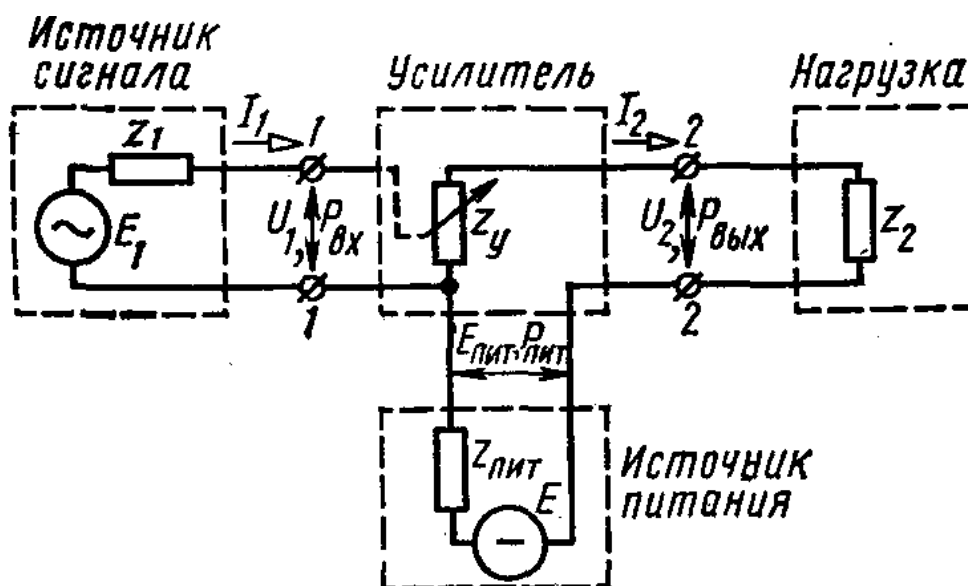




А.П.Кулинич

## СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ (СХЕМОТЕХНИКА)

Методическое пособие по курсовому проектированию для студентов специальностей 210201 – «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и 160905 – «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования»



ТОМСК 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой КИПР

\_\_\_\_\_ В.Н. ТАТАРИНОВ

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

А.П.Кулинич

## **СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ (СХЕМОТЕХНИКА)**

Методическое пособие по курсовому проектированию для студентов специальностей 210201 – «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и 160905 – «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования»

2012

**Рецензент:** профессор кафедры КИПР ТУСУР, д.т.н. Масалов Е.В.

**Технический редактор:** доцент кафедры КИПР ТУСУР, к.т.н. Озеркин Д.В.

**Кулинич А.П.**

Схемотехника электронных средств (Схемотехника). Методическое пособие по курсовому проектированию для студентов специальностей 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и 160905 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования».

Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 43 с.

Методическое пособие предназначено для студентов всех форм обучения высшего специального образования, выполняющих курсовой проект по дисциплине «Схемотехника электронных средств» («Схемотехника»), обучающихся по специальности «Проектирование электронных средств» («Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования»). В пособии приведены краткие теоретические сведения и рекомендации, необходимые для выполнения всех разделов курсового проекта. Справочные данные приведены в минимальном количестве, так как они изложены в достаточном объеме в методических пособиях и практикумах по дисциплинам «Общая электротехника и электроника. Часть 2 – Электроника», «Основы проектирования электронных средств», «Функциональные устройства и электрорадиоэлементы» и др. В списке литературы, рекомендуемой для выполнения курсового проекта, дан перечень учебной, справочной и нормативно-технической литературы, обращение к которой позволит студентам углубить знания по теме курсового проекта.

© Кулинич А.П., 2012

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1 ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
1.1 Общие положения .....	4
1.2 Цель курсового проектирования.....	5
1.3 Стадии разработки технической документации курсового проекта.....	5
1.4 Технические характеристики и требования к УУ .....	6
1.5 Состав курсового проекта .....	8
<b>2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ .....</b>	<b>9</b>
2.1 Принцип действия и структурная схема .....	9
2.2 Технические параметры и характеристики .....	11
<b>3 ВЫБОР СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УУ .....</b>	<b>14</b>
<b>4 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ УУ.....</b>	<b>18</b>
<b>5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТОВ.....</b>	<b>22</b>
5.1 Транзисторы.....	22
5.2 Полупроводниковые диоды .....	27
5.3 Электрические конденсаторы .....	28
5.4 Резисторы .....	30
<b>6 ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ .....</b>	<b>32</b>
<b>7 СОСТАВ УСИЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА.....</b>	<b>33</b>
<b>8 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ .</b>	<b>34</b>
<b>9 ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>36</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, РЕКОМЕНДУЕМОЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....</b>	<b>37</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А - ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ЗАДАНИЯ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ.....</b>	<b>40</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б - ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ..</b>	<b>43</b>

# 1 ВВЕДЕНИЕ

## 1.1 Общие положения

Курсовой проект по дисциплинам «Схемотехника электронных средств» (СЭС) по специальности «Проектирование и технология РЭС» и «Схемотехника» (С) по специальности «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования» посвящен проектированию усилителя – самого распространенного электронного устройства, имеющего как самостоятельное применение, так и являющегося основой устройств суммирования, вычитания, дифференцирования, интегрирования, логарифмирования, антилогарифмирования, фильтрации, перемножения, деления, сравнения сигналов, преобразования сопротивлений, генерирования сигналов различной формы [1,2]. Усилительные каскады входят также в состав цифровых и импульсных электронных устройств, выполняющих операции формирования, преобразования и передачи кодовых последовательностей в виде электрических импульсов.

В ходе выполнения курсового проекта студентам необходимо умение применять:

- методику анализа технического задания на разработку электронного средства (ЭС);
- методы проектирования;
- стандарты по проектированию;
- системы автоматизированного проектирования;
- специальную литературу и другие информационные издания.

Для этого необходимо изучить:

- методические и нормативные материалы по проектированию ЭС;
- технические характеристики лучших отечественных и зарубежных конструкций ЭС;
- расчетные методы анализа и синтеза аналоговой схемотехники;
- современные системы автоматизированного проектирования ЭС;
- конструктивное и функциональное исполнение современных и перспективных ЭС.

Для выполнения курсового проекта и успешной его защиты необходимы глубокие знания и понимание следующих разделов дисциплины СЭС (С) [1,2,6...16]:

- принципы функционирования, характеристики, основные параметры и классификация полупроводниковых диодов, биполярных и полевых транзисторов, режимы работы – активный, насыщения, отсечки;

- схемы включения: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором (ОБ, ОЭ, ОК); основные параметры; эквивалентные схемы усилителей;

- обратная связь и ее влияние на основные показатели и характеристики аналоговых устройств (коэффициент усиления, полоса рабочих частот, входное и выходное сопротивление, линейные (частотные и фазовые) и нелинейные искажения);

- обеспечение и стабилизация режима работы транзисторов по постоянному току ( типовые схемы смещения, методика термостабилизации и термокомпенсации);

- выходные усилительные каскады (эмиттерный повторитель, усилитель мощности на комплементарных транзисторах);

- операционные усилители (ОУ), основные параметры и частотные свойства, схемы включения ОУ (инвертирующий и неинвертирующий усилители), расчет по заданным коэффициенту усиления, полосе пропускания, входному сопротивлению.

## **1.2 Цель курсового проектирования**

Целью курсового проектирования является закрепление знаний по дисциплине СЭС (С) и приобретение навыков разработки проектной конструкторской документации (КД) на усилительное устройство (УУ) – графической и текстовой. КД определяет состав и устройство УУ и содержит необходимые данные для его разработки, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта [31]. Заметим, что к проектным конструкторским документам относятся: техническое предложение (ПТ), эскизный (ЭП) и технический (ТП) проекты [31].

## **1.3 Стадии разработки технической документации курсового проекта**

Данная работа содержит стадии технического предложения и эскизного проекта. Разработку КД начинают с выполнения технического предложения для выявления дополнительных и уточнения заданных требований к УУ (технических параметров и характеристик, состава, схемы и пр.) и для выбора оптимального варианта структурной схемы УУ, обеспечивающей наилучший технический эффект. Оптимизацию наиболее целесообразно выполнять на ЭВМ с использованием математических моделей и количественных методов оптимизации [31]. Вначале целесообразно выполнить ориентировочный (эскизный, прикидочный) расчет вручную или с использованием прикладного пакета [6] для приближенного решения поставленной задачи. При этом надо иметь в виду, что УУ определяются весьма большим набором зачастую противоречивых параметров и характеристик, а проектирование носит многофакторный, итерационный характер и во многом зависит от интуиции, знаний и опыта разработчика [4]. Поэтому неизбежны ошибки, промахи и тупиковые

ситуации, разрешить которые помогут консультации преподавателя, обсуждение с коллегами, изучение известных технических решений и примеров и повторные расчеты.

Для выполнения курсового проекта в срок необходимо придерживаться определенного графика, контрольными точками в котором будут обязательные аудиторные занятия или консультации с отчетностью перед преподавателем. Основными этапами в этом графике могут быть следующие:

1) анализ технического задания (ТЗ), обзор литературы, поиск аналогов и их изучение [1,2,10, 11,16];

2) выбор, обоснование и расчет структурной схемы УУ и формулировка требований к отдельным каскадам [1,4];

3) обоснованный выбор активных элементов (интегральных микросхем, полевых и биполярных транзисторов) с учетом ограничений ТЗ на вид монтажа [1,7...11,14...16];

4) расчет выходного каскада [1,2,4,10,15,29];

5) расчет предварительного и промежуточных каскадов [1,2,4,10,12,15, 16];

6) составление принципиальной схемы УУ и ее электрический расчет [1,2,4,7...16], включая расчет параметров всех активных и пассивных электро-радиоэлементов (ЭРЭ);

7) выбор и обоснование источника вторичного электропитания (ИВЭП) [14...21];

8) оформление пояснительной записки (ПЗ) и графической части курсового проекта (КП) [13,21,24,31].

#### **1.4 Технические характеристики и требования к УУ**

Проектирование УУ в общем случае условно можно разделить на следующие этапы:

- разработка технических требований;
- разработка структурной и/или функциональной схемы;
- разработка электрической принципиальной схемы;
- расчет параметров элементов принципиальной схемы;
- выбор типов и номиналов элементов УУ;
- моделирование УУ и внесение изменений по результатам моделирования;
- макетирование УУ, экспериментальная проверка и снятие характеристик.

Технические требования к УУ формулируются в виде числовых значений его параметров и условий его эксплуатации. Основными параметрами являются следующие:

- входное и выходное сопротивления УУ (или сопротивления источника сигнала и нагрузки);
- коэффициент усиления;
- полоса рабочих частот на заданном уровне частотных искажений;
- коэффициенты нелинейности сигнала, общих гармонических искажений, частотных искажений;
- номинальная выходная мощность и КПД;
- шумовые характеристики и отношение сигнал/шум, защищенность от внешних и внутренних помех;
- показатели надежности;
- амплитудная характеристика и динамический диапазон;
- переходная характеристика или параметры искажения импульсного сигнала;
- стабильность показателей, обычно задаваемая как отношение абсолютного приращения данного показателя к его номинальному значению.

Указанные параметры могут конкретизироваться и дополняться рядом других. Так требования к амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) усилителя определяют обычно значениями коэффициента усиления на определенных частотах, стабильностью коэффициента усиления во времени и при замене элементов схемы, а также при изменении температуры внешней среды и при изменении напряжения питающей сети. Таким образом, перечень параметров может быть очень широким и использовать все значения при расчетах довольно затруднительно, поэтому проектирование осуществляют исходя из некоторых основных параметров. По мере разработки и расчета схемы проверяют, насколько она отвечает всему комплексу параметров и, в случае необходимости, ее изменяют, дополняют, вводят новые узлы, создают обратные связи, цепи коррекции и т.п. Окончательное заключение о соответствии параметров УУ требованиям ТЗ выносится после экспериментальной проверки его макета. На этом этапе в схему и конструкцию УУ вносятся коррективы, накладываемые техническими возможностями производства и программой выпуска готовой продукции. В данном проекте за исходные параметры примем следующие:

- сопротивления нагрузки и источника сигнала;
- ЭДС источника сигнала и максимальная мощность, отдаваемая УУ в нагрузку;
- верхняя и нижняя граничные частоты;
- уровень частотных искажений.



## 1.5 Состав курсового проекта

Курсовой проект является учебным и поэтому не преследует цель полного соответствия проектных документов требованиям ЕСКД как по обязательной комплектности КД, так и по их содержанию. Однако это обстоятельство не освобождает студента-проектировщика от выполнения требований ЕСКД по оформлению ПЗ и графической части КП.

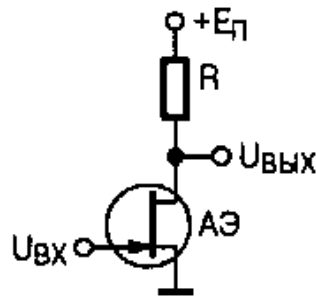
Перечень необходимых документов КП может быть как индивидуальным, так и общим на всю группу. Поскольку комплектность КД для каждой стадии устанавливаются ГОСТ и ТЗ на разрабатываемые устройства, то текстовыми документами в данном КП, согласно ТЗ, являются: таблицы, расчеты, программа и методика испытаний, а также документы эксплуатационные (для изучения устройства и правил его эксплуатации): техническое описание, инструкция по эксплуатации и инструкция по обслуживанию. Эти документы в данном КП составляются в виде «Рекомендаций». При составлении «Рекомендаций» можно использовать результаты и материалы, полученные при выполнении лабораторных работ по дисциплине.

## 2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

### 2.1 Принцип действия и структурная схема

Усилитель предназначен для усиления мощности входного сигнала с помощью активных элементов путем преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала. Активными элементами в усилителях могут быть биполярные и полевые транзисторы и интегральные микросхемы. Такие усилители принято называть полупроводниковыми. В усилителе входной сигнал управляет передачей энергии источника питания в нагрузку [1,2, 14].

Принцип действия усилительного каскада поясним с помощью схемы, приведенной на рисунке 2.1. Основой резистивного (апериодического) усилителя являются: нагрузочный элемент с сопротивлением  $R$  (например, резистор), источник питания с напряжением  $E_{\Pi}$  и активный элемент АЭ (например, полевой транзистор), сопротивление которого изменяется под действием входного сигнала  $U_{ВХ}$ . За счет изменения сопротивления АЭ изменяется ток, протекающий от источника питания с напряжением  $E_{\Pi}$  в цепи резистор  $R$  – сток-исток транзистора. В результате будет меняться падение напряжения на резисторе, следовательно, и выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$ .

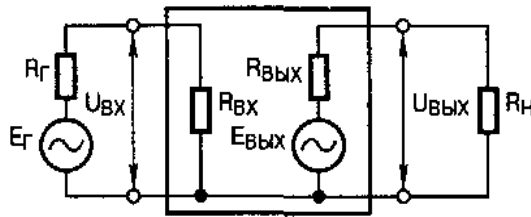


**Рисунок 2.1 – Схема резистивного усилителя с общим истоком на полевом транзисторе с  $p$ - $n$  переходом [14]**

В правильно спроектированном усилителе напряжения нетрудно получить  $U_{ВЫХ} > U_{ВХ}$ . Если напряжение  $U_{ВЫХ}$  снимается относительно отрицательного полюса источника питания, к которому подсоединен исток транзистора, то входное и выходное напряжения противофазны. Если же  $U_{ВЫХ}$  снимается относительно положительного полюса, то эти напряжения синфазны.

На структурной схеме усилительного каскада (рисунок 2.2) усилитель представлен как активный четырехполюсник с общей шиной для входа и выхода. Источник входного сигнала показан в виде генератора с напряжением  $E_{Г}$  и сопротивлением  $R_{Г}$ . На выходе усилителя подключено сопротивление нагрузки  $R_{Н}$ . Сопротивления  $R_{Н}$  и  $R_{Г}$  оказывают существенное влияние на ра-

боту усилителя. Усилитель на рисунке 2.2 представляется своими входным  $R_{ВХ}$  и выходным  $R_{ВЫХ}$  сопротивлениями.



**Рисунок 2.2 – Структурная схема усилительного каскада [14]**

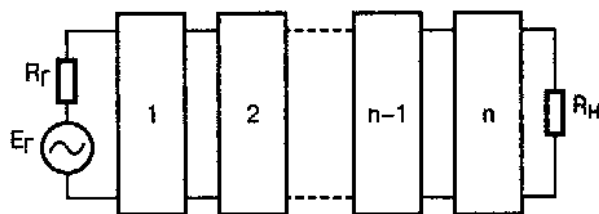
Различают усилители напряжения, тока и мощности, хотя все они усиливают входной сигнал по мощности.

Принято подразделять усилительные каскады по соотношениям величин  $R_{ВХ}$  и  $R_{Г}$ . Если  $R_{ВХ} \gg R_{Г}$ , то усилитель имеет потенциальный вход и является усилителем напряжения. В усилителе тока  $R_{ВХ} \ll R_{Г}$ , т.е. имеет место токовый вход. В усилителе мощности вход усилителя согласован с выходным сопротивлением источника входного сигнала, т.е.  $R_{ВХ} \approx R_{Г}$ .

По соотношению между величинами  $R_{ВЫХ}$  и  $R_{Н}$  усилители также можно разделить на усилители напряжения с потенциальным выходом  $R_{ВЫХ} \ll R_{Н}$ , усилители тока с токовым выходом  $R_{ВЫХ} \gg R_{Н}$  и усилители мощности, которые работают на согласованную нагрузку  $R_{ВЫХ} \approx R_{Н}$ .

В усилителе мощности КПД не превышает 50%. Для получения более высокого КПД необходимо стремиться к условию  $R_{ВЫХ} \ll R_{Н}$ .

Усилитель может состоять из нескольких усилительных каскадов (рисунок 2.3) [14]. Каскады нумеруются в возрастающем порядке от входа к выходу. Нагрузкой первого каскада является входное сопротивление второго каскада, а источником входного сигнала для второго каскада – выход первого каскада и т.д. Первый каскад называют входным, предпоследний – предвыходным или предоконечным, последний – выходным или окончательным, а каскады, расположенные между входным и предвыходным, – промежуточными. Входной каскад осуществляет согласование усилителя с источником входного сигнала, поэтому усилитель напряжения должен иметь большое входное сопротивление по сравнению с сопротивлением источника входного сигнала. В усилителях слабых сигналов необходимо, чтобы входной каскад имел минимальный коэффициент шума.



**Рисунок 2.3 – Структурная схема многокаскадного усилителя [14]**

Выходной каскад многокаскадного усилителя чаще всего является усилителем мощности и работает на низкоомную нагрузку. Поэтому он должен иметь большую выходную мощность, малое выходное сопротивление, высокий коэффициент полезного действия и малый коэффициент гармоник. Промежуточные каскады необходимы для обеспечения заданного коэффициента усиления по напряжению.

Соединение каскадов между собой в многокаскадном усилителе осуществляется различными способами. В усилителях переменного тока межкаскадная связь реализуется с помощью разделительных конденсаторов (усилитель с емкостной связью). В усилителях постоянного тока используется непосредственная (гальваническая) связь, которая широко используется в интегральных микросхемах (ИМС). В усилителях используются также трансформаторная, оптическая (при помощи оптронов), акустическая и другие виды связи между каскадами. Эти же виды связи могут быть использованы и для соединения источника входного сигнала и нагрузки с усилителем.

## 2.2 Технические параметры и характеристики

Основным параметром усилителя является коэффициент усиления. Различают коэффициенты усиления: по напряжению  $K_U = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$ , по току  $K_I = I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}}$  и по мощности  $K_P = P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}} = K_U K_I$ .

Общий коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов, например:

$$K_{\Sigma} = 20 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 20 \lg \frac{\sqrt{2P_{\text{H}} R_{\text{H}}}}{U_{\text{ВХ}}},$$

$$K_U = K_{U1} K_{U2} K_{U3} \dots K_{Un}.$$

Коэффициенты усиления часто выражают в логарифмических единицах – децибелах (дБ):

$$K_U \text{ (дБ)} = 20 \lg(U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}) = 20 \lg K_U,$$

$$K_P \text{ (дБ)} = 10 \lg(P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}) = 10 \lg K_P.$$

Выражение коэффициентов усиления в децибелах связано с тем, что человеческий слух реагирует на звуковые колебания в соответствии с логарифмическим законом слухового восприятия (закон Вебера-Фехнера).

Если коэффициент усиления каждого каскада выражен в децибелах, то общее усиление многокаскадного усилителя равно сумме коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K_U \text{ (дБ)} = K_{U1} + K_{U2} + K_{U3} + \dots + K_{Un}.$$

При усилении сигнала возможно изменение его формы. Отклонение формы выходного сигнала от формы входного сигнала называют искажениями. Искажения бывают нелинейные и линейные.

Нелинейные искажения возникают из-за нелинейности вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзисторов усилителя. Нелинейные искажения могут создавать и межкаскадные конденсаторы. При подаче на вход усилителя сигнала синусоидальной формы выходной сигнал не является чисто синусоидальным, он будет содержать высшие гармонические составляющие. Нелинейные искажения оцениваются коэффициентом гармоник (коэффициентом нелинейных искажений):

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{U_1},$$

где  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  – напряжения гармоник выходного сигнала в нагрузке усилителя для первой, второй и третьей гармоник соответственно.

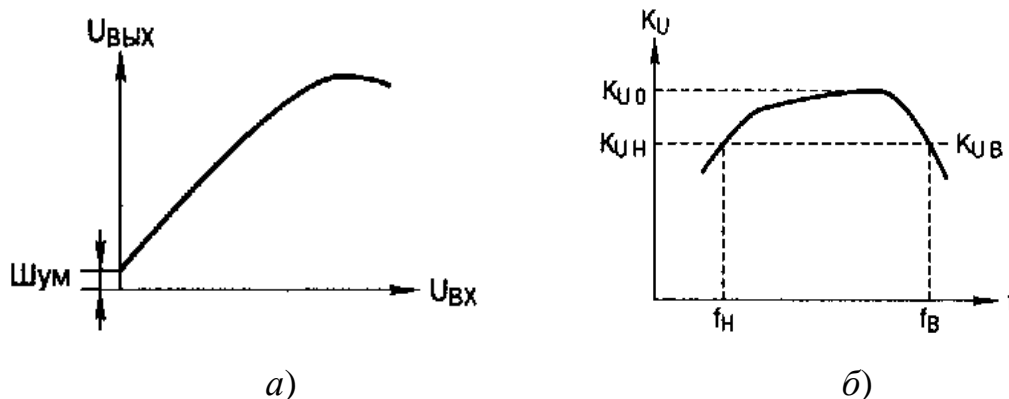
При оценке нелинейных искажений зачастую учитывают только вторую и третью гармоники, поскольку более высокие гармоники имеют малые величины напряжения. В многокаскадных усилителях общий коэффициент гармоник можно принять равным сумме коэффициентов гармоник отдельных каскадов. Основные искажения обычно вносятся выходным каскадом, который работает при больших амплитудах входных сигналов. Для приближенной оценки нелинейных искажений можно воспользоваться амплитудной характеристикой усилителя (рисунок 2.4, а), представляющей собой зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного на средней частоте. При небольших входных напряжениях амплитудная характеристика практически линейна, а угол наклона определяется коэффициентом усиления на данной частоте. Изменение угла наклона при увеличении входного напряжения указывает на появление нелинейных искажений выходного сигнала. Личейные искажения возникают из-за зависимостей параметров транзисторов и параметров реактивных элементов (конденсаторов и катушек индуктивностей) от частоты. Величина этих искажений зависит от частоты усиливаемого сигнала. Зависимость коэффициента усиления от частоты входного сигнала называют амплитудно-частотной (частотной) характеристикой. С помощью АЧХ (рисунок 2.4, б) можно определить коэффициенты частотных искажений на нижней  $M_H$  и верхней  $M_B$  граничных частотах усилителя:

$$M_H = K_{U0}/K_{UH},$$

$$M_B = K_{U0}/K_{UB}.$$

Обычно допустимые значения коэффициентов частотных искажений не превышают 3 дБ. Отметим, что полосой пропускания усилителя называется полоса от нижней граничной до верхней граничной частоты [14].

В усилителях низких (звуковых) частот полоса пропускания обычно составляет 20 Гц...20 кГц. В широкополосных усилителях верхняя граничная частота может достигать десятков мегагерц. В узкополосных селективных (частотно-избирательных) усилителях  $f_H \approx f_B$ ; в усилителях постоянного тока  $f_H = 0$ , а  $f_B$  может составлять десятки мегагерц.



**Рисунок 2.4 – Амплитудная (а) и амплитудно-частотная (б) характеристика**

В усилителях возникают фазовые сдвиги между входным и выходным сигналами, которые могут привести к появлению фазовых искажений. Фазовые искажения возникают лишь при нелинейной зависимости фазового сдвига от частоты. Зависимость фазового сдвига от частоты называют фазочастотной (фазовой) характеристикой (ФЧХ). Частотные и фазовые искажения являются линейными искажениями и обусловлены наличием реактивных элементов в схеме усилителя. Большим частотным искажениям соответствуют большие фазовые искажения и наоборот.

Важными параметрами усилителя являются также КПД, коэффициент шума, стабильность, устойчивость, чувствительность к внешним помехам, дифференциально-фазовые и интермодуляционные искажения и др. Важнейшим параметром усилителей мощности является коэффициент полезного действия  $\eta$ :

$$\eta = P_H/P_0,$$

где  $P_H$  – мощность, выделяемая в нагрузке;  $P_0$  – мощность, потребляемая усилителем от источника питания.

КПД всего усилителя определяется главным образом КПД выходного каскада.

Все параметры и характеристики усилителя зависят от числа каскадов, от типа активного элемента (транзистора), от способа его включения в усилительном каскаде и от величин пассивных элементов каскадов.

### 3 ВЫБОР СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УУ

С помощью одиночного каскада трудно обеспечить желаемое усиление сигналов, необходимые свойства усилительной схемы по ее входному или выходному сопротивлению, требуемые по условиям работы предельные значения выходных токов и напряжений. В связи с этим усилительные тракты приходится выполнять по сложной многокаскадной схеме, включающей несколько последовательно соединенных каскадов [1...4,14].

В общей структуре многокаскадного усилительного тракта можно выделить три основных звена. Это входной каскад, один или несколько каскадов предварительного усиления, выходной каскад. На входной каскад помимо основной функции (функции усиления) возложена задача согласования выходного сопротивления источника сигнала с входным сопротивлением усилительного тракта. Под согласованием здесь понимаются мероприятия по повышению коэффициента передачи входной цепи, что достигается за счет использования во входном каскаде схемных конфигураций с повышенным входным сопротивлением. Так, включение на входе усилительного тракта дополнительного каскада с ОК или с общим стоком (ОС) хотя и не приводит к повышению коэффициента усиления по напряжению самого тракта, но приближает значение коэффициента передачи входной цепи к его предельному значению равному единице.

Во входном каскаде стремятся располагать и органы регулировки усиления, при этом цепи регулировки во избежание возможной перегрузки усилительного прибора сигналами большого уровня по возможности располагают до его входных зажимов. В ряде случаев к усилительному тракту предъявляется требование предельной чувствительности. При этом схемное и конструктивное выполнение входного каскада должно быть реализовано с учетом его маломощного построения, предполагающего использование основных схем включения усилительного прибора (включение с ОЭ и с общим истоком (ОИ)), отказ от применения во входных каскадах полевых транзисторов с изолированным затвором.

Основной функцией каскадов промежуточного усиления является обеспечение усиления по напряжению. Обычно эти каскады обладают большим усилением, в связи с чем при их организации особое внимание обращается на обеспечение устойчивой и стабильной работы.

Выходные каскады предназначены для обеспечения в нагрузке требуемых, обычно больших, сигнальных токов и напряжений, т.е. больших сигнальных мощностей. Поэтому их часто называют усилителями мощности.

Правильный выбор структурной схемы УУ упрощает разработку его принципиальной схемы. По виду структурной схемы УУ можно разделить на следующие три группы [3].

К первой группе относятся такие усилители, у которых нестабильность коэффициента усиления составляет несколько децибел, коэффициент общих гармонических искажений (коэффициент гармоник) – несколько процентов, коэффициент шума более 15...20 дБ. Ширина рабочего диапазона частот не превышает несколько октав. Такие усилители могут не иметь общей отрицательной обратной связи (ООС), однако местные обратные связи (МОС) обычно имеются. Структурная схема УУ в этом случае представляет собой соединение предварительного, ряда промежуточных, предоконечного и окончного каскадов. Вид окончного каскада и класс усиления определяются величинами выходной мощности в нагрузке и КПД. Если мощность не превышает несколько десятков милливатт, то в качестве выходного может использоваться промежуточный каскад.

Ко второй группе относятся такие усилители, у которых выполняются два-три ниже перечисленных требования:

- нестабильность коэффициента усиления менее 1 дБ;
- выходное сопротивление значительно меньше сопротивления нагрузки ( $R_{\text{ВЫХ}} \ll R_{\text{Н}}$ );
- ширина диапазона рабочих частот составляет несколько декад;
- неравномерность АЧХ менее 1 дБ;
- коэффициент шума менее 15 дБ.

Усилители этой группы имеют общую ООС какого-либо вида, охватывающую окончный и промежуточный каскады, а также местные ООС в нескольких каскадах.

К третьей группе относятся усилители с большинством перечисленных во второй группе требований. Такие усилители имеют местную ООС во всех каскадах и несколько петель общей ООС.

Для обеспечения требуемого коэффициента усиления (как правило большого), входного и выходного сопротивлений, мощности в нагрузке УУ выполняют по многокаскадной схеме, включающей несколько последовательно соединенных каскадов: входной, один или несколько предварительных и выходной. Входной каскад осуществляет усиление и согласование выходного сопротивления источника сигнала с входным сопротивлением усилительного тракта. Если выходное сопротивление источника сигнала конечно, то напряжение на входе усилительного каскада будет тем ближе к ЭДС источника сигнала, чем больше входное сопротивление каскада ( $R_{\text{ВХ}} \gg R_{\text{С}}$ ). Во входном каскаде также целесообразно располагать и цепи регулировки усиления (если они требуются).

Повышение чувствительности УУ достигается также схемным и конструктивным исполнением входного каскада (схемы ОЭ или ОИ), выбором малошумящих транзисторов, повышением коэффициента усиления входного каскада, оптимальным режимом работы транзистора, включением противозумовой коррекции, оптимальной фильтрацией и пр.



Промежуточные каскады должны обеспечить основное усиление по напряжению, обладать высокой стабильностью и устойчивостью.

Выходные каскады должны обеспечить в нагрузке заданные: ток (усилитель тока), напряжение (усилитель напряжения), или мощность (усилитель мощности). Наличие защиты выходных каскадов (тепловой, от короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ)) усложняет их схемную и конструктивную реализацию, что накладывает дополнительные ограничения на энергетические параметры и частотные характеристики всего УУ.

Во входном каскаде также целесообразно располагать и цепи регулировки усиления (если они требуются).

На этапе выбора структурной схемы выполняют примерное распределение требований по функциональным узлам, используя известные рекомендации, полученные на основе опыта проектирования подобных УУ [3,4,10,11, 29]. Так, считается, что усиление напряжения на один каскад должно составлять 20 дБ; первый предварительный каскад, обычно согласующий, по схеме ОК, имеет усиление 0 дБ; последний, выходной каскад также имеет схему ОК, поэтому все усиление напряжения обеспечивают промежуточные каскады (усиление всего усилителя равно сумме усиления отдельных каскадов). Зная суммарный коэффициент усиления напряжения:

$$K_{\Sigma} = 20 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 20 \lg \frac{\sqrt{2P_{\text{H}} R_{\text{H}}}}{U_{\text{ВХ}}},$$

находим количество промежуточных каскадов:

$$n = \frac{K_{\Sigma}}{20}.$$

Если сопротивление источника сигнала  $R_{\text{C}}$  сравнимо с входным сопротивлением  $R_{\text{ВХ}}$  предварительного каскада, то необходимо учесть коэффициент передачи напряжения от источника сигнала во входной каскад.

Так как  $U_{\text{ВХ}} = \frac{E}{R_{\text{C}} + R_{\text{ВХ}}} R_{\text{ВХ}}$  то,

$$K_{\Sigma} = 20 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 20 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}} (R_{\text{C}} + R_{\text{ВХ}})}{E R_{\text{ВХ}}} = 20 \lg \left[ \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E} \left( 1 + \frac{R_{\text{C}}}{R_{\text{ВХ}}} \right) \right].$$

Расчетные значения  $U_{\text{ВЫХ}}$  или  $P_{\text{H}}$  необходимо брать на 10...20% больше заданного по ТЗ.

Частотные искажения распределяют поровну между каскадами, если не предъявляются требования по согласованию входного и выходного сопротивлений усилителя с внешними цепями. Тогда коэффициент частотных искажений (в дБ) на один каскад в области нижних  $M_{\text{Нi}}$  и в области верхних  $M_{\text{Вi}}$  частот находят по формулам [4]. Для многокаскадного УУ, содержащего  $n$  каскадов, результирующий коэффициент частотных искажений в области верхних частот (ВЧ) определяется следующим выражением:

$$M_B = \sum_{i=1}^{n+1} M_{Bi},$$

где  $M_B$  – результирующий коэффициент частотных искажений в области ВЧ, дБ;  $M_{Bi}$  – коэффициент частотных искажений  $i$ -го каскада, дБ.

Суммирование в выражении производится  $(n + 1)$  раз из-за необходимости учета влияния входной цепи, образованной  $R_{Г}$ ,  $R_{ВХ}$ ,  $C_{ВХ}$ .

Предварительно распределить искажения можно равномерно, при этом:

$$M_{Bi} = \frac{M_B}{n+1}.$$

В последующем, исходя из результатов промежуточных расчетов, возможно перераспределение искажений между каскадами.

Частотные искажения УУ в области нижних частот (НЧ) определяются следующим соотношением:

$$M_H = \sum_{i=1}^N M_{Hi},$$

где  $M_H$  – результирующий коэффициент частотных искажений в области НЧ, дБ;  $M_{Hi}$  – искажения, приходящиеся на  $i$ -ый элемент, дБ;  $N$  – количество элементов, вносящих искажения на НЧ.

Количество элементов, вносящих искажения на НЧ (обычно это блокировочные в цепях эмиттеров и разделительные межкаскадные конденсаторы), становится известным после разработки принципиальной электрической схемы УУ. Поэтому распределение искажений в области НЧ проводят на этапе расчета номиналов этих элементов. При равномерном распределении низкочастотных искажений, их доля (в децибелах) на каждый из  $N$  элементов определяется из формулы:

$$M_{Hi} = \frac{M_H}{N}.$$

На практике, с целью выравнивания номиналов конденсаторов, на разделительные конденсаторы распределяют больше искажений, чем на блокировочные.

Номинальную выходную мощность в нагрузку (при которой искажения не превышают заданные) обеспечивает выходной каскад; он должен отдавать

в нагрузку мощность, превышающую  $P_H$  в  $\frac{1}{\eta_{\text{СОГЛ}} \eta_{\text{ТРАН}}}$  раз, где  $\eta_{\text{СОГЛ}}$ ,  $\eta_{\text{ТРАН}}$

коэффициенты потерь мощности в согласующих и трансформирующих цепях. Считают, что нелинейные искажения многокаскадного УУ полностью определяются нелинейностью выходного каскада, а коэффициент шума УУ (или приведенные ко входу УУ шумовые напряжения) – входным каскадом.

#### 4 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ УУ

Рекомендуется следующий порядок разработки принципиальной схемы [1...4,10,29]:

- выбираем схемы входного и выходного каскадов;
- выбираем транзисторы выходного каскада, схему и выполняем расчет;
- определяем число промежуточных каскадов и выбираем транзисторы;
- разрабатываем принципиальную схему, выбрав схему межкаскадных связей, местных ООС, цепей смещения и фильтрации.

Расчет выходного каскада начинают с выбора транзистора, который подбирают по максимально допустимой постоянной мощности рассеяния коллектора, граничной частоте и максимально допустимым токам и напряжениям.  $P_{\max}$  – наибольшая мощность, рассеиваемая в транзисторе при температуре окружающей среды  $T_C$  (или  $T_K$ ). Значение максимальной мощности  $P_{\max}$ , допустимое при заданной температуре корпуса  $T_K$  или окружающей среды  $T_C$ , отличной от той температуры, при которой дано  $P_{K \max}$  определяют по формулам:

$$P_{\max}(T_K) = \frac{T_{П\max} - T_K}{R_{ТПК}},$$

$$P_{\max}(T_C) = \frac{T_{П\max} - T_C}{R_{ТПС}},$$

где  $P_{\max}$  – наибольшая мощность, рассеиваемая в транзисторе при температуре окружающей среды ( $T_C$ ) или корпуса ( $T_K$ );  $T_{П\max}$  – максимально допустимая температура  $p$ - $n$ -перехода;  $R_{ТПК}$  – тепловое сопротивление переход-корпус;  $R_{ТПС}$  – тепловое сопротивление переход-окружающая среда.

Величина  $P_{\max}$  должна удовлетворять неравенству:

$$P_{\max} \geq \frac{P_H}{K_{СОГЛ} K_{ИСП} K_{НАГР}},$$

где  $K_{СОГЛ}$  – КПД цепей согласования ( $K_{СОГЛ} = 0.9$  при согласовании комбинированной ООС);  $K_{ИСП}$  – коэффициент использования транзистора по мощности ( $K_{ИСП} = 0.25$  для усилителей с нелинейными искажениями менее 1% и  $K_{ИСП} = 0.4$  при нелинейных искажениях более 1%);  $K_{НАГР}$  – коэффициент нагрузки транзистора, равный отношению мощности, рассеиваемой транзистором при работе, к предельно допустимой при заданной температуре окружающей среды (в усилителях с высокой надежностью  $K_{НАГР} = 0.35 \dots 0.65$ ).

Если в выходном каскаде используется несколько ( $n$ ) транзисторов (параллельное или двухтактное включение транзисторов), то полученное значение  $P_{\max}$  должно быть уменьшено в  $n$  раз. Если транзисторы работают в режимах АВ или В, то величина  $K_{ИСП}$  принимается соответственно равной 0.55 или 0.75.

Правильно спроектированный усилитель [11] должен иметь очень низкий шум без применения специальных малошумящих резисторов. Резистор общей ООС должен иметь мощность не менее 0.25 Вт и небольшой температурный коэффициент сопротивления, чтобы избежать интермодуляционных искажений из-за тепловой девиации коэффициента передачи. Здесь недопустимо также применение проволочных резисторов с высокой паразитной индуктивностью из-за опасности потери устойчивости широкополосного усилителя. Подходящими являются металлопленочные резисторы С2-23, С2-29В, С5-61.

В усилителях высокой мощности для развязки каскадов по постоянному току используют высоконадежные металлопленочные или полистирольные конденсаторы (например, К73-17). В усилителях малой мощности используют танталовые или алюминиевые конденсаторы, включенные встречно-последовательно, одноименными полюсами друг к другу, т.е. по неполярной схеме, с многократным, до 10 раз, запасом по емкости, так как на нижних частотах, когда напряжение на конденсаторах увеличивается, они могут вносить значительные нелинейные искажения в усиливаемый сигнал (так называемые «конденсаторные» искажения) [11]. Это позволяет уменьшить падение напряжения на реактивных сопротивлениях конденсаторов и, следовательно, уменьшить нелинейные «конденсаторные» искажения на нижних частотах.

Емкость накопительных конденсаторов в источнике питания должна быть не менее 1000 мкФ на каждые 10 Вт выходной мощности усилителя при  $P_{\text{вых}} \geq 50$  Вт. Это позволяет предотвратить возникновение нелинейных искажений из-за ограничения тока коллектора выходного каскада при резком возрастании уровня входного сигнала.

Граничную частоту коэффициента передачи тока базы транзистора в схеме ОЭ (ОК) определяют из условия:

$$f_{\text{гр}} \geq (0.65 \dots 0.82) h_{21Э} f_{\text{Вi}},$$

где  $f_{\text{Вi}}$  – верхняя граничная частота одного каскада;

$$f_{\text{Вi}} = \sqrt{M} f_{\text{В}},$$

где  $M$  – число каскадов в усилителе;  $f_{\text{В}}$  – верхняя граничная частота всего усилителя.

Исходя из типичных значений параметра  $h_{21Э}$  высокочастотных транзисторов средней и большой мощности, и для определения граничной частоты транзисторов выходного каскада используют приближенную формулу:

$$f_{\text{гр}} \geq (40 \dots 100) f_{\text{Вi}}.$$

Если выбранный транзистор не удовлетворяет этому неравенству, то расширить АЧХ усилителя в области верхних частот можно либо применением цепей амплитудно-частотной коррекции, либо выбором более высокочастотного транзистора. Применение в выходных каскадах транзисторов с излишне высокими значениями граничной частоты нежелательно ввиду их высокой стоимости и склонности к самовозбуждению.

Расчет выходного каскада выполняют графо-аналитическим методом с использованием входных и выходных ВАХ транзисторов [2]. По заданным величинам выходной мощности и сопротивления нагрузки определяют амплитуды тока и напряжения в нагрузке. Выбирают класс усиления, задают режим работы транзистора выходного каскада. В результате расчета определяют токи и напряжения покоя на коллекторе и базе транзистора, эквивалентное сопротивление нагрузки транзистора, мощность, рассеиваемую на коллекторе, мощность, потребляемую от источника питания, а также амплитуды входного тока и напряжения на базе.

После расчета выходного каскада определяют необходимую глубину общей ООС, исходя из величин заданного и расчетного коэффициентов гармоник:

$$A_{\text{ос вых}} = 20 \lg \left( \frac{K_{\Gamma \text{ расч}}}{K_{\Gamma \text{ задан}}} \right).$$

Если расчет  $K_{\Gamma \text{ расч}}$  затруднителен, то принимают  $A_{\text{ос вых}} = 20 \dots 30$  дБ (реализация ООС с большими значениями глубины обратной связи приводит к усложнению схемы и ее настройки в дальнейшем).

Если по ТЗ задана нестабильность коэффициента усиления всего усилителя  $\Delta St$  [дБ], то глубину общей ООС определяют исходя из предположения, что нестабильность коэффициента усиления каждого из  $n$  каскадов промежуточного усиления не превышает 15% (1.2 дБ) и тогда:

$$A_{\text{ос}} \geq 20 \lg \left[ \frac{0.15 \sqrt{n+1}}{10^{\frac{\Delta St}{20}} - 1} \right].$$

После определения глубины общей ООС  $A_{\text{ос}}$  выполняют ориентировочный расчет количества каскадов промежуточного усиления:

$$n = \frac{K_{\Sigma} + A_{\text{ос}} - K_{\text{вых}}}{K_{\text{ПК}}},$$

где  $K_{\Sigma}$ ,  $K_{\text{вых}}$ ,  $K_{\text{ПК}} = 20 \dots 30$  дБ – коэффициенты усиления всего усилителя, выходного каскада и одного каскада промежуточного усиления соответственно.

Для выходного и промежуточных каскадов, собранных по схеме ОЭ, принимаем  $K_{\text{вых}}$  и  $K_{\text{ПК}}$  равным  $20 \dots 30$  дБ. Округление дробных значений до целого числа проводят в большую сторону.

Выбор типа транзисторов выходного, входного и промежуточных каскадов УУ выполняют исходя из разных критериев: для выходного каскада – по величине рассеиваемой на коллекторе мощности, граничной частоте и предельно допустимых токов и напряжений на электродах транзистора. Транзисторы в каскадах промежуточного усиления должны иметь предельно допустимое напряжение  $U_{KЭ\text{max}}$  не меньше напряжения источника питания.

Тип проводимости транзисторов ( $n$ - $p$ - $n$  или  $p$ - $n$ - $p$ ) зависит от типа межкаскадных связей и полярности источника питания. При резистивно-

емкостных связях выбирают транзисторы одного типа проводимости, а при непосредственной связи – разного типа. На основании предварительных расчетов и изучения доступной литературы выбирается принципиальная схема усилителя, которая по мере ее расчета и отработки может неоднократно изменяться.

## 5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТОВ

Право выбора того или иного типа резисторов, конденсаторов, транзисторов, диодов, ИМС принадлежит проектанту, однако отдаваемое предпочтение должно быть обосновано. В общем случае следует выбирать элементы широкого применения: резисторы металлопленочные типов С2-...; конденсаторы металлопленочные типа К73-...; алюминиевые конденсаторы с оксидным диэлектриком типа К50-...; ниобиевые оксидно-полупроводниковые конденсаторы типа К53-4А; оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы ТМП-типов К53-36 или К53-37 [7...9,20...27].

Номинальные значения параметров резисторов и конденсаторов следует выбирать по ряду Е6 с допуском  $\pm 20\%$ , (класс точности III) и/или по ряду Е12 с допуском  $\pm 10\%$  (класс точности II), и/или по ряду Е24 с допуском  $\pm 5\%$  (класс точности I) [7...9].

Целесообразно ограничивать номенклатуру ЭРЭ.

### 5.1 Транзисторы

По виду выполняемой функции (целевому назначению) транзисторы можно разделить на усилительные, переключательные и генераторные [1,10,32].

По максимально допустимой постоянной рассеиваемой на коллекторе мощности (в статическом режиме) транзисторы делятся на: маломощные ( $\leq 0.3$  Вт), средней мощности (0.3...1.5 Вт), мощные или большой мощности ( $> 1.5$  Вт). Максимально допустимая мощность, в отличие от максимальной, приводится с запасом, гарантирующим заданную надежность.

По частотным свойствам, в зависимости от значения предельной частоты коэффициента передачи тока эмиттера ( $f_\alpha$  при включении по схеме ОБ), транзисторы разделяют на: низкочастотные (до 3 МГц), среднечастотные (3...30 МГц), высокочастотные (30...300 МГц) и СВЧ ( $> 300$  МГц).

В схеме ОЭ предельную частоту коэффициента передачи тока базы обозначают символом  $f_\beta$ . Частотные свойства транзистора в схеме ОЭ хуже, чем в схеме ОБ, так как частота  $f_\beta$  примерно в  $\beta$  раз ниже частоты  $f_\alpha$ . На частотах  $f_\alpha$  и  $f_\beta$  соответствующие коэффициенты передачи уменьшаются на 3 дБ (в 1.41 раза). С дальнейшим ростом частоты усиливаемого сигнала коэффициент передачи  $\beta$  плавно снижается и на некоторой частоте  $f_{гр}$ , называемой граничной, модуль коэффициента передачи достигает единичного значения, т.е. усиление сигнала по току отсутствует.

Для характеристики транзисторов частота  $f_\alpha$  обычно используется на частотах до 20 МГц, а  $f_{гр}$  – свыше 20 МГц. На любой частоте в диапазоне

$0.1f_{гр} < f < f_{гр}$  модуль коэффициента передачи тока изменяется вдвое при изменении частоты в 2 раза (со скоростью 6 дБ/октава). Для транзистора справедливы следующие соотношения:  $f_{\beta} = \frac{f_{\alpha}}{\beta}$ ;  $f_{\alpha} = (1.2 \dots 1.6)f_{гр}$ . Значение  $f_{гр}$  зависит от положения рабочей точки и температуры транзистора. Максимум зависимости  $f_{гр}$  от тока коллектора совпадает с максимумом зависимости параметра  $\beta$  от тока. При больших токах граничная частота падает, при малых токах частотные свойства транзистора также ухудшаются, и уменьшение граничной частоты может происходить в несколько раз [10,11,32].

Значение параметров транзистора для заданного рабочего режима можно определить по приводимым в справочниках характеристикам и расчетным формулам. Желательно чтобы расчетные режимы были близки к оптимальным, рекомендуемым в справочнике, что повышает надежность усилителя и исключает ошибки в проектировании.

Нецелесообразно использовать транзисторы с большим запасом по граничной частоте, так как они дороги, склонны к самовозбуждению и имеют малые эксплуатационные запасы.

Не допускается превышение максимально допустимых электрических и тепловых параметров (коэффициент нагрузки не должен превышать  $0.7 \dots 0.8$ ).

Не допускается значительное снижение коэффициента нагрузки по току и по мощности (меньше  $0.3 \dots 0.5$ ), так как это удорожает усилитель, снижает коэффициент передачи по току и уменьшает его температурную стабильность. Лучше применять транзисторы малой мощности с теплоотводом, чем большой мощности без теплоотвода.

Целесообразно ориентироваться на транзисторы широкого применения, как более доступные и дешевые. Применение «эксклюзивных» транзисторов оправдано лишь в редких случаях, например, составных транзисторов со «сверхбэтта».

Общим для расчета усилителей на транзисторах (постоянного тока, низкой, промежуточной, высокой частоты и др.) являются входное и выходное сопротивление каскада; соотношение, определяющие усиление; частотные свойства; режим работы; температурная стабильность и прочие показатели.

В соответствии с назначением различают каскады предварительного усиления (напряжения, тока или мощности), предназначенные для получения максимального усиления и каскады усиления мощности, обеспечивающие на заданной нагрузке необходимую выходную мощность при минимальных искажениях и минимальной мощности потребления от источника питания. В многокаскадных усилителях с отрицательной обратной связью имеют место фазовые сдвиги между входными и выходными токами, поэтому для их устойчивой работы транзисторы выбирают исходя из условия  $f_{В} \leq 0.3f_{\beta}$  ( $f_{В}$  – верхняя рабочая частота усилителя). При малой обратной связи  $f_{В} \leq f_{\beta}$  возможны два варианта усилителя с мощным выходным каскадом: бестрансфор-



маторный (с выходной мощностью не более 5...10 Вт) и трансформаторный (на десятки и сотни ватт). При выходной мощности 0.1...1 Вт каскады выполняются одноктактными с режимом работы в классе А; при больших значениях мощности – двухтактными с режимом работы в классах А, АВ или В.

В схемах с дополнительной симметрией, т.е. с использованием транзисторов со структурами *p-n-p* и *n-p-n*, приборы должны иметь одинаковые параметры и характеристики. Требуется подбор пар последовательно включенных транзисторов по параметрам  $\beta$  и  $f_{\beta}$  с разбросом не более 10...15%. Для этой цели разработаны специальные (комплементарные) пары транзисторов, например отечественные транзисторы со структурами *n-p-n* и *p-n-p* типов соответственно: КТ502 и КТ503; КТ814 и КТ815; КТ816 и КТ817; КТ818 и КТ819 [11,14,20,29].

В каскадах предварительного усиления напряжение  $U_{кэ}$  в рабочей точке мало (несколько вольт). Его величина выбирается из соображений получения малого напряжения шумов или неискаженной формы сигнала на выходе.

В усилителях, имеющих хорошую температурную и режимную стабилизацию, замена транзистора на однотипный с более высоким значением  $\beta$  обычно не приводит к значительному увеличению тока коллектора в рабочей точке.

В каскадах усиления и генерации мощности  $U_{кэ}$  выбирается достаточно большим для получения максимального КПД и малых нелинейных искажений.

Транзисторы некоторых типов используются в специфических классах схем и характеризуются рядом особенностей режима и условий работы. Эти специализированные транзисторы образуют своеобразный класс приборов, например, транзисторы для схем с автоматической регулировкой усиления (АРУ), для усилителей промежуточной частоты, для работы в микроамперном диапазоне токов, для работы в ВЧ- и СВЧ-диапазонах, лавинные транзисторы, сдвоенные, составные, двухэмиттерные и т.п. Есть узлы, в которых требуются высоковольтные транзисторы. Кроме того, разработаны транзисторы универсального назначения. Оптимальное сочетание параметров и характеристик, удовлетворяющих различным требованиям, дает возможность использовать их в радиоэлектронной аппаратуре вместо некоторых усилительных и переключаемых транзисторов (например, транзистор КТ630).

Жесткие требования к экономичности радиоэлектронной аппаратуры в ряде специальных применений способствовали созданию кремниевых транзисторов, функционирующих при малых токах (единицы и десятки микроампер), поскольку германиевые транзисторы вследствие большого обратного тока коллектора для этой цели не пригодны. Такие приборы (например, транзисторы КТ3102, КТ3107) имеют малые обратные токи коллектора и большие коэффициенты усиления. Однако при работе в микрорежиме у них ухудшаются частотные свойства, но несколько улучшаются шумовые характеристики. Кроме того, при малых токах обычно увеличивается зависимость пара-

метров от температуры, снижается крутизна и затрудняется стабилизация режима.

Реализация большого коэффициента усиления по мощности в высокочастотных усилителях связана с необходимостью уменьшения паразитной обратной связи, обусловленной проходной проводимостью транзистора. Разработаны транзисторы (например, КТ339АМ), у которых для снижения емкости обратной связи в транзисторную структуру введен интегральный экран (электростатический экран Фарадея), представляющий собой сочетание диффузионного экрана и дополнительного экранирующего диода. Применение интегрального экрана позволяет снизить емкость между коллекторным и базовым выводами в 2.5...4 раза и обеспечить большой коэффициент усиления без применения схем нейтрализации.

Для работы в выходных каскадах усилителей низких частот радиовещательных приемников, высококачественных магнитофонов, радиол, телевизоров разработаны германиевые и кремниевые транзисторы разного типа проводимости (например, ГТ401, ГТ402, ГТ701, ГТ703). Они характеризуются слабой зависимостью коэффициента усиления от тока, высокой частотой  $f_{\beta}$ , низким напряжением насыщения, что позволяет улучшить акустические показатели устройств в широком диапазоне звуковых частот. В свою очередь, это дает возможность упрощать схемы усилителей, уменьшать число применяемых транзисторов, повышать надежность и снижать себестоимость устройств. Зависимость коэффициента передачи  $\beta$  от тока характеризуется коэффициентом линейности – отношением коэффициентов передачи при двух значениях тока эмиттера.

Высокочастотные транзисторы могут работать как в усилителях, так и в генераторах. Однако, транзистор, оптимальный для усилителя мощности, не обязательно будет пригоден для генератора и наоборот.

Высокочастотные мощные транзисторы характеризуются такими параметрами, как выходная мощность, коэффициент усиления по мощности, КПД и критический ток коллектора, при достижении которого происходит уменьшение граничной частоты в 1.41 раза по отношению к максимальному значению (этот ток определяет условную границу, при которой получают удовлетворительные частотные свойства транзистора). Факторы, определяющие усиление и ширину полосы рабочих частот транзисторных усилителей, могут быть найдены только в комбинации свойств транзистора и схемы, в которой он используется. Кроме того, коэффициент усиления по мощности зависит от условий определения входной и выходной мощностей, поэтому имеется несколько коэффициентов, характеризующих усиление транзистора. Помимо указанных параметров транзисторы должны иметь хорошую устойчивость к рассогласованию нагрузки.

Следует отметить, что использовать транзисторы с большими пробивными напряжениями для низковольтных устройств нецелесообразно, так как они имеют большое напряжение насыщения и низкий КПД.

Надежная работа мощных приборов при больших значениях выходной мощности обеспечивается лишь при пониженных значениях параметров электрического и теплового режимов. Обычно значение выходной мощности указывается в справочниках для уровня, соответствующего надежной работе, и в режиме непрерывных колебаний не превышает 50% от максимальной мощности, рассеиваемой на коллекторе. На высоких частотах выходная мощность изменяется обратно пропорционально квадрату частоты. Она монотонно увеличивается до определенных значений с ростом входной мощности и напряжения источника питания.

Высокочастотные транзисторы, используемые в усилителях мощности, должны иметь пробивное напряжение коллекторного перехода в 2...3 раза больше напряжения источника питания. В схемах генераторов при расстройке коллекторной цепи пиковое значение напряжения на коллекторе может превышать напряжения источника питания в несколько раз, особенно, на нижнем участке рабочего диапазона частот.

Обычно высокочастотные мощные транзисторы работают ненадежно в режимах короткого замыкания и холостого хода и могут отказывать при несогласовании нагрузки на выходе. Например, транзистор 2N5178 обеспечивает мощность около 50 Вт на частоте 500 МГц лишь в тщательно настраиваемом узкополосном усилителе, и даже при слабом нарушении согласования возможен отказ.

Имеются высокочастотные транзисторы, которые могут работать при всех условиях рассогласования нагрузочного полного сопротивления. Так, транзисторы 2N5764 и 2N5765 могут работать в условиях сильного рассогласования, в отличие от типов 2N4430 и 2N4431. Разработаны также приборы для специальных областей применения, в которых требуются различные значения рабочего напряжения, с различными уровнями широкополосности, с высокой линейностью и т.п.

Для передачи информации с помощью кабелей (например, в кабельных телевизионных системах) разработаны специальные широкополосные линейные транзисторы, работающие в классе А или АВ, при котором обеспечивается малый уровень искажений, вызываемых перекрестной модуляцией. Они имеют слабую зависимость коэффициента усиления от тока, малую коллекторную емкость и применяются на частотах много меньших, чем максимальная рабочая частота. Для стабилизации температурного режима в корпусе транзистора монтируют схему температурной стабилизации с диодом – датчиком температуры. Нелинейность таких транзисторов характеризуется коэффициентом нелинейных (интермодуляционных) искажений. При сравнительной оценке линейности транзисторов могут использоваться зависимости коэффициента передачи от тока коллектора.

Мощные высокочастотные транзисторы могут применяться в импульсном режиме, при этом выходная мощность может быть увеличена при повышении рабочих напряжений. Например, транзистор MSC1330 имеет в непре-

рывном режиме выходную мощность 30 Вт на частоте 1.3 ГГц при  $E_{\Pi} = 28$  В, а в импульсном режиме при  $E_{\Pi} = 40$  В на той же частоте – уже 70 Вт.

Среди возможных причин отказа высокочастотных и сверхвысокочастотных усилительных транзисторов можно назвать возникновение генерации за счет паразитных реактивностей схемы, перегрузку при переходных процессах и действие статического электричества [32].

## 5.2 Полупроводниковые диоды

Выпрямительные диоды [10,17,20,25] применяются в цепях управления, коммутации, в ограничительных и развязывающих цепях, в источниках питания для преобразования (выпрямления) переменного напряжения в постоянное в однополупериодной, двухполупериодной, однофазной и многофазной схемах, в схемах умножения и преобразователях постоянного напряжения, где не предъявляются высокие требования к частотным и временным параметрам сигналов. Выпрямительные свойства диодов тем лучше, чем меньше обратный ток при заданном обратном напряжении и чем меньше падение напряжения при заданном прямом токе. Они характеризуются статическими ( $U_{\text{пр}}, I_{\text{обр}}$ ), динамическими ( $I_{\text{пр.ср}}, U_{\text{пр.ср}}, I_{\text{обр.ср}}, U_{\text{обр.ср}}, f_p, R_d, C_d$ ) и предельно допустимыми параметрами ( $I_{\text{пр.ср max}}, P_{d \text{ max}}, U_{\text{обр max}}, U_{\text{обр и max}}, T_{\text{пер max}}, I_{и \text{ max}}$ ). Для выпрямительных диодов принципиальное значение имеет характер нагрузки (активная, емкостная и индуктивная), влияющей на форму и значение протекающего тока, т.е. определяющей режим работы диода.

При расчете выпрямителя обычно задаются значения выпрямленного напряжения ( $U_{\text{вп}}$ ) и тока ( $I_{\text{вп}}$ ) и значения напряжения и частоты сети питания. Исходя из этого определяются, например, для распространенной мостовой схемы при работе на емкостную нагрузку среднее значение выпрямленного тока  $I_{\text{пр.ср}} = I_{\text{вп}}/2$ , амплитудное значение тока  $I_{и \text{ max}} \approx 3.5I_{\text{вп}}$  (т.е. мгновенное значение прямого тока может значительно превышать среднее значение), значение обратного напряжения  $U_{\text{обр}} \approx 1.5U_{\text{вп}}$ , которые не должны превышать предельно допустимых значений. С повышением частоты приложенного напряжения, большей  $f_p$ , указанной в технических условиях (ТУ), выпрямляющие свойства диодов ухудшаются, значение  $I_{\text{вп}}$  уменьшается (падает эквивалентное сопротивление  $p-n$  перехода), потери в диоде увеличиваются, и он значительно нагревается. От величины  $U_{\text{пр}}$  зависит рассеиваемая мощность и экономичность выпрямителя ( $U_{\text{пр}} < 1$  В для германия и  $U_{\text{пр}} < 1.5$  В для кремния). При постоянном  $I_{\text{пр}}$  значение  $U_{\text{пр}}$  с ростом температуры уменьшается ( $\text{ТКН} = 1.2 \dots 3 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$ ), что учитывается при работе в широком диапазоне температур.

Предельно допустимыми параметрами выпрямительных диодов являются максимальный выпрямленный ток  $I_{\text{пр.max}}$ , максимальное обратное напряжение  $U_{\text{обр max}}$ , максимальная и минимальная температура окружающей

среды, максимально допустимая рассеиваемая мощность  $P_{д\ max}$ . Часто приводятся максимально допустимые значения импульсного прямого и выпрямленного токов, используемые при расчете переходных процессов выпрямителя, работающего на емкостную нагрузку.

В качестве выпрямительных диодов используются и диоды Шотки, имеющие структуру металл-полупроводник. По сравнению с  $p-n$  переходом у них отсутствует диффузия, связанная с инжекцией неосновных носителей, т.е. они работают только на основных носителях. Поэтому у диодов Шотки отсутствует емкость  $C_d$ , связанная с накоплением и рассасыванием неосновных носителей, а их быстродействие определяется только барьерной емкостью. Другой важной особенностью диодов Шотки является меньшее прямое падение напряжения (примерно на 0.2 В). Прямая ветвь ВАХ у них подчиняется экспоненциальному закону в широком диапазоне токов, что позволяет их использовать как прецизионные логарифмирующие элементы.

Ограничительные диоды применяются в выходных каскадах для подавления индуктивных выбросов обратного напряжения. Эти выбросы возникают на нагрузке с большой индуктивной составляющей входного сопротивления. Они имеют обратную полярность с амплитудой, достигающей удвоенного напряжения питания, что может привести к пробоем выходных транзисторов. Включают ограничительные диоды в обратной полярности между шиной питания и выходом УУ. В качестве ограничительных диодов используют выпрямительные диоды 1N4005, Д226 и др. Однако лучше использовать быстродействующие диоды КД212, КД213 или КД2999.

### 5.3 Электрические конденсаторы

В современных РЭС доля конденсаторов составляет 20...30%, а выход из строя устройств по причине отказа конденсаторов – около 3...10%. Большинство отказов конденсаторов вызвано пробоем диэлектрика (около 80%) и постепенной потерей емкости (около 15%). Повышенные напряжения, температура, влажность снижают надежность конденсаторов [7,8,20,23,30].

Конденсаторы зачастую составляют значительную долю общего количества ЭРЭ в усилителе и поэтому оказывают существенное влияние на его надежность. При проектировании УУ разработчик из множества конденсаторов выбирает конкретные типы, исходя из необходимости обеспечения их режимов работы в пределах установленных по ТУ норм. При этом необходимо учитывать форму и величину токов и напряжений (постоянное, переменное, импульсное, пульсирующее), величину реактивной мощности, частоту и температурный диапазон, стоимость и др. Ввиду множества разновидностей конденсаторов их выбор для конкретного схемотехнического решения и условий эксплуатации не всегда однозначен.

Можно выделить следующие области функционального применения конденсаторов [7,20]:

- керамические низковольтные низкочастотные и высокочастотные конденсаторы типа К10-... – межкаскадные емкостные связи, шунтирование нежелательных НЧ и ВЧ сигналов, фильтрация пульсирующих сигналов, сглаживание выпрямленного напряжения ИВЭП;

- конденсаторы с оксидным диэлектриком типов К50-..., К53-... – танталовые и ниобиевые оксидно-полупроводниковые и оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы ТМП-типов (К53-36) – цепи частотных и сглаживающих фильтров, цепи шунтирования, блокировки;

- полиэтиленфталатные с фольговыми и металлизированными обкладками типов К73-..., К74-..., лакопленочные типа К76-..., полипропиленовые К78-... – в цепях блокировки, шунтирования, фильтрации сигналов, емкостной связи между каскадами (частично могут заменять оксидные конденсаторы – вместо двух встречно включенных электролитических конденсаторов желателен включать один металлопленочный, например типа К73-17 емкостью 4.7 мкФ на напряжение 63 В); работают на частотах до сотен МГц.

Поскольку эквивалентная схема замещения конденсатора на высокой частоте представляет собой последовательный колебательный контур, то конденсатор нормально работает только на частотах ниже резонансной. При выборе типа конденсатора необходимо руководствоваться следующими соображениями:

- тип конденсатора выбирают исходя из его функционального назначения, величин емкости, реактивной мощности и рабочего напряжения, частотного и температурного диапазонов, тангенса угла диэлектрических потерь;

- допустимое отклонение емкости от номинального значения выбирают с учетом чувствительности к нему параметров и характеристик УУ. Следует помнить, что полярные конденсаторы допускают работу только в цепях постоянного или пульсирующего не знакопеременного тока;

- в УУ конденсаторы работают под напряжением, содержащим постоянную и переменную составляющие. Для большинства же типов конденсаторов указывается номинальное напряжение постоянного тока, которое подчиняется стандартному ряду [7,20]. Сумма амплитуд постоянной и переменной составляющей не должна превышать номинальное напряжение конденсатора, а при работе в цепи переменного тока среднеквадратичное (эффективное) значение напряжения на конденсаторе должно быть в 1.5...2 раза меньше номинального для постоянного тока. С учетом коэффициента нагрузки ( $K_H = 0.5...0.8$ ) это уменьшение должно быть более значительным. Однако не следует применять конденсаторы со значительным превышением номинального напряжения над рабочим, так как это ведет к увеличению массогабаритных и стоимостных показателей УУ;

- более жесткие требования по применению накладываются на оксидные конденсаторы. При использовании алюминиевых электролитических

конденсаторов в цепях пульсирующего напряжения амплитуда переменной составляющей не должна быть выше определенной величины. При частоте 100 Гц в зависимости от величины емкости и номинального напряжения амплитуда переменной составляющей не должна превышать 0.02...0.1 номинального напряжения. При использовании полярных танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов в цепях с пульсирующим напряжением амплитуда переменной составляющей не должна превышать 0.2 (на частоте 100 Гц) и 0.03 (на частоте 10 кГц) номинального напряжения. неполярные оксидные конденсаторы допускают работу в цепях как постоянного, так и переменного тока. С ростом частоты переменного тока возрастают активные потери в конденсаторах, что может приводить к их разогреву [20].

## 5.4 Резисторы

В усилительных устройствах наиболее широко применяют непроволочные металлопленочные и металлоокисные резисторы постоянного сопротивления типов С2-23, С2-14, С2-33М и другие, не снятые с производства [7,20, 27,30]. Резистивный элемент этих резисторов – пленка толщиной 0.1...0.3 мкм из сплавов или металлов, осажденная на керамическую заготовку в форме цилиндра методом термического испарения. Достоинство этих резисторов – малые габариты и высокая рабочая температура (до 200 °С). Примерами металлопленочных резисторов постоянного сопротивления для объемного монтажа являются резисторы общего применения С2-33М-0.125, выпускаемые на номиналы от 0.1 Ом до 22 МОм с допуском  $\pm 5\%$ .

Металлопленочные и металлоокисные резисторы типов С2-... по сравнению с углеродистыми типов С1-...(С1-4) более теплостойкие (С2-6 допускает работу в диапазоне  $-60...300$  °С) и имеют меньшие габариты, более низкие собственные шумы и лучшие частотные характеристики; могут иметь как положительные, так и отрицательные ТКС [7,20,30]. Основным недостатком их является малая устойчивость к импульсным нагрузкам ( $K_H = 0.1$ ), что обусловлено неоднородностью проводящей пленки. По системе обозначений, принятой с 1980 г., постоянные непроволочные резисторы обозначают Р1-..., а третий числовой индекс обозначает регистрационный номер конкретного типа резистора. В цепях ООС рекомендуется использовать прецизионные резисторы ( $\pm 2\%$ ,  $\pm 1\%$ ,  $\pm 0.5\%$ ) с малыми ТКС, например, С2-29В или аналогичные, номинальной мощностью не менее 0.25 Вт [11].

Резисторы постоянного сопротивления для технологии поверхностного монтажа (ТМП), изготовленные по толстопленочной или тонкопленочной технологии выпускаются в двух конструктивных исполнениях: цилиндрические и прямоугольные чип-резисторы. Прямоугольные чип-резисторы получили более широкое применение, так как их размеры стандартизованы на международном уровне, возможен автоматизированный монтаж, пайка ТМП-

методом и др. Основанием резистора служит керамическая подложка, на которую нанесен резистивный слой. Выпускаются чип-резисторы P1-12 общего применения для работы в цепях постоянного и переменного тока в гибридных интегральных схемах (ГИС) и для монтажа на поверхности для автоматизированной и ручной сборки. Резисторы выпускают в корпусах 0805 и 1206 с допуском  $\pm 2\%$ ,  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  на номинальные мощности 0.062, 0.125, 0.25, 0.5 Вт. Диапазон номинальных сопротивлений от 1 Ом до 22 МОм, рабочий диапазон температур:  $-60 \dots +125^\circ\text{C}$ .

Пример записи в КД:

**Резистор P1-12-0.5-4.7 кОм $\pm 5\%$ -А-А ШКАБ.434110.002 ТУ,**

где P1 – чип-резистор постоянного сопротивления; 12 – номер разработки; 0.5 – мощность в ваттах; 4.7 кОм – сопротивление;  $\pm 5\%$  – допуск; А – норма уровня шума 1мкВ/В; А – для автоматизированной сборки [7,33].



## 6 ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Современные цифровые и аналоговые электронные системы передачи и обработки информации (СПИ) содержат до 30...40% аппаратуры электропитания, что существенно влияет на стоимость, надежность и габариты систем. По оценкам специалистов 50% всех отказов электронных систем прямо или косвенно приходится на средства электропитания [8,10,15,17...20].

Преобразование электроэнергии первичных сетей (например, 220 В, 50 Гц) в электроэнергию постоянного тока с заданными параметрами осуществляется источниками вторичного электропитания. Традиционно специализированные ИВЭП проектировались на дискретной элементной базе непосредственно разработчиками СПИ, так как специализированный ИВЭП для конкретной задачи по своим удельным параметрам, надежности всегда лучше по сравнению с универсальным. Однако разработка, отладка решений, применяемых в ИВЭП, требует больших временных затрат, наличия специального оборудования и персонала высокой квалификации, а с учетом мелкосерийности производства и необходимости внедрения новых технологических и схемотехнических решений, приводят к нецелесообразности разработки оригинальных ИВЭП.

В настоящее время фирмами-производителями ИВЭП предлагаются как готовые интегрируемые блоки питания, имеющие широко распространенные наборы электрических параметров, так и отдельные модули, позволяющие создавать ИВЭП с гибко настраиваемыми и комбинируемыми характеристиками и параметрами. Такие ИВЭП отличаются высокими удельными показателями мощности, КПД, высокой надежностью, применением современных технологий изготовления, новой элементной базой (МДП-ключи, быстрые диоды, диоды Шотки, планарные трансформаторы на основе специальных магнитных материалов), а также новыми схемотехническими решениями (квазирезонансный режим работы силовых элементов с переменной частотой и с переключением при нулевом токе и при нулевом напряжении).

## 7 СОСТАВ УСИЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Кроме основных элементов, обеспечивающих функцию усиления, в составе УУ должны быть дополнительные элементы:

- входной и выходной сигнальные электрические соединители (разъемы);
- сетевой электрический соединитель (разъем);
- сетевой переключатель, например, тумблер типа ТВ-1 или ТВ-2;
- индикатор включения сети, например, светодиодный;
- вставка плавкая (предохранитель) – сетевая, в первичной обмотке силового трансформатора;
- вставка плавкая (предохранитель) – во вторичной обмотке силового трансформатора;
- регулятор коэффициента усиления, плавный или ступенчатый.

Сетевой предохранитель или автоматический размыкатель является обязательным элементом устройств с питанием от сети 220 В 50 Гц. Предохранители в цепях питания постоянного тока также являются обязательными, если выходной каскад УУ не содержит таковых. Сетевой и вторичный предохранители должны быть с задержкой срабатывания, чтобы не перегореть при бросках тока, обусловленных зарядкой накопительных конденсаторов при включении питания. Позиционные обозначения плавкого предохранителя *FU* проставляют рядом с условным графическим обозначением (с правой стороны или над ним) [7,20,30,33].

## 8 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

Работа по выполнению пояснительной записки занимает около 20% времени, отведенного на курсовой проект, и является важным и трудоемким этапом проектирования. Выполняется ПЗ на листах формата А4 по правилам, изложенным в ГОСТ 2.106-96 и 2.105-95 или по требованиям образовательного стандарта вуза. В случае отсутствия у студентов указанных стандартов при нумерации формул, разделов, при оформлении таблиц и рисунков, он может использовать в качестве примеров оформления данное пособие. Объем ПЗ – 18...25 страниц. Допустимо как рукописное, так и компьютерное оформление ПЗ. Однако все расчеты должны быть подробными, с приведением формул и промежуточных вычислений в такой последовательности: формула (символьное выражение) = подставленные в формулу численные значения вместо символов = численный результат. Для расчетов по формулам и при построении графиков удобно использовать программный комплекс MathCAD.

ПЗ к КП в общем случае должна включать [13]:

- титульный лист;
- реферат;
- задание на проектирование;
- содержание;
- введение с постановкой задачи на проектирование согласно ТЗ;
- основная часть проекта
- заключение;
- список использованной литературы;
- приложения.

Первый лист в пояснительной записке титульный.

После титульного листа на отдельном листе размещают реферат, в котором, согласно ГОСТ 7.9-95, содержатся сведения о количестве листов ПЗ, о количестве иллюстраций, таблиц, использованных источников, приложений и листов графического материала. Далее, в реферате отдельным абзацем располагают ключевые слова. В нашем случае в качестве таких слов используем термины: широкополосный усилитель, транзистор, частотные искажения, выходная мощность, коэффициент полезного действия, расчет схемы электрической принципиальной, источник вторичного электропитания. Затем следует очень краткое содержание курсового проекта. Обычно текст реферата не превышает 20...30 строк. После реферата следует задание на курсовой проект. Пример оформления этого задания приведен в Приложении А. Следующий за заданием лист имеет заголовок «Содержание».

После «Содержания» в пояснительной записке располагают «Введение» с объемом текста 2...3 листа. Во «Введении» кратко излагают техническое

задание на проектирование УУ и приводят сведения о широкополосных усилителях мощности на транзисторах, выполняют краткий сравнительный анализ схемных решений и классов усиления мощных выходных каскадов, а также дают постановку задачи по реализации усилителя с заданными параметрами и характеристиками. Необходимо отметить также требования к схемным решениям усилителя и к элементной базе, накладываемые заданным температурным диапазоном и величиной мощности, рассеиваемой в усилителе. Во введении нецелесообразно отмечать достоинства бестрансформаторных усилителей по сравнению с трансформаторными, так как усилители звуковых частот, с полосой значительно превышающей 20 кГц, никогда трансформаторными не бывают.

В разделе «Заключение» с объемом текста 1.5...2 листа обсуждаются расчетные результаты по всем разделам, и делается заключение о соответствии заданных и рассчитанных параметров усилителя. Даются краткие сведения из разделов «Рекомендации» по проектированию, настройке и эксплуатации усилителя. Отмечаются как достоинства, так и недостатки разработанного усилителя и указываются перспективные направления (схемотехника, элементная база, конструктивно-технологические решения), позволяющие существенно улучшить технико-экономические и эксплуатационные показатели усилителя. Эта часть раздела имеет особую ценность, так как показывает, насколько самостоятельно и творчески студент работал над курсовым проектом.

В разделе «Список использованных источников» приводится список учебной литературы и источников технической информации, использованных при выполнении курсового проекта. В список включаются только те источники, на которые имеются ссылки в тексте ПЗ. Обязательно должны быть включены в список источники, из которых брались справочные данные транзисторов, ИМС, резисторов, конденсаторов, модулей ИВЭП, трансформаторов, дросселей.

В разделе «Приложения» могут быть помещены входные и выходные ВАХ транзисторов с указанием рабочих режимов и гиперболы предельной мощности коллектора, справочные данные элементов, схема электрическая принципиальная с указанием на ней номиналов элементов (сопротивление резисторов, емкость конденсаторов, индуктивность дросселей), а также типы транзисторов и ИМС. На схеме электрической принципиальной усилителя необходимо указать силу тока в ветвях и величину постоянного напряжения в узлах относительно общего провода в режиме покоя (при отсутствии входного сигнала).

## 9 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в пособии общие сведения об усилительных устройствах, рекомендации по разработке структурной и принципиальной схем, а также рекомендации по выбору электрорадиоэлементов позволяют выполнить разработку проектной конструкторской документации на усилительное устройство. Стадии проектирования (техническое предложение и эскизный проект) предполагают создание документации, содержащей необходимые данные для разработки, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, РЕКОМЕНДУЕМОЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

1. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф.Опадчий, О.П.Глудкин, А.И.Гуров; Под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 768 с.
2. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов. - 2-е изд., испр. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 320 с.
3. Мурадян А.Г. и др. Усилительные устройства. М.: Связь, 1976. – 280 с.
4. Красько А.С. Аналоговые электронные устройства / Методические указания по курсовому проектированию. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2000. – 42 с.
5. Денисов Н.П., Попов А.И., Шибаев А.А. Основы электроники и электронные устройства. Часть 1. Линейные электрические цепи и сигналы: Учебное пособие / Под ред. А.И.Попова – Томск: Издательство Томского университета, 1992. – 282 с.
6. Озеркин Д.В. Общая электротехника и электроника. Часть 2 – Общая электроника. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2004. – 160 с.
7. Кузбных Н.И., Козлов В.Г. Перспективная элементная база радиоэлектронных средств. Часть 1. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2005. – 180 с.
8. Козлов В.Г. Функциональные устройства и электрорадиоэлементы. Курс лекций для студентов дистанционного обучения специальности 200800. Часть 2. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2003. – 219 с.
9. Козлов В.Г. Физические основы микроэлектроники. Методическое пособие по курсовой работе для студентов дистанционного обучения специальности 200800. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 62 с.
10. Изъюрова Г.И., Королев Г.В. и др. Расчет электронных схем. Учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1987. – 335 с.
11. Данилов А.А. Прецизионные усилители низкой частоты. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 352 с.
12. Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 510 с.
13. ОС ТУСУР 6.1-97. Образовательный стандарт ВУЗа. Работы студенческие учебные и выпускные квалификационные. Общие требования и правила оформления. – Томск: Ротапринт ТУСУР, 1999. – 40 с.

14. Игумнов Д.В. Основы полупроводниковой электроники. Учебное пособие. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 392 с.
15. Шарапов А.В. Электронные цепи и микросхемотехника. Часть 1. Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 1999. – 161 с.
16. Колесов И.А. Усилительные устройства бытовой РЭА. Учебное пособие. – Издательство НТЛ, 2003. – 292 с.
17. Костиков В.Г. Источники электропитания электронных средств. – М.: Горячая линия-Телеком, 2001.
18. Микросхемы для линейных источников питания и их применение. Под ред. А.В.Перебаскина. – М.: ДОДЭКА, 1998.
19. Вениаминов В.Н. Микросхемы и их применение: Справочное пособие. – М.: Радио и связь, 1989. – 260 с.
20. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств. Учебное пособие. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 350 с.
21. Масленников М.Ю. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Т. 1 и 2. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 591 с.
22. Дубровский В.В. Резисторы. – М.: Радио и связь, 1990. – 352 с.
23. Справочник по электрическим конденсаторам / Под ред. М.Н.Дьяконова. – М.: Радио и связь, 1983.
24. Усатенко С.Т. Выполнение электрических схем по ЕСКД. Справочник. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 325 с.
25. Электронные компоненты. Каталог. – М.: Платан, 2004.
26. Поверхностный монтаж. Электронные компоненты. Краткий каталог. – М.: ЗАО ОСТЕК, 2000.
27. Резисторы. Сборник справочных листов. – М.: ОАО РНИИ «Электростандарт», 2003.
28. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / Под ред. С.В.Якубовского. – М.: Радио и связь, 1990. – 496 с.
29. Варакин Л.В. Бестрансформаторные усилители мощности: Справочник. – М.: Радио и связь, 1984. – 128 с.
30. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник. – Минск: Беларусь, 1994. – 591 с.
31. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА: Справочник / Под ред. Э.Т.Романычевой. – М.: Радио и связь, 1989. – 448 с.
32. Нефедов А.В., Гордеева В.И. Отечественные полупроводниковые приборы и их зарубежные аналоги: Справочник. 4-е изд., стереотип. – М.: КубК-а, 1995. – 400 с.
33. Козлов В.Г., Кобрин Ю.П., Кондаков А.К. Основы проектирования электронных средств. Методическое пособие по курсовому проектированию. Томск: ТУСУР, 2006. – 172 с.
34. Кучумов А.И. Электроника и схемотехника: Учебное пособие для вузов. – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 335с.
35. Киреев М.А. Современные зарубежные микросхемы – усилители звуковой частоты. Справочник. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 526 с.

36. Баев Б.П. Микропроцессорные системы бытовой техники: Учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 480 с.
37. Уваров А.С. AutoCAD для конструкторов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 399 с.
38. Кардашев В.А. Виртуальная электроника. Компьютерное моделирование аналоговых устройств. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 259 с.
39. Куневич А.В. Трансформаторы для бытовой и офисной аппаратуры. Справочник. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 140 с.
40. Аванесов Г.Р. Униполярные интегральные микросхемы: Справочное пособие. – М.: Радио и связь, 2003. – 220 с.
41. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы. Учебное пособие. – СПб.: Лань, 2006. – 478 с.
42. Поршнева С.В. Компьютерное моделирование физических систем с использованием MathCAD. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 319 с.
43. Каплан Д. Практические основы аналоговых и цифровых схем: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2006. – 174 с.
44. Легостаев Н.С. Методы анализа и расчета электронных схем. – Томск: ТУСУР, 2006. – 215 с.
45. Бытовая радиотелевизионная аппаратура. Устройство, техническое обслуживание, ремонт. – М.: ГЛ–Т, 2006. – 606 с.
46. Белов А.В. Конструирование устройств на микроконтроллерах. – СПб.: Наука и техника, 2005. – 255 с.
47. Капилевич Р.М. Конденсаторы и резисторы. – Томск.: ТУСУР, 2005. – 49 с.
48. Крекрафт Д. Аналоговая электроника. Схемы, системы, обработка сигналов: Учебное пособие. Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2005. – 359 с.
49. Резисторы. Сборник справочных листов. РД11 0856.3 – 2005. – М.: ОАО РНИИ «Электростандарт», 2005.
50. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью MicroCAP-7. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 368 с.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А - ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ЗАДАНИЯ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР)

### ЗАДАНИЕ №

На курсовой проект по дисциплине «Схемотехника электронных средств»  
(«Схемотехника»).

Студенту группы \_\_\_\_\_

Даты выдачи задания и сдачи готового проекта \_\_\_\_\_

Тема проекта \_\_\_\_\_

Исходные данные для проектирования:

1. Состав проектируемого устройства:

1.1 Предварительный усилитель: ИМС ОУ/ИМС УНЧ/ОЭ/ОК/ОС/ОИ/ДК.

1.2 Промежуточный усилитель: ИМС ОУ/ИМС УНЧ/ОЭ/ОИ/ДК.

1.3 Выходной усилитель: однотактный ОК/ОС, двухтактный в режимах А(БТ/ПТ)/АВ(БТ/ПТ)/В(БТ/ПТ)/ИМС ОУ/ИМС УНЧ.

1.4 Источник вторичного электропитания в составе: трансформатор, выпрямитель, фильтр, стабилизатор напряжения на ИМС.

1.5 Регулятор коэффициента усиления \_\_\_\_ дБ (потенциометрический /режимный/на ОУ/на электрически управляемом сопротивлении/на оптроне/ на цифровом потенциометре).

1.6 Источник электропитания: сеть 220В ( $\pm 10\%$ ) / 50Гц.

1.7 Источник входного сигнала: ЭДС, мВ \_\_\_\_; сопротивление, Ом \_\_\_\_

2. Электрические параметры проектируемого устройства:

2.1 Мощность в нагрузке \_\_\_\_ Вт и ее сопротивление, Ом \_\_\_\_\_

2.2 Диапазон рабочих частот \_\_\_\_\_ кГц, по уровню частотных искажений, дБ \_\_\_\_

2.3 Коэффициент нелинейных искажений не более, % \_\_\_\_\_

2.4 Величина фазовых/дифференциально-фазовых искажений не более, % \_\_\_\_\_

2.5 Величина интермодуляционных искажений не более, % \_\_\_\_\_

2.6 Отношение сигнал/шум, дБ \_\_\_\_\_

2.7 Уровень фона сети переменного тока, дБ \_\_\_\_\_

- 2.8 Диапазон рабочих температур \_\_\_\_\_
- 2.9 Тип элементов: для объемного монтажа/для поверхностного монтажа.
3. Вопросы, подлежащие разработке и проектированию:
- 3.1 Выбор, обоснование и расчет структурной схемы устройства.
- 3.2 Расчет схемы электрической принципиальной.
- 3.3 Выбор и обоснование схемы электрической принципиальной ИВЭП.
- 3.4 Расчет параметров электрорадиоэлементов и выбор их типономиналов.
- 3.5 Расчет КПД выходного каскада
- 3.6 Моделирование схемы транзисторного каскада на ЭВМ.
- 3.7 Рекомендации по проектированию устройства в виде сборочной единицы.
- 3.8 Рекомендации по настройке устройства при его изготовлении (измерения: 1) амплитудной характеристики и динамического диапазона; 2) диапазона рабочих частот; 3) уровня фона; 4) коэффициента шума; 5) нелинейных искажений; 6) мощности в нагрузке; 7) температурного режима)
- 3.9 Рекомендации по эксплуатации устройства и по ТБ.
4. Содержание и оформление ПЗ и КД согласно ОС ТУСУР и требований настоящего задания.
5. Содержание графической части КП:
- 5.1 Схема электрическая структурная согласно п. 1.
- 5.2 Схема электрическая принципиальная всего УУ с указанием на ней типов и номиналов всех элементов, а также величин силы тока в ветвях и напряжений в узлах выходного каскада.
- 5.3 Схема электрическая соединений измерительных приборов и разработанного устройства для измерений по п. 3.8.
- 5.4 Перечень элементов.

Руководитель проектирования \_\_\_\_\_ Исполнитель \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б - ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ

### СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение и постановка задачи на проектирование .....	
2. Описание известных схмотехнических решений (обзор литературы).....	
3. Выбор и обоснование структурной схемы УУ.....	
3.1 Определение числа каскадов и распределение искажений по каскадам...	
3.2 Выбор типов каскадов и обратных связей.....	
4. Расчет выходного каскада.....	
4.1 Выбор активного элемента (транзистора, ИМС ОУ, ИМС УНЧ).....	
4.2 Расчет режима работы активного элемента.....	
4.3 Расчет цепей термостабилизации, питания, коррекции.....	
4.4 Расчет теплового режима каскада и рекомендации по выбору системы охлаждения.....	
4.5 Расчет КПД.....	
5. Выбор и расчет входного каскада.....	
6. Выбор и расчет промежуточных каскадов.....	
7. Расчет схемы регулировки усиления.....	
8. Выбор и обоснование схемы ИВЭП.....	
9. Выбор и обоснование типов и номиналов ЭРЭ.....	
10. Расчет параметров и характеристик УУ.....	
11. Результаты моделирования (натурного макетирования) .....	
12. Рекомендации: по проектированию УУ в виде сборочной единицы, по настройке, по изготовлению, по эксплуатации и технике безопасно- сти.....	
13. Заключение (оценка соответствия УУ требованиям ТЗ).....	
14. Список использованных источников.....	
Приложение А. Справочные данные ЭРЭ, использованных в УУ.....	
Приложение Б. Характеристики активных элементов (входные и выходные ВАХ, с указанием координат рабочих точек и величин предельно допу- стимых: тока, напряжения, мощности).....	
РКФ КП.468XXX.001 ЭЗ. Схема электрическая принципиальная.....	
РКФ КП.468XXX.001 ПЭЗ. Перечень элементов.....	