной контроль, предполагающий выявление начального уровня готовности студента к выполнению самостоятельной работы;</li> <li>• намечать дальнейшие пути выполнения самостоятельной работы;</li> <li>• осуществлять итоговый контроль конечного результата выполнения самостоятельной работы</li> </ul>                                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• осуществлять текущий и итоговый операционный самоконтроль за ходом выполнения самостоятельной работы;</li> <li>• самоанализ и исправление допущенных ошибок и внесение корректив в работу;</li> <li>• ведение поиска оптимальных способов выполнения самостоятельной работы;</li> <li>• осуществлять рефлекссию к собственной деятельности</li> </ul> |
| Оценка                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• давать оценку самостоятельной работе на основе сличения результата с образцом;</li> <li>• давать методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы выявлять затруднения и типичные ошибки; подчеркивать положительные и отрицательные стороны;</li> <li>• устанавливать уровень и определять уровень продвижения студента и тем самым сформировать у него мотивацию достижения успеха в учебной деятельности</li> </ul> | дать оценку собственной работе, своим познавательным возможностям и способностям сопоставляя достигнутый результат с целью самостоятельной работы                                                                                                                                                                                                                                              |

Самостоятельная работа включает те разделы курса, которые не получили достаточного освещения на лекциях по причине ограниченности лекционного времени и большого объема изучаемого материала.

Методическое обеспечение самостоятельной работы состоит из:

- 1) Определения учебных вопросов, которые студенты должны изучить самостоятельно;
- 2) Подбора необходимой учебной литературы, обязательной для проработки и изучения;
- 3) Поиска дополнительной научной литературы, к которой студенты могут обращаться по желанию, если у них возникает интерес в данной теме;



4) Определения контрольных вопросов, позволяющих студентам самостоятельно проверить качество полученных знаний;

5) Организации консультаций преподавателя со студентами для разъяснения вопросов, вызвавших у обучающихся затруднения при самостоятельном освоении учебного материала.

## 1.2 Тематика выполнения СРС, указания по форме контроля

Тематика СРС соответствует рабочей программе дисциплины «Разработка узлов и блоков РЭА» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника», направленность (профиль) «Интеллектуальные программируемые системы и устройства». Темы разделов дисциплины и виды самостоятельной работы приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Темы разделов дисциплины и виды самостоятельной работы

| №         | Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание; вид самостоятельной работы                        | Форма контроля   | Зач. ед. (часы)         |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------|
| 5 семестр |                                                                                                                  |                  |                         |
|           | Подготовка к практическим занятиям                                                                               | Выборочный опрос | 0,20<br>(5,4)           |
|           | <b>Самостоятельное дополнительное изучение тем дисциплины</b>                                                    |                  | <b>0,800<br/>(21,6)</b> |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Проектирование электронных средств»                                | Выборочный опрос | 0,044<br>(1,2)          |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Ограничения при проектировании»                                    | Выборочный опрос | 0,044<br>(1,2)          |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Стандартизация в проектировании электронных средств»               | Выборочный опрос | 0,044<br>(1,2)          |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Компоновка электронных средств»                                    | Выборочный опрос | 0,044<br>(1,2)          |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Несущие конструкции ЭС»                                            | Выборочный опрос | 0,044<br>(1,2)          |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Проектирование объемного монтажа»                                  | Выборочный опрос | 0,044<br>(1,2)          |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Проектирование печатного монтажа»                                  | Выборочный опрос | 0,044<br>(1,2)          |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Волоконно-оптические линии передачи информации»                    | Выборочный опрос | 0,044<br>(1,2)          |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Основные понятия надежности электронных средств»                   | Выборочный опрос | 0,044<br>(1,2)          |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Основы защиты электронных средств от воздействий окружающей среды» | Выборочный опрос | 0,044<br>(1,2)          |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Основы защиты электронных средств от тепловых воздействий»         | Выборочный опрос | 0,044<br>(1,2)          |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Основы защиты электронных средств от механических воздействий»     | Выборочный опрос | 0,044<br>(1,2)          |

| №         | Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание; вид самостоятельной работы                                                                                                        | Форма контроля   | Зач. ед. (часы) |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Электромагнитная совместимость и защита электронных средств от помех»                                                                              | Выборочный опрос | 0,044 (1,2)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Обеспечение безопасности электронных средств»                                                                                                      | Выборочный опрос | 0,044 (1,2)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Особенности проектирования электронных средств различного назначения»                                                                              | Выборочный опрос | 0,044 (1,2)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Основные технические характеристики и показатели аналоговых электронных устройств (АЭУ)»                                                           | Выборочный опрос | 0,044 (1,2)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Требования к цепям питания усилительных элементов. Стабилизация режима транзистора»                                                                | Выборочный опрос | 0,044 (1,2)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Обратная связь в аналоговых электронных устройствах и ее влияние на их параметры и свойства. Схемотехника применения отрицательной обратной связи» | Выборочный опрос | 0,044 (1,2)     |
|           | Итого за 5 семестр                                                                                                                                                                               |                  | 1,000 (27,00)   |
| 6 семестр |                                                                                                                                                                                                  |                  |                 |
|           | Подготовка к практическим занятиям                                                                                                                                                               | Выборочный опрос | 0,10 (2,7)      |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение тем дисциплины                                                                                                                                           |                  | 1,400 (37,8)    |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Усилители на биполярных транзисторах»                                                                                                              | Выборочный опрос | 0,156 (4,2)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Усилители на полевых транзисторах»                                                                                                                 | Выборочный опрос | 0,156 (4,2)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Анализ и схемотехника выходных мощных каскадов усиления»                                                                                           | Выборочный опрос | 0,156 (4,2)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Операционные усилители»                                                                                                                            | Выборочный опрос | 0,156 (4,2)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Схемотехника аналоговых устройств на основе операционных усилителей»                                                                               | Выборочный опрос | 0,156 (4,2)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Положительная обратная связь Генераторы на основе операционных усилителей. Компараторы на основе операционных усилителей»                          | Выборочный опрос | 0,311 (8,4)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Современные базовые элементы цифровой техники. Цифровые сигналы и цифровые схемы»                                                                  | Выборочный опрос | 0,311 (8,4)     |
|           | Итого за 6 семестр                                                                                                                                                                               |                  | 1,500 (40,5)    |
| 7 семестр |                                                                                                                                                                                                  |                  |                 |
|           | Подготовка к практическим занятиям                                                                                                                                                               | Выборочный опрос | 0,100 (2,7)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение тем дисциплины                                                                                                                                           |                  | 0,400 (10,8)    |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Схемотехника цифровых интегральных схем Схемотехника логических элементов»                                                                         | Выборочный опрос | 0,044 (1,2)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Коды. Преобразователи кодов. Шифраторы. Мультиплексоры»                                                                                            | Выборочный опрос | 0,044 (1,2)     |
|           | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Триггеры. Схемы фиксаторов. Запуск триггеров»                                                                                                      | Выборочный опрос | 0,044 (1,2)     |

| № | Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание; вид самостоятельной работы                                         | Форма контроля   | Зач. ед. (часы)      |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|
|   | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Счетчики; регистры; сумматоры»                                                      | Выборочный опрос | 0,044 (1,2)          |
|   | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Запоминающие устройства. Схемотехника запоминающих устройств»                       | Выборочный опрос | 0,088 (2,4)          |
|   | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Сопряжение цифровых и аналоговых устройств Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП)»   | Выборочный опрос | 0,088 (2,4)          |
|   | Самостоятельное дополнительное изучение темы «Сопряжение цифровых и аналоговых устройств. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)» | Выборочный опрос | 0,044 (1,2)          |
|   | <b>Итого за 7 семестр</b>                                                                                                         |                  | <b>0,500 (13,5)</b>  |
|   | <b>Итого</b>                                                                                                                      |                  | <b>3,000 (81,00)</b> |

## 2 ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ СРС

Подготовка к лекциям и практическим занятиям осуществляется непосредственно перед каждым занятием. План-график выполнения самостоятельной работы приведен в таблице 4.

Таблица 4 - План-график выполнения самостоятельной работы

| Код реализуемой компетенции                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Вид деятельности студентов                                          | Итоговый продукт самостоятельной работы | Средства и технологии оценки | Объем часов  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|--------------|
| <b>5 семестр</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                     |                                         |                              |              |
| ПК-2 (ИД-1 <sub>ПК-2</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-2</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-2</sub> )<br>ПК-3 (ИД-1 <sub>ПК-3</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-3</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-3</sub> )<br>ПК-4 (ИД-1 <sub>ПК-4</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-4</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-4</sub> )<br>ПК-6 (ИД-1 <sub>ПК-6</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-6</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-6</sub> )<br>ПК-8 (ИД-1 <sub>ПК-8</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-8</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-8</sub> ) | Подготовка к практическим занятиям                                  | отчет                                   | собеседование                | 5,4          |
| ПК-2 (ИД-1 <sub>ПК-2</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-2</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-2</sub> )<br>ПК-3 (ИД-1 <sub>ПК-3</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-3</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-3</sub> )<br>ПК-4 (ИД-1 <sub>ПК-4</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-4</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-4</sub> )<br>ПК-6 (ИД-1 <sub>ПК-6</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-6</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-6</sub> )<br>ПК-8 (ИД-1 <sub>ПК-8</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-8</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-8</sub> ) | Самостоятельное изучение источников и литературы по разделам №№1-18 | конспект                                | собеседование                | 21,6         |
| <b>Итого за 5 семестр:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                     |                                         |                              | <b>27,00</b> |
| <b>6 семестр</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                     |                                         |                              |              |
| ПК-2 (ИД-1 <sub>ПК-2</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-2</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-2</sub> )<br>ПК-3 (ИД-1 <sub>ПК-3</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-3</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-3</sub> )<br>ПК-4 (ИД-1 <sub>ПК-4</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-4</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-4</sub> )<br>ПК-6 (ИД-1 <sub>ПК-6</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-6</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-6</sub> )<br>ПК-8 (ИД-1 <sub>ПК-8</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-8</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-8</sub> ) | Подготовка к практическим занятиям                                  | отчет                                   | собеседование                | 2,7          |
| ПК-2 (ИД-1 <sub>ПК-2</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-2</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-2</sub> )<br>ПК-3 (ИД-1 <sub>ПК-3</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-3</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-3</sub> )<br>ПК-4 (ИД-1 <sub>ПК-4</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-4</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-4</sub> )<br>ПК-6 (ИД-1 <sub>ПК-6</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-6</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-6</sub> )                                                                               | Самостоятельное изучение источников и литературы по разделам        | конспект                                | собеседование                | 37,8         |

| Код реализуемой компетенции                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Вид деятельности студентов                                           | Итоговый продукт самостоятельной работы | Средства и технологии оценки | Объём часов |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|-------------|
| ПК-8 (ИД-1 <sub>ПК-8</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-8</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-8</sub> )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | №№19-25                                                              |                                         |                              |             |
| <b>Итого за 6 семестр:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                      |                                         |                              | <b>40,5</b> |
| <b>7 семестр</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                      |                                         |                              |             |
| ПК-2 (ИД-1 <sub>ПК-2</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-2</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-2</sub> )<br>ПК-3 (ИД-1 <sub>ПК-3</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-3</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-3</sub> )<br>ПК-4 (ИД-1 <sub>ПК-4</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-4</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-4</sub> )<br>ПК-6 (ИД-1 <sub>ПК-6</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-6</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-6</sub> )<br>ПК-8 (ИД-1 <sub>ПК-8</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-8</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-8</sub> ) | Подготовка к практическим занятиям                                   | отчет                                   | собеседование                | 2,7         |
| ПК-2 (ИД-1 <sub>ПК-2</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-2</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-2</sub> )<br>ПК-3 (ИД-1 <sub>ПК-3</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-3</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-3</sub> )<br>ПК-4 (ИД-1 <sub>ПК-4</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-4</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-4</sub> )<br>ПК-6 (ИД-1 <sub>ПК-6</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-6</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-6</sub> )<br>ПК-8 (ИД-1 <sub>ПК-8</sub> ; ИД-2 <sub>ПК-8</sub> ; ИД-3 <sub>ПК-8</sub> ) | Самостоятельное изучение источников и литературы по разделам №№26-32 | конспект                                | собеседование                | 10,8        |
| <b>Итого за 7 семестр:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                      |                                         |                              | <b>13,5</b> |
| <b>Итого:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                      |                                         |                              | <b>81,0</b> |

### 3 КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ И ВИДЫ ОТЧЕТНОСТИ ПО НИМ

Контроль знаний студентов включает формы текущего и итогового контроля. Текущий контроль осуществляется в процессе изучения курса и включает в себя оценку работы студентов на практических занятиях, а также защиту контрольной работы. Рейтинговая оценка знаний студентов в рамках текущего контроля приведена в таблице 5.

Таблица 5 – Рейтинговая оценка знаний студентов.

| № п/п            | Тип занятия (контрольной точки)                  | Кол-во баллов |
|------------------|--------------------------------------------------|---------------|
| <b>5 семестр</b> |                                                  |               |
| 1.               | Зачетное занятие по практическим работам № 1–6   | 18            |
| 2.               | Зачетное занятие по практическим работам № 7–12  | 18            |
| 3.               | Зачетное занятие по практическим работам № 13–18 | 19            |
|                  | <b>Итого за 5 семестр</b>                        | <b>55</b>     |
| <b>6 семестр</b> |                                                  |               |
| 4.               | Зачетное занятие по практическим работам № 19–21 | 18            |
| 5.               | Зачетное занятие по практическим работам № 22–23 | 18            |
| 6.               | Зачетное занятие по практическим работам № 24–25 | 19            |
|                  | <b>Итого за 6 семестр</b>                        | <b>55</b>     |
| <b>7 семестр</b> |                                                  |               |
| 7.               | Зачетное занятие по практическим работам № 26–28 | 18            |
| 8.               | Зачетное занятие по практическим работам № 29–30 | 18            |
| 9.               | Зачетное занятие по практическим работам № 31–32 | 19            |
|                  | <b>Итого за 7 семестр</b>                        | <b>55</b>     |

## **4 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА**

Опрос по темам, изученным самостоятельно, может проходить в интерактивной форме в виде дискуссий или презентаций.

Выполнение заданий ведется в тетрадях для СРС или в электронном виде. Второй вид может быть использован для конспектирования.

Подготовка к практическим занятиям представляет собой внеаудиторную самостоятельную работу студентов и заключается в чтении:

- конспекта соответствующей лекции (если она читалась по данной теме);
- соответствующего раздела учебника и первоисточников (основная и дополнительная литература, интернет-ресурсы).

### **4.1 Работа с литературой**

Важной составляющей самостоятельной внеаудиторной подготовки является работа с литературой ко всем видам занятий: семинарским, практическим, при подготовке к зачетам, экзаменам, тестированию, участию в научных конференциях.

Умение работать с литературой означает научиться осмысленно пользоваться источниками. Прежде чем приступить к освоению научной литературы, рекомендуется чтение учебников и учебных пособий.

Существует несколько методов работы с литературой.

Один из них – самый известный – метод повторения: прочитанный текст можно заучить наизусть. Простое повторение воздействует на память механически и поверхностно. Полученные таким путем сведения легко забываются.

Наиболее эффективный метод – метод кодирования: прочитанный текст нужно подвергнуть большей, чем простое заучивание, обработке. Чтобы основательно обработать информацию и закодировать ее для хранения, важно произвести целый ряд мыслительных операций: прокомментировать новые данные; оценить их значение; поставить вопросы; сопоставить полученные сведения с ранее известными.

Для улучшения обработки информации очень важно устанавливать осмысленные связи, структурировать новые сведения.

Изучение научной, учебной и иной литературы требует ведения рабочих записей.

Форма записей может быть весьма разнообразной: простой или развернутый план, тезисы, цитаты, конспект.

План – первооснова, каркас какой-либо письменной работы, определяющие последовательность изложения материала.

План является наиболее краткой и потому самой доступной и распространенной формой записей содержания исходного источника информации. По существу, это перечень основных вопросов, рассматриваемых в источнике. План может быть простым и развернутым. Их отличие состоит в степени детализации содержания и, соответственно, в объеме.

Преимущество плана состоит в следующем.

*Во-первых*, план позволяет наилучшим образом уяснить логику мысли автора, упрощает понимание главных моментов произведения.

*Во-вторых*, план позволяет быстро и глубоко проникнуть в сущность построения произведения и, следовательно, гораздо легче ориентироваться в его содержании.

*В-третьих*, план позволяет – при последующем возвращении к нему – быстрее обычного вспомнить прочитанное.

*В-четвертых*, с помощью плана гораздо удобнее отыскивать в источнике нужные места, факты, цитаты и т. д.

Выписки – небольшие фрагменты текста (неполные и полные предложения, отдельные абзацы, а также дословные и близкие к дословным записи об излагаемых в нем фактах), содержащие в себе квинтэссенцию содержания прочитанного.

Выписки представляют собой более сложную форму записей содержания исходного источника информации. По сути, выписки – не что иное, как цитаты, заимствованные из текста. Выписки позволяют в концентрированной форме и с максимальной точностью воспроизвести в произвольном (чаще последовательном) порядке наиболее важные мысли автора, статистические и даталогические сведения. В отдельных случаях — когда это оправданно с точки зрения продолжения работы

над текстом – вполне допустимо заменять цитирование изложением, близким к дословному.

Тезисы – сжатое изложение содержания изученного материала в утвердительной (реже опровергающей) форме.

Отличие тезисов от обычных выписок состоит в следующем. *Во-первых*, тезисам присуща значительно более высокая степень концентрации материала. *Во-вторых*, в тезисах отмечается преобладание выводов над общими рассуждениями. *В-третьих*, чаще всего тезисы записываются близко к оригинальному тексту, т. е. без использования прямого цитирования.

Исходя из сказанного, нетрудно выявить основное преимущество тезисов: они незаменимы для подготовки глубокой и всесторонней аргументации письменной работы любой сложности, а также для подготовки выступлений на защите, докладов и пр.

Аннотация – краткое изложение основного содержания исходного источника информации, дающее о нем обобщенное представление. К написанию аннотаций прибегают в тех случаях, когда подлинная ценность и пригодность исходного источника информации исполнителю письменной работы окончательно неясна, но в то же время о нем необходимо оставить краткую запись с обобщающей характеристикой. Для указанной цели и используется аннотация.

Характерной особенностью аннотации наряду с краткостью и обобщенностью ее содержания является и то, что пишется аннотация всегда после того, как (хотя бы в предварительном порядке) завершено ознакомление с содержанием исходного источника информации. Кроме того, пишется аннотация почти исключительно своими словами и лишь в крайне редких случаях содержит в себе небольшие выдержки оригинального текста.

Резюме – краткая оценка изученного содержания исходного источника информации, полученная, прежде всего, на основе содержащихся в нем выводов. Резюме весьма сходно по своей сути с аннотацией. Однако, в отличие от последней, текст резюме концентрирует в себе данные не из основного содержания исходного источника информации, а из его заключительной части, прежде всего выводов. Но,

как и в случае с аннотацией, резюме излагается своими словами – выдержки из оригинального текста в нем практически не встречаются.

Конспект – сложная запись содержания исходного текста, включающая в себя заимствования (цитаты) наиболее примечательных мест в сочетании с планом источника, а также сжатый анализ записанного материала и выводы по нему.

*Для работы над конспектом следует:*

- определить структуру конспектируемого материала, чему в значительной мере способствует письменное ведение плана по ходу изучения оригинального текста;
- в соответствии со структурой конспекта произвести отбор и последующую запись наиболее существенного содержания оригинального текста — в форме цитат или в изложении, близком к оригиналу;
- выполнить анализ записей и на его основе – дополнение записей собственными замечаниями, соображениями, "фактурой", заимствованной из других источников и т. п. (располагать все это следует на полях тетради для записей или на отдельных листах-вкладках);
- завершить формулирование и запись выводов по каждой из частей оригинального текста, а также общих выводов.

Систематизация изученных источников позволяет повысить эффективность их анализа и обобщения. Итогом этой работы должна стать логически выстроенная система сведений по существу исследуемого вопроса.

Необходимо из всего материала выделить существующие точки зрения на проблему, проанализировать их, сравнить, дать им оценку.

Обзор – краткое точное изложение сущности какого-либо вопроса, темы на основе одной или нескольких книг, монографий или других первоисточников. Обзор должен содержать основные фактические сведения и выводы по рассматриваемому вопросу.

Обзор выполняет следующие функции:

- информативная;
- поисковая;



- справочная;
- сигнальная;
- индикативная;
- коммуникативная.

Степень выполнения этих функций зависит от содержательных и формальных качеств обзора, а также от того, кто и для каких целей их использует. Язык обзора должен отличаться ясностью, точностью, краткостью и простотой. Содержание следует излагать объективно от имени автора.

При оценке обзора учитывается не только качество реферирования прочитанной литературы, но и аргументированное изложение собственных мыслей студента по рассматриваемому вопросу. Результат работы студента оценивается преподавателем по бальной системе. Также допускается оценивать работы, удовлетворяющие или не удовлетворяющие предъявляемым требованиям, «зачтено» или «не зачтено» соответственно.

Письменный обзор должен содержать следующие структурные элементы: титульный лист, заполненный по единой форме; оглавление с указанием всех разделов обзора и номерами страниц; введение объемом не более 1,5-2 печатные страницы; основная часть, которая содержит одну или несколько глав, состоящих из 2-3 параграфов (пунктов, разделов); заключение, которое содержит главные выводы основной части, и в котором отмечается выполнение задач и достижение цели, сформулированных во введении; приложения, включающие график и таблицы (если таковые имеются); библиографическое описание использованных источников оформленных по ГОСТ 7.82–2001, ГОСТ 7.1-2003. В тексте обзора обязательны ссылки на первоисточники.

Печатный вариант работы выполняется на белой бумаге формата А4 (210x297 мм). Текст работы излагается на одной стороне листа. Все линии, цифры, буквы и знаки работы должны быть черного цвета.

Текст обзора, рисунки, формулы, таблицы, а также номера страниц не должны выходить за пределы двухсантиметровой рамки листа А4. Номера страниц должны быть проставлены внизу по центру. При использовании текстового редактора Word, для выполнения этих условий необходимы следующие настройки:

- размер бумаги А4;
- поля слева, сверху, справа по 2 см, нижнее поле 2,5 см, расстояние от нижнего края страницы до нижнего колонтитула 2 см;
- номер страницы – внизу по центру.

Основной текст обзора быть должен быть набран шрифтом Times New Roman, размер 14 пт, начертание обычное, через полуторный интервал, выравнивание по ширине страницы. Для оформления таблиц и подписей к рисункам допускается Times New Roman, размер 12 пт.

Название каждой главы начинается с новой страницы, объем главы не может быть меньше 5 страниц. Заголовки и подзаголовки должны быть выделены и отличаться от основного текста (шрифтом, жирностью, курсивом и пр.). Подзаголовки следует отделять от основного текста сверху двумя строками, снизу – одной. В тексте должны отсутствовать сокращения, кроме общепринятых ГОСТ 7.88–2003, общепринятые или необходимые сокращения при первоначальном употреблении должны быть расшифрованы. Каждый рисунок, график или таблица в письменном обзоре должны быть пронумерованы и иметь заголовки или подпись. При наличии в обзоре ссылок на использованные научные или нормативные источники, ссылки должны быть оформлены в соответствии с установленной формой по ГОСТ 7.32–2001.

Письменный обзор должен быть переплетен в обложку или помещен в папку–скоросшиватель (картонную или пластиковую).

Письменный обзор должен быть предоставлен в установленный преподавателем срок. В случае несвоевременного представления работы, Письменный обзор не проверяется преподавателем и не зачитывается как выполненный.

В процессе работы над обзором можно выделить 4 этапа:

- вводный – выбор темы, работа над планом и введением;
- основной – работа над содержанием и заключением обзора;
- заключительный – оформление обзора;
- защита обзора (на практическом занятии, экзамене, студенческой конференции и т.д.)

Работа над обзором начинается с выбора темы исследования. Заинтересованность автора в проблеме определяет качество проводимого исследования и соответственно успешность его защиты. Выбирая круг вопросов своей работы, не стоит спешить воспользоваться списком тем, предложенным преподавателем. Надо попытаться сформулировать проблему своего исследования самостоятельно. При определении темы обзора нужно учитывать и его информационную обеспеченность. С этой целью, во-первых, можно обратиться к библиотечным каталогам, а во-вторых, проконсультироваться с преподавателем и библиотекарем.

Выбрав тему обзора и изучив литературу, необходимо сформулировать цель работы и составить план обзора. Возможно, формулировка цели в ходе работы будет меняться, но изначально следует ее обозначить, чтобы ориентироваться на нее в ходе исследования. Определяясь с целью дальнейшей работы, параллельно надо думать над составлением плана: необходимо четко соотносить цель и план работы.

План – это точный и краткий перечень положений в том порядке, как они будут расположены в обзоре, этапы раскрытия темы. Существует два основных типа плана: простой и сложный (развернутый). В простом плане содержание обзора делится на параграфы, а в сложном на главы и параграфы. При работе над планом обзора необходимо помнить, что формулировка пунктов плана не должна повторять формулировку темы.

При работе над введением необходимо опираться на навыки, приобретенные при написании изложений и сочинений. В объеме обзора введение, как правило, составляет 1-2 машинописные страницы. Введение обычно содержит вступление, обоснование актуальности выбранной темы, формулировку цели и задач обзора, краткий обзор литературы и источников по проблеме, историю вопроса и вывод. Содержание обзора должно соответствовать теме, полно ее раскрывать. Все рассуждения нужно аргументировать. Обзор показывает объективное отношение автора к излагаемому материалу. Следует стремиться к тому, чтобы изложение было ясным, простым и точным.

Заключение – самостоятельная часть обзора. Оно не должно быть переложением содержания работы. Заключение должно содержать основные выводы в сжа-

той форме, а также оценку полноты и глубины решения тех вопросов, которые вставляли в процессе изучения темы.

Объем заключения не должен превышать 2 печатных страниц.

Типичными ошибками, допускаемыми студентами при подготовке обзора, являются:

- недостаточное обоснование актуальности, практической и теоретической значимости полученных результатов, поверхностный анализ используемого материала;
- неглубокие критические оценки и рекомендации по решению исследуемой проблемы;
- поверхностные выводы и предложения;
- нарушение требований к оформлению письменного обзора;
- использование информации без ссылок на источник.

#### **4.2 Критерии оценки для проверки уровня обученности в рамках текущего контроля**

Оценка «отлично» выставляется студенту, если студент показал глубокое, прочное и аргументированное освоение программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт последовательно, четко и логически стройно, в полном исчерпывающем объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, не допущено при ответе ошибок

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если студент показал твердое знание программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт грамотно и по существу, в достаточно полном объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, допущены при ответе отдельные неточности или одна ошибка

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если студент показал знание только основной части учебного материала без его частных деталей, при этом поставленный вопрос раскрыт с нарушением логической последовательности, не в полном объеме; были допущены неточные формулировки основных катего-

рий, понятий и терминов учебного курса, а также ошибки (не более двух) или ряд незначительных неточностей, не исказивших существенно суть ответа.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки (более двух), существенно исказившие его суть. Оценка неудовлетворительно выставляется также, если отсутствует ответ на вопрос, либо студент отказался его сдавать.

По результатам опроса в рамках текущего контроля выставляется рейтинговый балл по каждому рейтинговому мероприятию. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом (Таблица 6):

Таблица 6 - Расчет рейтинговых баллов по результатам текущего контроля

| Уровень выполнения контрольного задания | Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание) |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Отличный                                | <b>100</b>                                                           |
| Хороший                                 | <b>80</b>                                                            |
| Удовлетворительный                      | <b>60</b>                                                            |
| Неудовлетворительный                    | <b>0</b>                                                             |

Конкретное значение рейтингового балла определяется распределением рейтинговых баллов по контрольным мероприятиям.

## 5 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### 5.1 Основная литература

1. Афонин, В.В. Моделирование систем Электронный ресурс : учебное пособие / С.А. Федосин / В.В. Афонин. - Моделирование систем, 2019-12-01. - Москва : Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), 2016. - 269 с. - Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks. - ISBN 978-5-9963-0352-6, экземпляров неограничено
2. Валетов, В. А. Технология приборостроения Электронный ресурс : Учебное пособие / В. А. Валетов, К. П. Помпеев. - Технология приборостроения, 2022-10-01. - Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2013. - 234 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 2227-8397, экземпляров неограничено

### 5.2. Дополнительная литература:

1. Болотовский, Ю. И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга / Ю.И. Болотовский, Г.И. Таназлы. - Москва : СОЛОН-ПРЕСС, 2009. - 200 с. - (Библиотека студента). - <http://biblioclub.ru/>. - ISBN 5-98003-178-2
2. Воробьев, Н. И. Проектирование электронных устройств : учеб. пособие для вузов / Н. И. Воробьев. - М. : Высшая школа, 1989. - 223 с. : ил., рис. - Прил.: с. 184-220. - Библиогр.: с.221. - ISBN 5-06-000122-9
3. Гусев, В. Г. Электроника : учеб. пособие для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 1991. - 622 с. : ил. - Гриф: Доп. МО. - Прил.: с. 610-614. - Библиогр.: с. 615-616. - Предм. указ.: с. 617-619. - ISBN 5-06-000681-6
4. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника : учебник для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. - Изд. 4-е, доп. - М. : Высшая школа, 2006. - 798 с. : ил. - (Электронная техника). - Прил.: с. 788-795. - Библиогр.: с. 786-787. - ISBN 5-06-005680-5
5. Джонс, М. Х. Электроника - практический курс / М. Джонс ; пер. с англ. Е. В. Воронова, А. Л. Ларина. - 2-е изд., испр. - М. : Техносфера, 2013. - 512 с. - (Мир электроники). - Прилож.: с. 478-497. - Библиогр.: с. 498-499. - Предм. указ.: с. 500-510. - ISBN 978-5-94836-341-7

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ  
ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
РАЗРАБОТКА УЗЛОВ И БЛОКОВ РЭА

по направлению подготовки

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника  
профиль «Интеллектуальные программируемые системы и устройства»

Составитель: Дюдюн Дмитрий Евгеньевич

Редактор: \_\_\_\_\_

Подписано в печать \_\_\_\_\_  
Формат \_\_\_\_\_ Усл. п. л. – \_\_\_\_\_ Уч.-изд. л. – \_\_\_\_\_.  
Бумага \_\_\_\_\_. Печать \_\_\_\_\_. Заказ Тираж \_\_\_\_\_ экз.  
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»  
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1

---

Издательство Северо-Кавказского федерального университета  
Отпечатано в типографии СКФУ