

**Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»**

Кафедра электроники

В.Т. Першин

ОСНОВЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И СХЕМОТЕХНИКИ

**Учебное пособие
по курсовому проектированию
для студентов специальности
27 01 01 «Экономика и организация производства»
всех форм обучения**

Минск 2004

УДК 621.37/39+681.3.06(075.8)

ББК 32.84+32.97 я 73

П 27

Рецензент:

заведующий кафедрой телекоммуникаций
Высшего государственного колледжа связи,
канд. техн. наук, доцент Н.И.Шатило

Першин В.Т.

П 27 Основы радиоэлектроники и схемотехники: Учеб. пособие по курсовому проектированию для студ. спец. 27 01 01 «Экономика и организация производства» всех форм обучения /В.Т. Першин. – Мн.: БГУИР, 2004. – 116 с.: ил. ISBN 985-444-574-7

В учебном пособии кратко описаны требования к объему и содержанию графической части и расчетно-пояснительной записки курсового проекта по курсу «Основы радиоэлектроники и схемотехники». Приведены теоретические сведения по расчету усилителя, как основного электрического узла проекта, и его типовой расчет. Приложения содержат ряд дополнительных сведений по стандартам Единой системы конструкторской документации.

УДК 621.37/39+681.3.06(075.8)

ББК 32.84+32.97 я 73

ISBN 985-444-574-7

© Першин В.Т., 2004

© БГУИР, 2004

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие

1. Краткие теоретические сведения о работе усилительного каскада

- 1.1. Классификация, основные характеристические параметры электронных усилителей
 - 1.1.1. Классификация усилителей
 - 1.1.2. Активные элементы усилителей
 - 1.1.3. Основные характеристические параметры усилителей
- 1.2. Выбор и стабилизация статического режима транзисторного усилителя
 - 1.2.1. Статические характеристики транзистора
 - 1.2.2. Динамические характеристики транзисторного каскада
 - 1.2.3. Питание цепей транзисторов
- 1.3. Анализ работы линейного транзисторного усилителя
 - 1.3.1. Эквивалентная схема апериодического транзисторного усилителя
 - 1.3.2. АЧХ апериодического транзисторного усилителя
 - 1.3.3. ФЧХ апериодического транзисторного усилителя
 - 1.3.4. Коррекция частотных характеристик усилителя
 - 1.3.5. АЧХ резонансного (избирательного) усилителя
- 1.4. Обратная связь в усилителях
 - 1.4.1. Структурные схемы усилителей с обратной связью
 - 1.4.2. Коэффициент передачи усилителя с обратной связью
 - 1.4.3. Влияние обратной отрицательной связи на параметры усилителя
 - 1.4.4. Эмиттерный повторитель как схема с обратной отрицательной связью
 - 1.4.5. Фазоинверсный каскад с разделенной нагрузкой
 - 1.4.6. Устойчивость усилителей с обратной связью
 - 1.4.7. Влияние цепи обратной связи через источник питания на устойчивость усилителя
- 1.5. Анализ работы усилителя при больших уровнях входного сигнала (нелинейное усиление)
 - 1.5.1. Усилитель при большом уровне входного сигнала
 - 1.5.2. Методика расчета спектра выходного тока нелинейного усилителя
 - 1.5.3. КПД нелинейного усилителя
 - 1.5.4. Двухтактные схемы
 - 1.5.5. Умножение частоты
 - 1.5.6. Режимы работы усилителя
- 1.6. Многокаскадные транзисторные усилители
 - 1.6.1. Структурная схема многокаскадного усилителя
 - 1.6.2. Схемы межкаскадных связей

- 1.6.3. Устойчивость работы многокаскадных усилителей
- 1.6.4. Регулировки в усилителях
- 1.6.5. Операционные усилители (ОУ)
- 2. Типовой расчет усилителя низкой частоты
 - 3. Методические требования к выполнению курсового проекта
 - 3.1. Цели, задачи курсового проектирования
 - 3.2. Объем и порядок выполнения и защиты курсового проекта
 - 3.2.1. Объем курсового проекта
 - 3.2.2. Порядок выполнения курсового проекта
 - 3.2.3. Защита курсового проекта
 - 3.3. Требования к содержанию и оформлению расчетно-пояснительной записки к курсовому проекту
 - 3.3.1. Общие требования к содержанию расчетно-пояснительной записки
 - 3.3.2. Порядок приведения формул
 - 3.3.3. Правила оформления таблиц
 - 3.3.4. Правила оформления иллюстраций
 - 3.3.5. Правила оформления приложений
 - 3.4. Требования к содержанию и оформлению графической части курсового проекта
 - 3.4.1. Общие требования к оформлению графической части проекта
 - 3.4.2. Формализация требований стандартов ЕСКД на правила выполнения схем
 - 3.4.3. Конструирование печатных плат и оформление чертежей на них
- Приложение 1. Титульный лист курсового проекта
- Приложение 2. Ряды номинальных емкостей и резисторов по ГОСТ 28884-90
- Приложение 3. Таблица буквенных обозначений основных величин (по ГОСТ 1494-77 и 15808-70)
- Приложение 4. Краткий перечень основных стандартов ЕСКД, которые нужно просмотреть всем студентам, выполняющим курсовой проект по курсу «Основы радиоэлектроники и схемотехники»
- Приложение 5. Экономический расчет себестоимости и отпускной цены изделия
- Приложение 6. Пример вычерчивания структурной схемы устройства
- Приложение 7. Пример выполнения схемы принципиальной электрической
- Приложение 8. Обозначения условные графические на схемах
- Приложение 9. Плата печатная с навесными элементами
- Л и т е р а т у р а

ПРЕДИСЛОВИЕ

Радиоэлектроника представляет собой область науки и техники, решающей вопросы получения, хранения, преобразования и передачи информации на расстояние с помощью излучения электромагнитных колебаний.

Радиоэлектроника находится в состоянии совершенствования и развития и непрерывно обогащается новейшими научно–техническими достижениями в области *схемотехники*.

Курс «Основы радиоэлектроники и схемотехники» представляет собой изложение основных идей радиоэлектроники в глубокой связи со схемотехническими решениями изучаемых вопросов и, несмотря на сложное название, является дисциплиной, в которой объекты ее изучаются в единстве физических процессов и их реализаций схемотехническими решениями. При этом основные процессы преобразования информации рассматриваются не только с теоретической, физической стороны изучаемых явлений, но и в плане схемотехнических вариантов реализации устройств, в которых протекают эти процессы. Теоретический анализ радиоэлектронных устройств проводится на конкретных схемотехнических решениях, что позволит студентам, в конечном счете, понимать работу радиовещательных и телевизионных радиоприемников на уровне их принципиальных схем.

Основная задача данного учебного пособия – научить студента разрабатывать не очень сложные принципиальные электрические схемы радиоэлектронных устройств и грамотно оформлять на них конструкторско-технологическую документацию.

Приступая к выполнению курсового проекта, студент должен понимать, что вначале он выполняет работу инженера-схемотехника, смысл которой заключается в разработке такой принципиальной схемы, которая позволяла бы реализовать высокие технические характеристики будущего устройства, а его производство сделало бы экономически выгодным. Создание схемы устройства начинается с литературного обзора по теме задания. Анализируя имеющиеся разработки, инженер-схемотехник делает прорисовки будущей схемы, из которой с каждым днем все яснее проступает замысел.

В производственных условиях после разработки принципиальной электрической схемы устройства делается ее макет. Как правило, для этих целей используются возможности экспериментального цеха или участка. С помощью измерительных приборов инженер-схемотехник оценивает технические характеристики разработанной схемы. Если полученные характеристики не соответствуют предъявляемым требованиям, то макет устройства переделывается, иногда много раз, пока не будет достигнут желаемый результат.

Когда разработка принципиальной схемы закончена, готовится техническое задание конструкторам и технологам для организации ее производства. Согласно этому заданию должны быть решены вопросы размещения деталей

принципиальной схемы в корпусе определенных, как правило, стандартных, размеров и определены технологические этапы изготовления будущего экспериментального образца устройства.

Изготовленный опытный образец устройства передается в лабораторию, в которой работает инженер-схемотехник, для проведения испытаний, после которых делается окончательный вывод о дальнейшей судьбе разработанного прибора или устройства: решается вопрос о том, запускать его в производство или нет.

Во время разработки принципиальной электрической схемы инженер-схемотехник использует персональный компьютер с соответствующим математическим обеспечением. Хорошее владение компьютером позволяет быстро найти оптимальное решение стоящей перед инженером задачи.

Отсюда понятно, что инженер-схемотехник должен знать теорию цепей и сигналов, принципы построения принципиальных схем, хорошо ориентироваться в нормативных документах, определяющих технические требования к разрабатываемым приборам. При работе с экспериментальным макетом разрабатываемого устройства инженер должен уметь пользоваться измерительными приборами и хорошо владеть паяльником.

В пособии изложены основы работы и расчета усилительного каскада, являющегося самым распространенным узлом многих радиоэлектронных устройств, и приведены необходимые сведения о стандартах Единой системы конструкторской документации. Владение этими сведениями позволит студентам-экономистам грамотно выполнить расчет основного узла проектируемого устройства и правильно оформить техническую документацию на спроектированное устройство. В результате успешного выполнения курсового проекта студенты получают инженерные знания, которые позволят им уверенно чувствовать себя на предприятии, выпускающем изделия не только радиоэлектронной техники.

В работе над настоящим учебным пособием помощь советами и участием в подготовке рукописи оказали автору сотрудники кафедры электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Особенно большую помощь оказали С.В.Дробот и В.Т.Мыхлик. Многочисленные и ценные замечания сделал при рецензировании рукописи настоящего пособия заведующий кафедрой телекоммуникаций Минского высшего государственного колледжа связи канд. техн. наук, доцент Н.И.Шатило. Неоценимую помощь оказала автору канд. экон. наук, доцент кафедры экономики БГУИР А.В.Грицай, любезно согласившаяся отредактировать раздел, посвященный экономическому расчету себестоимости и отпускной цены изделия.

Автор выражает своим коллегам по работе и рецензенту искреннюю благодарность.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАБОТЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ, ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Усилителем электрических сигналов называется устройство, позволяющее при наличии на его входе сигнала с некоторым уровнем мощности получить в нагрузке усилителя тот же сигнал, но с большим уровнем мощности.

Увеличение мощности выходного сигнала усилителя обеспечивается источником питания, из которого черпается энергия для создания увеличенной мощности выходного сигнала. Энергия источника питания преобразуется в энергию полезного сигнала при помощи активных элементов (ламп, транзисторов и т.п.). Для связи активных элементов с источником входного сигнала и нагрузкой усилителя, а также для придания усилителю нужных частотных свойств применяют пассивные элементы электрических цепей: резисторы, индуктивности, емкости.

Для усиливаемых сигналов усилитель, имея два входных и два выходных зажима, представляет собой электрический четырехполюсник.

1.1.1. Классификация усилителей

Усилители, предназначенные для совершенно различных целей, могут обладать идентичными свойствами. При проведении классификации будем учитывать:

- полосу и абсолютные значения усиливаемых частот,
- характер входного сигнала;
- назначение усилителя;
- вид используемых активных элементов.

По первому признаку усилители можно разделить на усилители постоянного тока (УПТ), усилители низкой частоты (УНЧ), усилители высокой частоты (УВЧ). УПТ способны усиливать сигналы с частотами от $f_H = 0$ до некоторой, обычно не очень высокой, частоты f_B (рис. 1.1,а). УНЧ эффективно усиливают переменные составляющие сигнала в диапазоне от низкой частоты $f_H > 0$ до некоторой высокой частоты f_B (рис. 1.1,б). Обычно эти усилители имеют большое отношение $f_B/f_H = 10^2-10^6$. УНЧ с $f_B > 100$ кГц называют широкополосными. УВЧ усиливают сигналы со спектром, сосредоточенным в относительно узкой полосе частот вблизи средней частоты f_0 (рис. 1.1,в). Для УВЧ характерно выполнение условий $f_B/f_H \approx 1$, $f_B - f_H \ll f_0$. Это избирательные (селективные) усилители.

По второму признаку усилители можно разделить на усилители непрерывных сигналов и усилители импульсных сигналов (импульсные усилители). К первой (второй) группе относятся устройства для усиления сигналов, изме-

няющихся настолько медленно (быстро), что с процессом их установления в усилителе можно (нельзя) не считаться.

По третьему признаку усилители можно разделить на усилители напряжения, усилители тока и усилители мощности в зависимости от основной задачи воспроизведения сигнала на более высоком уровне напряжения, тока или мощности.

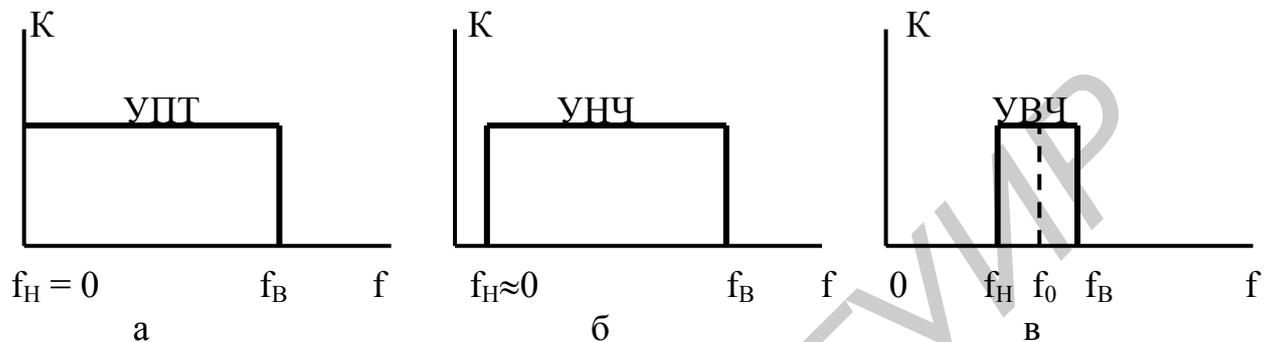


Рис. 1.1. Полосы рабочих частот усилителей УПТ (а), УНЧ (б), УВЧ (в)

Во всех случаях происходит усиление мощности сигнала, но обычно под усилителями мощности понимают выходные каскады усилителя.

Четвертый признак характеризует усилитель по виду применённых в нем активных усилительных элементов, и в соответствии с этим усилители делятся на ламповые, транзисторные, магнитные, диэлектрические и т.д.

1.1.2. Активные элементы усилителей

В практических схемах усилителей наиболее широко используются ламповые и транзисторные усилительные элементы. Благодаря высокому входному сопротивлению участка сетка–катод лампа управляется напряжением источника входного сигнала, практически не забирая от него тока, а следовательно, и мощности. Поэтому ламповый активный элемент позволяет получить очень большое усиление мощности сигнала. Помимо этого применение ламп обеспечивает усиление сигналов с широким спектром и хорошую линейность таких усилителей.

Недостатки ламповых усилителей: ограниченный срок службы, низкий КПД по анодной цепи, чувствительность к вибрациям, наличие цепи накала. Во многих случаях эти недостатки не играют существенной роли, поэтому усилители на электронных лампах все еще находят применение.

Транзисторы выгодно отличают от ламп малые размеры, превосходные частотные свойства, хорошая виброустойчивость, практически неограниченный срок службы.

Недостатки транзисторных усилителей: сравнительно малое входное сопротивление, температурная нестабильность параметров. Однако эти недостатки успешно преодолеваются промышленностью, поэтому транзисторы во все возрастающем количестве замещают лампы.

Приступая к расчету усилительного каскада, сначала необходимо ознакомиться с краткими теоретическими сведениями, а затем рассмотреть типовой расчет усилительного каскада, приведенный в следующем разделе настоящего учебного пособия.

1.1.3. Основные характеристические параметры усилителей

Усиление сигнала обычно сопровождается некоторым изменением его формы. Необходимые сведения об усилителе должны включать не только количественную оценку самого эффекта усиления, но и характеристики основных свойств усилителя и величины искажений усиливаемых колебаний. Сумму таких сведений об усилителе называют его характеристическими параметрами или показателями. Рассмотрим важнейшие из них.

Комплексный коэффициент усиления

Комплексный коэффициент усиления (коэффициент передачи) определяется отношением комплексных амплитуд напряжений на выходе и входе усилителя:

$$K(i\omega) = \dot{U}_{ВЫХ} / \dot{U}_{ВХ} = |K(i\omega)| e^{i\varphi(\omega)}. \quad (1.1)$$

Модуль комплексного коэффициента передачи $K=|K(i\omega)|$ называется коэффициентом усиления, а его зависимость от частоты усиливаемого сигнала – амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) усилителя. Аргумент $\varphi(\omega)$ представляет собой фазочастотную характеристику (ФЧХ) усилителя и характеризует частотную зависимость фазового сдвига выходного гармонического колебания относительно входного.

Коэффициент усиления измеряется в логарифмических единицах – децибелах:

$$K(\text{дБ}) = 20 \lg K. \quad (1.2)$$

Децибелы применяют не только для сравнения двух величин. Они удобны и для оценок конкретных значений мощностей. При этом за условный нулевой уровень электрического сигнала принята мощность $P = 1$ мВт, выделяемая на активном сопротивлении $R = 600$ Ом, в сфере кабельного телевидения и радиовещательных сетях используется абсолютная единица, называемая децибел-милливольт (дБмВ), когда 0 дБмВ соответствует напряжению 1 мВ, действующее на сопротивлении $R=75$ Ом.

Широкое применение децибелов, особенно в акустике, объясняется свойством органов слуха (а также зрения) реагировать на раздражение в логарифмической зависимости. Например, если УНЧ развивает на выходе 10 Вт, то для того чтобы ухо ощутило вдвое большую громкость, понадобится почти десятикратное увеличение выходной мощности усилителя. 1 дБ улавливается ухом как едва заметное изменение громкости. Динамический диапазон человеческой

речи составляет приблизительно 25 дБ, т.е. мощность громкого крика в 300 раз больше самого тихого шепота: $K(\text{дБ})=10\lg 300=24,771$ дБ.

Линейные искажения

Линейные искажения возникают в двух случаях:

1) когда отдельные гармонические составляющие входного сигнала усиливаются неодинаково;

2) когда фазовые сдвиги, которые приобретают гармонические составляющие сигнала, пройдя через усилитель, изменяют их взаимный сдвиг во времени.

Чтобы усилитель в полосе рабочих частот не вносил линейных искажений, его АЧХ должна быть прямоугольной, а ФЧХ – линейной (рис. 1.2, а, б).

При наличии линейных искажений форма сигнала на выходе усилителя может отличаться от его формы на входе, но при этом новых частот в спектре выходного сигнала не возникает.

На рис. 1.2 цифрой 1 отмечены характеристики усилителя, не вносящего линейных искажений при усилении сигнала, а цифрой 2 – характеристики усилителя, вносящего искажения вследствие действия этих обоих факторов.

Чаще всего фазовые искажения не нормируются и линейные искажения оценивают коэффициентами $M_B=K_0/K_B$ и $M_H=K_0/K_H$, где K_H , K_B и K_0 – коэффициенты усиления на нижней, верхней и средней частотах соответственно. Обычно $M_B=0,9\dots 1,1$ и $M_H=0,9\dots 1,1$.

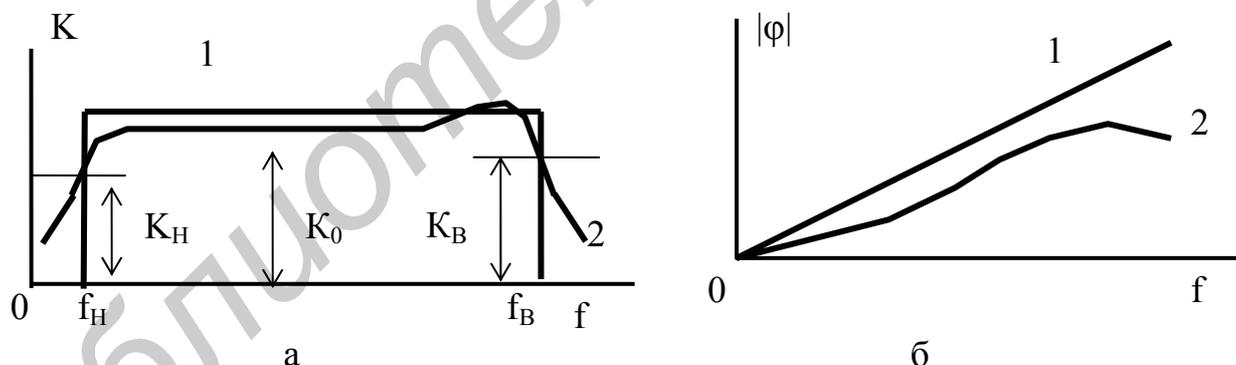


Рис. 1.2. Идеальные (1) и реальные (2) АЧХ (а) и ФЧХ (б) усилителя

Однако при использовании усилителей для обработки телевизионных сигналов во избежание неправильной передачи яркости и цвета изображения нужно учитывать линейные искажения, возникающие из-за влияния нелинейности ФЧХ усилителей.

Нелинейные искажения

Причиной нелинейных искажений является прохождение сигнала через элементы, имеющие нелинейную вольт-амперную характеристику, например, лампу, транзистор, трансформатор, в результате чего искажается форма коле-

баний и изменяется их спектральный состав. Расчет величины нелинейных искажений сводится к определению амплитуды основной I_1 и высших гармонических составляющих I_2, I_3, \dots и оценивается коэффициентом гармоник

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1}. \quad (1.3)$$

Нормы на допустимые величины нелинейных искажений определяются назначением усилителя и имеют порядок 0,5–3,0%. Для многокаскадного усилителя

$$K_{\Gamma} \leq K_{\Gamma 1} + K_{\Gamma 2} + K_{\Gamma 3} + \dots \quad (1.4)$$

Коэффициент полезного действия усилителя

КПД усилителя определяется отношением

$$\eta = P_{\text{H}}/P_0, \quad (1.5)$$

где P_{H} – мощность, развиваемая в нагрузке усилителя; P_0 – мощность, потребляемая от источника питания.

КПД используемых в различных устройствах усилителей составляет величину от единиц до нескольких десятков процентов.

1.2. ВЫБОР И СТАБИЛИЗАЦИЯ СТАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Выбор исходного режима транзистора в усилительном каскаде осуществляется с помощью характеристик по постоянным составляющим соответствующих токов и напряжений.

1.2.1. Статические характеристики транзистора

Число возможных представлений зависимостей между токами и напряжениями в транзисторе велико. Однако для расчета транзисторного усилителя достаточно иметь два основных семейства статических характеристик транзистора: семейство выходных статических характеристик $I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}})$ для различных значений входного тока и семейство входных статических характеристик $I_{\text{ВХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ для различных напряжений на выходном электроде. Выходные и входные статические характеристики транзистора различны для различных схем включения, поэтому для трех схем включения транзистора существуют три семейства выходных и три семейства входных статических характеристик.

При расчете каскада с транзистором, включенным по схеме с общим эмиттером, используют выходные и входные характеристики для включения

транзистора по схеме с общим эмиттером, т.е. зависимости $I_K=f(U_K)$ при $I_B=\text{const}$ (рис.1.3,а) и $I_B=f(U_B)$ при $U_K=\text{const}$ (рис. 1.3,б).

По выходным характеристикам можно непосредственно оценить выходное сопротивление транзистора в рабочей точке $R_{\text{ВЫХ}} = \Delta U_K/\Delta I_K$, коэффициент усиления по току $\beta = \Delta I_K/\Delta I_B$ при $R_H = 0$ и $U_K = \text{const}$.

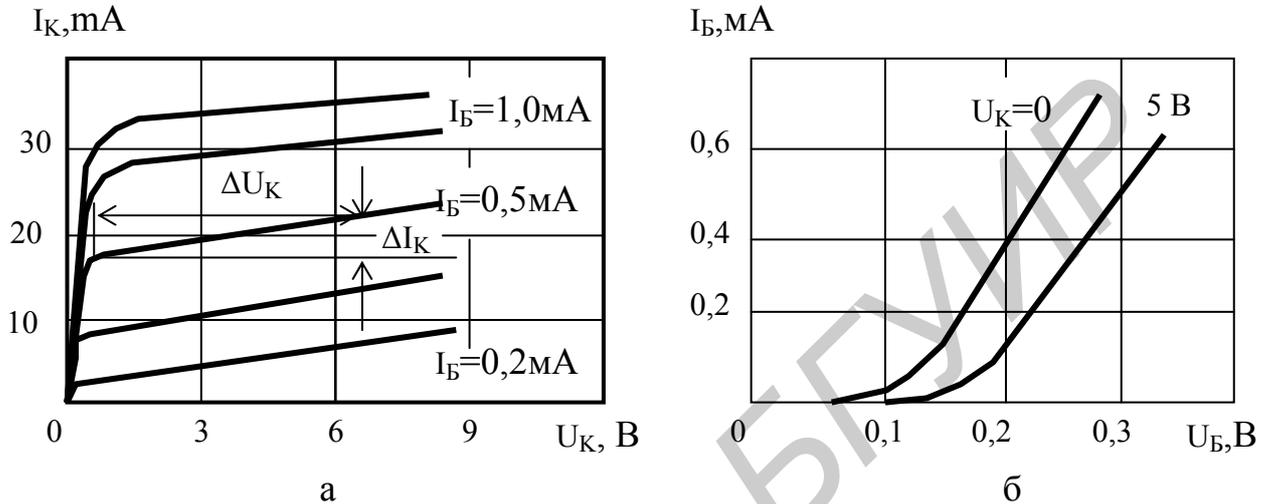


Рис. 1.3. Выходные (а) и входные (б) статические характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

По входным характеристикам аналогично определяется входное сопротивление $R_{\text{ВХ}} = \Delta U_B/\Delta I_B$ транзистора току сигнала при $U_K = \text{const}$, как тангенс угла наклона касательной к характеристике, проведенной через рабочую точку.

1.2.2. Динамические характеристики транзисторного каскада

При расчете транзисторных каскадов, кроме статических, находят применение три типа динамических характеристик: выходные, входные, сквозные (проходные).

Выходная динамическая характеристика

Применительно к транзистору, включенному по схеме с общим эмиттером, выходной динамической характеристикой является зависимость коллекторного тока от тока базы при наличии сопротивления нагрузки в коллекторной цепи R_K и постоянства напряжения источника питания $E_K = \text{const}$. Выходную динамическую характеристику строят на семействе выходных статических характеристик транзистора. Так как она представляет собой прямую линию, её нередко называют нагрузочной прямой (рис.1.4,а). При известных E_K и R_K целесообразно выбирать исходную рабочую точку в области значений коллекторного тока $I_K = E_K/2R_K$ (вблизи точки N на рис.1.4,а), так как в этом случае обеспечиваются минимальные нелинейные искажения. К этому же результату мож-

но прийти, построив с помощью рис. 1.4,а динамическую характеристику $I_K=f(I_B)$ при заданных E_K и R_K и определив на ней середину линейного участка (рис.1.4,б). По рис.1.4 легко оценить наибольшие возможные значения входного и выходного токов, при которых усилитель будет обеспечивать заданные параметры усиления.

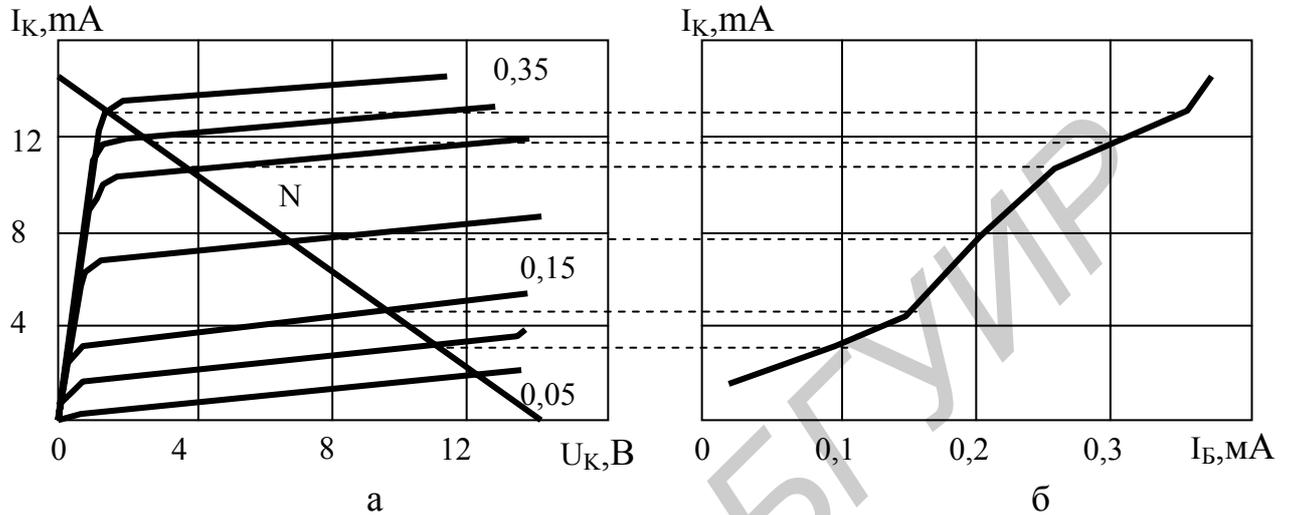


Рис. 1.4. Семейство выходных статических характеристик (а) и динамическая выходная характеристика (б)

Динамическая выходная характеристика используется для построения сквозной динамической характеристики.

Входная динамическая характеристика

Входная динамическая характеристика — это зависимость входного тока I_B от напряжения входного сигнала U_B при наличии сопротивления R_K в коллекторной цепи и $E_K = \text{const}$. Эту характеристику строят на семействе входных статических характеристик транзистора. Построение выполняют путем переноса точек пересечения нагрузочной прямой со статическими выходными характеристиками транзистора на семейство входных статических характеристик. По входной динамической характеристике каскада можно оценить амплитуды напряжения входного сигнала и переменной составляющей входного тока, по которым можно рассчитать необходимую мощность входного сигнала. Входная динамическая характеристика используется для построения сквозной динамической характеристики усилительного каскада.

З а м е ч а н и е. Так как в справочных данных транзистора обычно даются статические входные характеристики только для напряжения на коллекторе 0 и 5 В, то в качестве входной динамической характеристики усилительного каскада используют входную статическую характеристику для напряжения на коллекторе 5 В, перенося на неё точки пересечения нагрузочной прямой со статическими выходными характеристиками транзистора.

Сквозная динамическая характеристика

Сквозная динамическая характеристика представляет собой зависимость коллекторного тока от ЭДС источника сигнала и используется для расчета коэффициента нелинейных искажений транзисторного каскада.

Для построения динамической сквозной характеристики вычисляют для точек пересечения нагрузочной прямой со статическими выходными характеристиками значения ЭДС источника сигнала U_C входной цепи по выражению

$$U_C = U_B + I_B R_C, \quad (1.6)$$

где R_C – внутреннее сопротивление источника сигнала переменному току, равное выходному сопротивлению предыдущего каскада для переменного тока; U_B, I_B – входное напряжение и входной ток для взятых точек пересечения.

Оптимальное сопротивление источника входного сигнала выбирается в пределах $R_C = (2 \dots 5) R_{ВХ}$

1.2.3. Питание цепей транзисторов

Питание всех цепей транзисторного усилителя обычно осуществляется от одного общего источника постоянного тока, к которому параллельно подключают питаемые цепи. Для установления необходимого режима на базу транзистора относительно эмиттера подают небольшое смещение, используя делитель напряжения или гасящее сопротивление.

Цепь смещения с фиксированным током базы

Простейшим способом подачи смещения в транзисторном каскаде (рис.1.5) является осуществление его через гасящее сопротивление R_1 , во много раз превышающее сопротивление между базой транзистора и общим проводом.

Ток смещения в этом случае определяется величиной R_1 , напряжением источника питания и не меняется при изменении температуры транзистора, его старении и замене. Поэтому данный способ подачи смещения на базу транзистора называют смещением с фиксированным током базы. Значение R_1 в этом случае рассчитывают по формуле

$$R_1 = \frac{E_K - U_B}{I_B} = \frac{\alpha(E_K - U_B)}{I_K(1 - \alpha) - I_{K0}}. \quad (1.7)$$

Здесь величина

$$\alpha = \frac{I_K - I_{K0}}{I_{\mathcal{E}}}$$

называется статическим (интегральным) коэффициентом передачи эмиттерного тока и составляет 0,95–0,99; ток I_{K0} представляет собой обратный ток коллектора транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, а $I_{\mathcal{E}} = I_K + I_B$.

Действительно, источником управляющего напряжения в этой схеме является общая батарея E_K . Величина управляющего тока I_B и, соответственно,

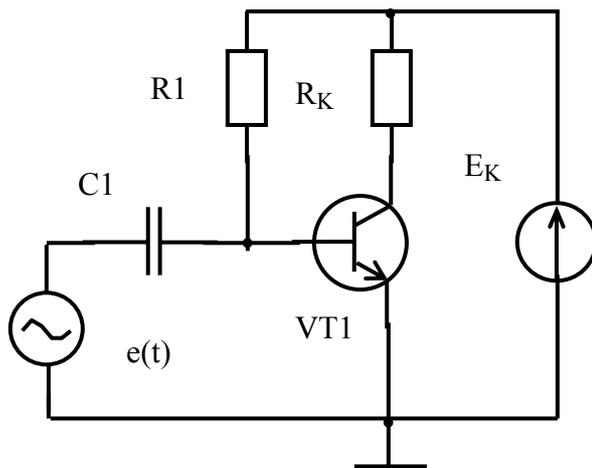


Рис.1.5. Смещение фиксированным током базы

что кроме тока, определяемого соотношением (1.8), в коллекторной цепи протекает еще ток

$$I_K'' = \beta I_{K0} + I_{K0} = (\beta + 1)I_{K0}. \quad (1.9)$$

Поэтому в рассматриваемой схеме полное значение коллекторного тока определяется суммой

$$I_K = I_K' + I_K'' = \beta I_B + (\beta + 1)I_{K0}. \quad (1.10)$$

Теперь легко определить ток, протекающий по резистору $R1$,

$$I_B = \frac{I_K - (\beta + 1)I_{K0}}{\beta} = \frac{I_K(1 - \alpha) - I_{K0}}{\alpha}, \quad (1.11)$$

откуда следует соотношение (1.7).

Однако вследствие сильного изменения параметров транзисторов в зависимости от температуры и большого разброса их статического коэффициента усиления тока смещение фиксированным током базы непригодно для серийной и массовой аппаратуры, а также для приборов, работающих в широком интервале температур.

Цепь смещения с фиксированным напряжением

Фиксированное смещение на транзистор можно подать от общего источника через делитель из резисторов $R1$ и $R2$. Сопротивление делителя желательно иметь меньше сопротивления постоянному току участка база—общий провод. При этом напряжение смещения остается практически неизменным при изменении температуры, старении и замене транзистора. Поэтому такой способ подачи смещения называют смещением с фиксированным напряжением.

Для схемы, показанной на рис. 1.6, резисторы рассчитывают по формулам

полный ток коллектора в ней определяются резистором $R1$. В соответствии с основным уравнением транзистора любой ток, протекающий по цепи база—эмиттер, вызывает появление в β раз большего по величине тока в цепи коллектора, т.е.

$$I_K' = \beta I_B, \quad (1.8)$$

где $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ — коэффициент усиления транзистора по току в схеме с общим эмиттером; I_B — ток в цепи база—эмиттер.

Кроме управляющего тока I_B , в цепи база—эмиттер протекает ток I_{K0} (обратный ток коллектора). Это значит,

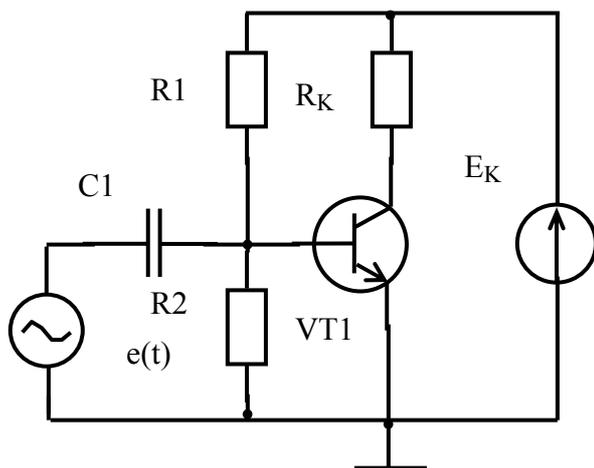


Рис.1.6. Цепь смещения с фиксированным напряжением

$$R1 = \frac{E_K - U_B}{I_D + I_{B_{cp}}}, \quad R2 = \frac{U_B}{I_D}, \quad (1.12)$$

где $I_{B_{cp}}$ – среднее значение тока базы за период при максимальном расчетном сигнале; I_D – ток делителя через резистор R2.

Обычно выбирают $I_D = (1 - 5)I_{B_{cp}}$ в зависимости от мощности и режима работы транзистора. Чем больше ток делителя, тем выше стабильность работы каскада, так как положение рабочей точки определяется именно током делителя. Однако очень большой ток делителя устанавливать нельзя, поскольку

при подаче смещения фиксированным напряжением от источника питания расходуется дополнительно энергия в делителе R1R2, что делает этот способ неэкономичным. Чаще всего ток делителя I_D только в два раза превышает величину среднего тока базы $I_{B_{cp}}$.

Методы стабилизации положения рабочей точки

Выпускаемая заводами аппаратура должна сохранять гарантируемые свойства при установке в неё любых исправных экземпляров транзисторов рекомендованного типа и при изменении температуры окружающей среды в заданных пределах. Влияние температурных изменений усилительных параметров (α , β , $R_{вх}$) на положение рабочей точки несущественно. Определяющим является изменение тока I_{K0} , который у германиевых транзисторов увеличивается вдвое на каждые 10°C , а у кремниевых - втрое (абсолютное значение I_{K0} у кремниевых транзисторов на 3 порядка ниже, чем у германиевых). Количественно нестабильность транзисторного каскада оценивается отношением

$$S = \Delta I_K / \Delta I_{K0}, \quad (1.13)$$

называемым коэффициентом нестабильности. Здесь ΔI_K и ΔI_{K0} - изменения тока коллектора и обратного тока соответственно. Для большинства практических схем $S = 3 - 6$.

Коллекторная стабилизация положения рабочей точки

Принцип действия коллекторной стабилизации рассмотрим на примере схемы, приведенной на рис.1.7. К резистору R1 практически приложена разность напряжения источника питания E_K и падения напряжения на сопротивлении нагрузки R_K . Напряжение $U_{БЭ}$, имеющееся между базой и эмиттером, ничтожно по сравнению с напряжением на R1. Если при замене транзистора или от изменения температуры ток покоя выходной цепи стремится возрасти, паде-

ние напряжения на R_K увеличивается, напряжение на $R1$ уменьшается и ток смещения падает, что сильно снижает возрастание коллекторного тока. При стремлении тока покоя коллектора к уменьшению процесс стабилизации происходит обратным образом.

Коллекторная стабилизация проста и экономична, однако степень стабилизации в ней зависит от резисторов R_K и $R1$, определяющих положение рабочей точки. Коллекторная стабилизация удовлетворительно действует лишь при большом падении напряжения на сопротивлении нагрузки (порядка $0,5 E_K$ и более), небольших изменениях коэффициента усиления тока транзисторов и малых изменениях I_{K0} . Изменение положения рабочей точки при коллекторной стабилизации намного меньше, чем в нестабилизированном каскаде, однако все же значительно, что может не обеспечить взаимозаменяемости транзисторов и затрудняет работу в широком интервале температур.

При включении транзистора с общим эмиттером (см. рис.1.7) коллекторная стабилизация снижает усиление и входное сопротивление каскада, так как напряжение выходного каскада подается через $R1$ во входную цепь, что создает в каскаде отрицательную обратную связь по переменному току, величина которой зависит от величин R_K и $R1$. Для устранения этого $R1$ можно разделить на две примерно равные части, между этими частями и общим проводом включают блокировочный конденсатор C достаточно большой емкости (рис.1.8).

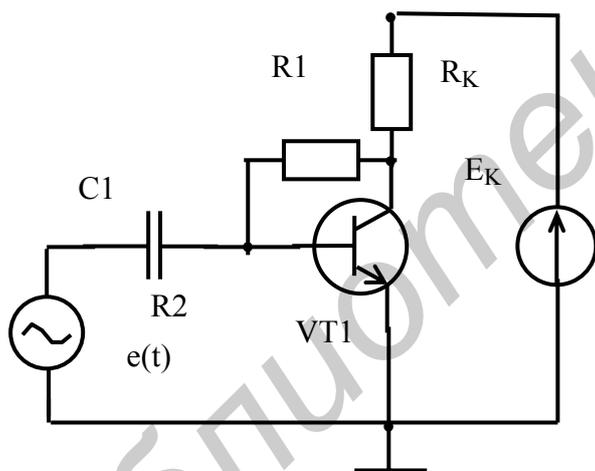


Рис.1.7. Коллекторная стабилизация положения рабочей точки

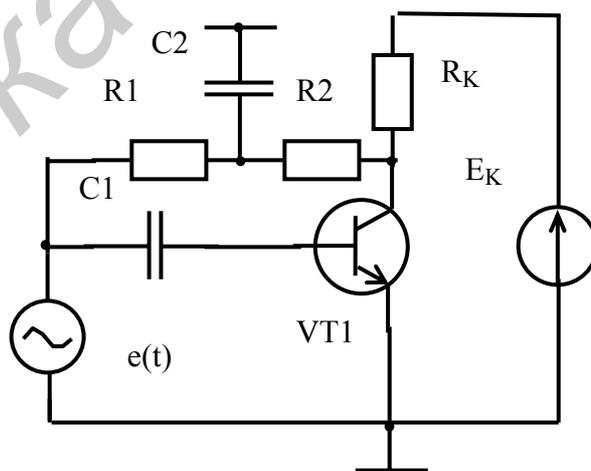


Рис.1.8. Устранение обратной связи по переменному току в цепи коллекторной стабилизации положения рабочей точки

Эмиттерная стабилизация рабочей точки

Более высокую стабильность положения рабочей точки обеспечивает схема эмиттерной стабилизации, варианты которой для схемы с общим эмиттером приведены на рис 1.9. Частичная стабилизация рабочей точки по постоянному току здесь достигается уже тем, что смещение на базу подается от делителя напряжения R_{B1} и R_{B2} или от отдельного источника и напряжение смещения мало зависит от параметров транзистора.

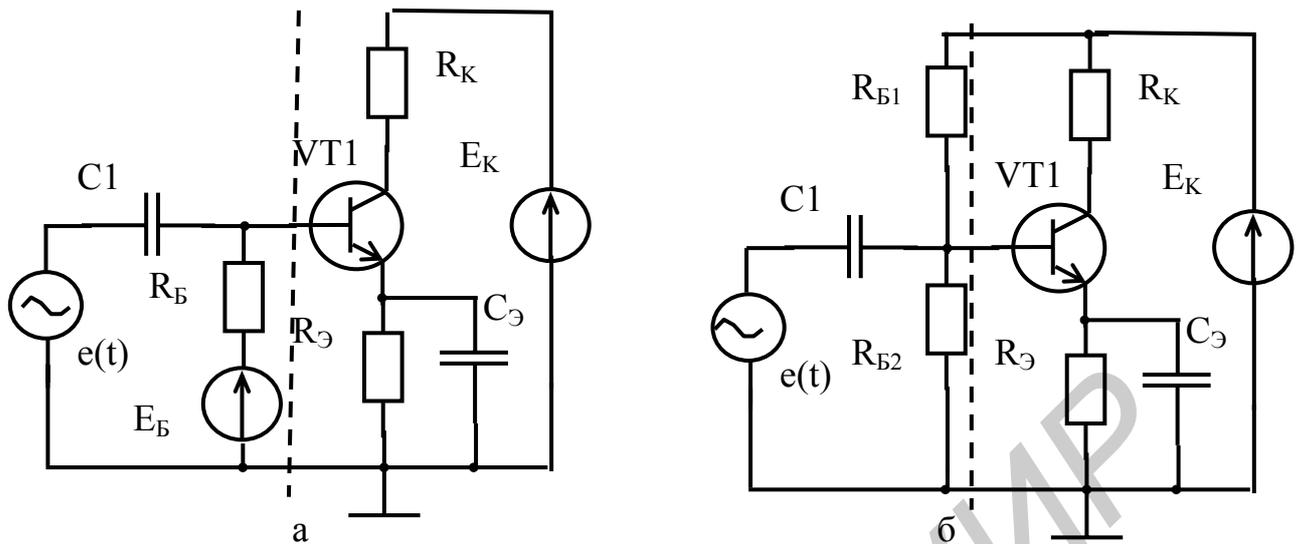


Рис.1.9. Эмиттерная стабилизация положения рабочей точки с отдельным источником смещения (а) и с общим питанием (б)

Дальнейшая стабилизация режима в этих схемах осуществляется отрицательной обратной связью, получаемой за счет введения в цепь эмиттера резистора $R_Э$, зашунтированного для устранения обратной связи по переменному току большой емкостью $C_Э$. Напряжение смещения между базой и эмиттером $U_{БЭ}$ здесь равно разности напряжения, снимаемого с резистора $R_{Б2}$, и падения напряжения на $R_Э$ (рис.1.9,б). При возрастании тока покоя коллектора I_K ток покоя эмиттера также растет, увеличивается падение напряжения на $R_Э$, что сильно уменьшает напряжение смещения между базой и эмиттером, тем самым подзапирая транзистор. В результате этого ток покоя коллектора возрастает во много раз меньше, чем без применения стабилизации.

Стабильность рабочей точки тем выше, чем больше $R_Э$ и чем меньше $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$. Однако $R_Э$ не должно быть очень большим, так как при этом напряжение между коллектором и эмиттером $U_{КЭ}$ окажется слишком малым; сопротивление делителя $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$ также нельзя брать слишком малым, поскольку с уменьшением $R_{Б1}+R_{Б2}$ увеличивается мощность, потребляемая делителем от источника питания, и сильно шунтируется входная цепь транзистора.

Рассмотрим более подробно работу схем рис.1.9. Схему рис.1.9,б можно привести к схеме рис.1.9,а, воспользовавшись теоремой об эквивалентном генераторе для части схемы, расположенной левее вертикальной пунктирной линии.

Параметры эквивалентной схемы

$$E_B = E_K R_{Б2} / (R_{Б1} + R_{Б2}), \quad (1.14)$$

$$R_B = R_{Б1} R_{Б2} / (R_{Б1} + R_{Б2}). \quad (1.15)$$

Составим для схемы рис.1.9,а систему уравнений

$$\begin{cases} I_K = I_{K0} + \alpha I_Э, \\ I_Э = I_K + I_B, \\ E_B = I_B R_B + I_Э R_Э. \end{cases} \quad (1.16)$$

Отсюда получаем

$$I_K = SI_{K0} + (S - 1)E_B / R_B, \quad (1.17)$$

$$S = (1 + R_{Э} / R_B) / (1 - \alpha + R_{Э} / R_B). \quad (1.18)$$

Для схемы рис.1.9,б эти выражения принимают вид

$$I_K = SI_{K0} + (S - 1)E_K / R_{B1}, \quad (1.19)$$

$$S = \frac{1 + R_{Э}(R_{B1} + R_{B2}) / R_{B1}R_{B2}}{1 - \alpha + R_{Э}(R_{B1} + R_{B2}) / R_{B1}R_{B2}}. \quad (1.20)$$

На основании выражений (1.17—1.20) по известным I_K , I_{K0} , S , E_K определяются величины R_B , R_{B1} , R_{B2} , $R_{Э}$.

1.3. АНАЛИЗ РАБОТЫ ЛИНЕЙНОГО ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Целью исследования работы каскада усилителя является установление зависимости между величинами напряжения и тока, действующими на выходе усилителя, и величинами напряжения и тока, действующими на его входе. Связь между этими величинами может быть выражена как графически с помощью семейства входных и выходных характеристик, так и аналитически путем исследования уравнений, выражающих взаимную связь токов и напряжений, действующих на входе и выходе усилителя. Графический метод обычно используется для определения исходного режима работы усилительного элемента (режима покоя) и для анализа его работы при относительно больших уровнях входного сигнала.

Аналитический метод используется для анализа работы каскада, вывода расчетных соотношений, позволяющих вычислять параметры элементов, входящих в схему усилителя, поиска оптимальных условий реализации схемы усилителя.

1.3.1. Эквивалентная схема апериодического транзисторного усилителя

В общем случае транзистор можно изобразить в виде устройства с двумя входами и двумя выходами (рис.1.10). Такие устройства называются четырехполюсниками. Физические свойства четырехполюсника можно описать с помощью четырех в общем случае комплексных электрических величин: $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_2$.

Связь между этими величинами можно выразить, например, с помощью таких уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = h_{11}\dot{I}_1 + h_{12}\dot{U}_2, \\ \dot{I}_2 = h_{21}\dot{I}_1 + h_{22}\dot{U}_2. \end{cases} \quad (1.21)$$

Здесь h_{11} – входное сопротивление четырехполюсника при короткозамкнутых зажимах на выходе; h_{12} – коэффициент обратной связи по напряжению при ра-

замкнутым входе; h_{21} – коэффициент усиления по току при короткозамкнутых выходных зажимах; h_{22} – выходная проводимость при разомкнутых входных зажимах.

В соответствии с этими уравнениями можно построить эквивалентную схему транзистора, работающего в линейном режиме, т.е. при малом уровне входного сигнала (рис.1.11).

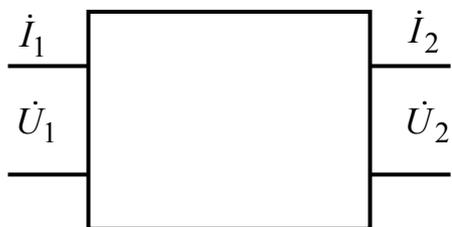


Рис.1.10. Усилитель как четырехполюсник

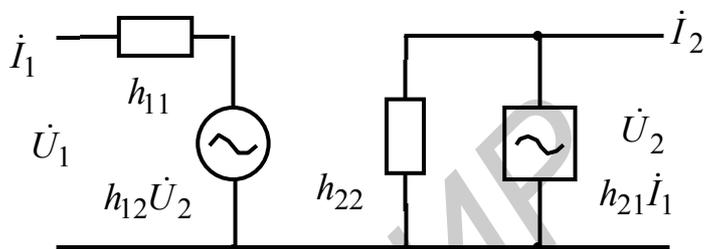


Рис.1.11. Эквивалентная схема транзистора в линейном режиме

Значения эквивалентных параметров четырехполюсника можно измерить с помощью специальных приборов или, например, для транзистора, взять из справочника. В общем случае параметры транзистора являются комплексными, однако в целях упрощения проведения анализа мы будем предполагать, что они являются действительными. Кроме того, допустим, что подключенный ко входу транзисторного усилителя генератор является источником напряжения, т.е. его внутреннее сопротивление равно нулю.

В качестве предмета анализа будем рассматривать схему с общим эмиттером (рис. 1.12), как наиболее распространенную, и положим $R_3 = 0$.

Учитывая, что источник питания представляет для токов высокой частоты бесконечно малое сопротивление, построим эквивалентную схему усилителя (рис.1.13) и используем ее для анализа частотных свойств апериодического усилителя на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.

1.3.2. АЧХ апериодического транзисторного усилителя

Исследуем вопрос о том, как элементы схемы каскада влияют на форму частотной зависимости коэффициента усиления, на примере двухкаскадного усилителя, использующего в качестве нагрузки резисторы (апериодический усилитель) (см. рис. 1.12). Будем считать, что рабочая точка для каждого транзистора выбрана в середине линейного участка вольт-амперной характеристики, а уровень входного сигнала настолько мал, что можно использовать две совершенно одинаковые схемы усилительных каскадов, соединенных последовательно.

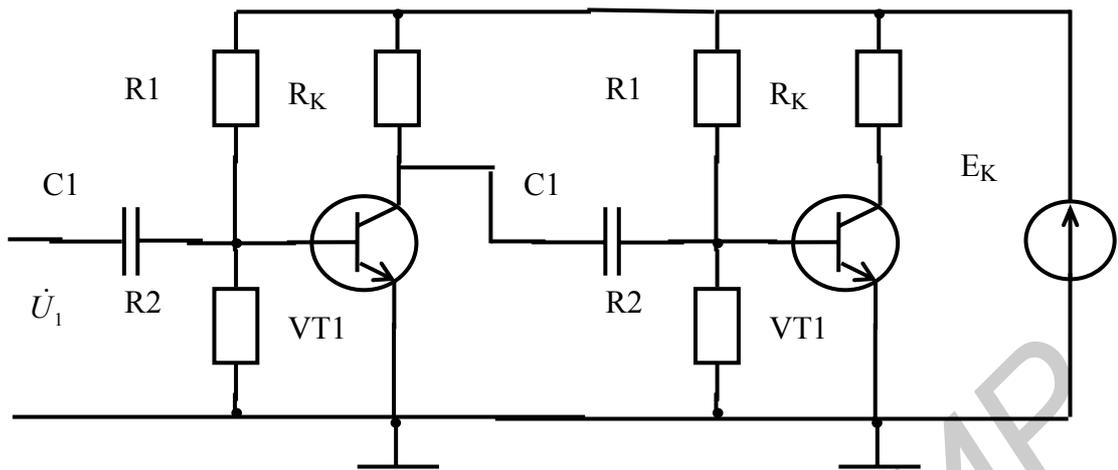


Рис.1.12. Схема двухкаскадного аperiodического усилителя

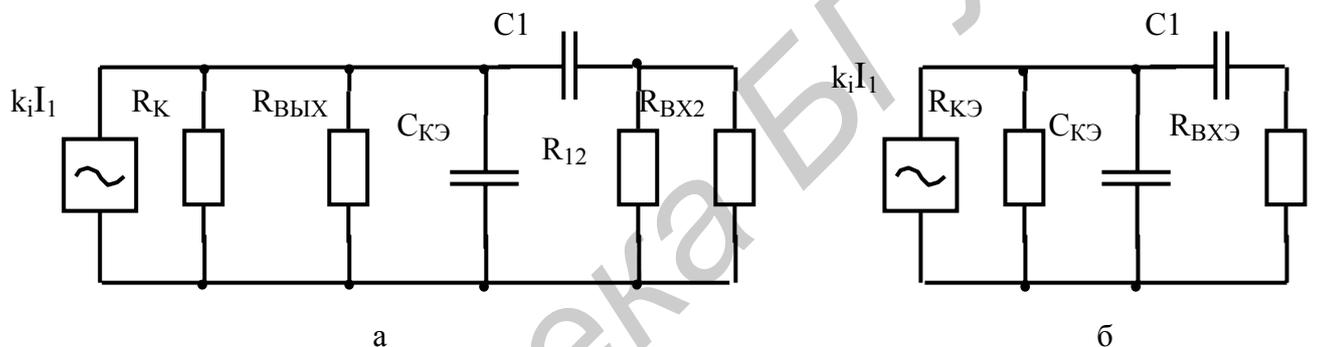


Рис.1.13. Полная (а) и приведенная (б) эквивалентные схемы аperiodического усилительного каскада

В эквивалентной схеме рис.1.13 приняты обозначения: k_i – коэффициент усиления по току; $k_i I_1$ – генератор тока, равного I_2 (см. рис.1.11), эквивалентный транзистору VT1; $R_{\text{ВЫХ}}$ – выходное сопротивление транзистора VT1; R_K – сопротивление в цепи коллектора транзистора VT1; $R_{\text{ВХ2}}$ – входное сопротивление второй усилительной ступени; R_{12} – эквивалентное сопротивление цепи смещения

$$R_{12} = \frac{R1 R2}{R1 + R2}; \quad (1.22)$$

$C1$ – разделительный конденсатор (благодаря наличию этого конденсатора оба усилительных каскада работают независимо по постоянному току); $C_{\text{КЭ}}$ – конденсатор, отражающий наличие паразитной емкости (эта емкость учитывает паразитные связи, порой очень трудно поддающиеся локализации, тем не менее ее подключают обычно между коллектором и эмиттером транзистора).

Эквивалентную схему рис.1.13,а можно привести к виду, показанному на рис.1.13,б, где

$$R_{KЭ} = R_K R_{BЫX} / (R_K + R_{BЫX}), \quad (1.23)$$

$$R_{BХЭ} = R_{BХ2} R_{12} / (R_{BХ2} + R_{12}). \quad (1.24)$$

Чтобы провести анализ АЧХ транзисторного каскада в широком диапазоне рабочих частот, рассмотрим поведение эквивалентной схемы в области нижних, верхних и средних частот. Упрощенные эквивалентные схемы усилителя для каждой из названных частотных областей показаны на рис.1.14.

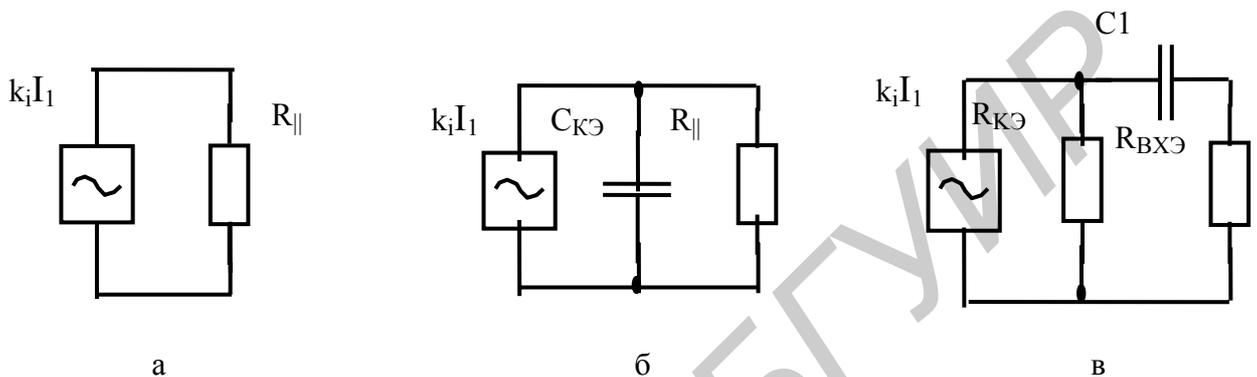


Рис.1.14. Эквивалентные схемы усилительного каскада для средних (а), верхних (б) и нижних (в) частот

Определим коэффициент усиления по напряжению в области средних частот. Из схемы рис.1.14,а имеем:

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \frac{R_{KЭ} R_{BХЭ}}{R_{KЭ} + R_{BХЭ}} = R_{||} \dot{I}_2. \quad (1.25)$$

Здесь

$$R_{||} = \frac{R_{KЭ} R_{BХЭ}}{R_{KЭ} + R_{BХЭ}}$$

Так как

$$\dot{I}_2 = k_i \dot{I}_1 = k_i \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \dot{U}_1 = k_i \frac{\dot{U}_1}{R_{BХ}}, \quad (1.26)$$

то комплексный коэффициент передачи усилителя по току

$$K_u = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{k_i R_{||}}{R_{BХ}} = K_0. \quad (1.27)$$

Здесь $R_{BХ} = \dot{U}_1 / \dot{I}_1$ — входное сопротивление транзисторного каскада.

Из (1.27) следует, что коэффициент усиления на средних частотах не зависит от частоты. Поэтому в области средних частот АЧХ усилителя представляет собой прямую линию, параллельную оси частот.

Рассмотрим работу схемы в области верхних частот. Из рис.1.14,б имеем:

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \frac{R_{\parallel} \frac{1}{i\omega C_{КЭ}}}{R_{\parallel} + \frac{1}{i\omega C_{КЭ}}} = \dot{I}_2 \frac{R_{\parallel}}{1 + i\omega R_{\parallel} C_{КЭ}}. \quad (1.28)$$

Так как $\dot{I}_2 = k_i \dot{U}_1 / R_{BX}$, то

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{k_i}{R_{BX}} \frac{R_{\parallel}}{1 + i\omega R_{\parallel} C_{КЭ}}, \quad (1.29)$$

откуда

$$K_u = \dot{U}_2 / \dot{U}_1 = K_0 / (1 + i\omega R_{\parallel} C_{КЭ}). \quad (1.30)$$

Из (1.30) следует, что

$$|K_u| = \frac{K_0}{\sqrt{1 + (\omega R_{\parallel} C_{КЭ})^2}}, \quad (1.31)$$

т.е. с увеличением частоты входного сигнала коэффициент усиления каскада уменьшается.

Для изучения работы каскада в области нижних частот воспользуемся эквивалентной схемой (рис. 1.14,в). Учитывая, что выходное напряжение \dot{U}_2 теперь формируется на резисторе $R_{BXЭ}$, на основании этой схемы можно составить выражение для коэффициента усиления по напряжению

$$K_u = \frac{K_0}{1 + \frac{1}{i\omega (R_{КЭ} + R_{BXЭ}) C_1}}. \quad (1.32)$$

Из (1.32) следует, что на нижних частотах

$$K_u = K_0 / \sqrt{1 + \frac{1}{[\omega C_1 (R_{КЭ} + R_{BXЭ})]^2}}, \quad (1.33)$$

т.е. в этом случае с увеличением частоты входного сигнала коэффициент усиления каскада возрастает.

На основании проведенного анализа можно построить АЧХ усилителя для всего диапазона рабочих частот (рис.1.15). Построение АЧХ выполнено следующим образом. АЧХ в области средних частот не зависит от частоты сигнала, поступающего на усилитель, поэтому изображается прямой линией, параллельной оси частот и отстоящей от нее на расстояние K_0 . В области нижних частот АЧХ возрастает с увеличением частоты, поэтому она изображается функцией, возрастающей от некоторого значения, меньшего, чем K_0 , а затем “сшивается” со своими значениями, соответствующими области средних частот. Аналогично выполняется построение АЧХ в области верхних частот. Скорость возрастания АЧХ в области нижних частот зависит от величины емкости разделительного конденсатора C_1 . Чем больше эта емкость, тем меньше скорость возрастания АЧХ и, следовательно, тем более низкие частоты будут проходить через усилитель с минимальными иска-

жениями. С другой стороны, скорость убывания АЧХ усилителя зависит от величины паразитной емкости, учитываемой в схеме величиной некоторого фиктивного конденсатора $C_{кэ}$. Чем больше величина паразитной емкости, тем более низкочастотным оказывается весь усилитель.

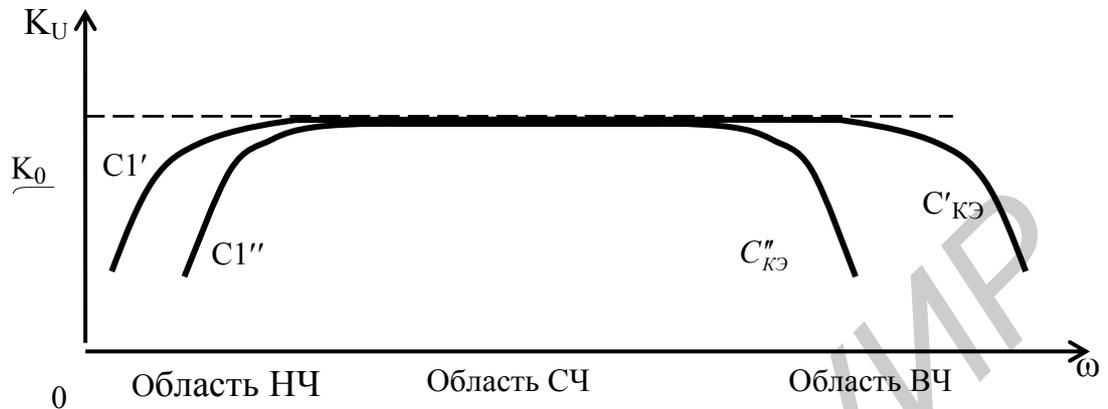


Рис.1.15. Изменение формы амплитудно–частотной характеристики апериодического транзисторного усилителя в зависимости от величин разделительной C_1 и паразитной $C_{кэ}$ емкостей

Из (1.31) и (1.33) следует, что увеличение емкости $C_{кэ}$ снижает усиление в области верхних частот, а увеличение C_1 снижает нижнюю граничную частоту усилителя. Как видно из рис.1.15, полоса рабочих частот усилителя расширяется при $C_1' > C_1''$ в сторону нижних частот и при $C'_{кэ} < C''_{кэ}$ — в сторону верхних частот.

1.3.3. ФЧХ апериодического транзисторного усилителя

Используя эквивалентные схемы, приведенные на рис. 1.14, рассмотрим, какие факторы влияют на форму ФЧХ усилителя.

На средних частотах коллекторный ток транзистора $I_K = S U_{BX}$ протекает по чисто активному сопротивлению. Так как нагрузка $R_{||}$ в этом случае не зависит от частоты, усиление получается одинаковым на всех частотах, а фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями составляет 180^0 . Этот сдвиг по фазе создает сам транзистор независимо от частоты усиливаемого сигнала. Обычно в каскадах усиления $R_K \ll R_{||}$, поэтому коэффициент усиления можно получить из следующих соотношений:

$$U_{ВЫХ} = I_K R_{||} \approx I_K R_K, K = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = S R_K.$$

Например, у каскада усиления на транзисторе с $S=5$ мА/В и $R_K=2$ кОм коэффициент усиления $K=10$.

На высоких частотах (см. рис. 1.14,б) происходит уменьшение усиления с увеличением частоты усиливаемого сигнала вследствие шунтирующего действия емкости $C_{кэ}$. Выходное напряжение в схеме рис. 1.14,б снимается с параллельно соединенных емкости $C_{кэ}$ и сопротивления $R_{||}$, поэтому оно отстает по фазе от

напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ в схеме на рис 1.14,а. Вследствие этого сдвиг по фазе между выходным и входным напряжениями на высоких частотах меньше 180° .

На низких частотах (см. рис. 1.14,в) цепь $R_{\text{ВХЭ}}C_1$ можно рассматривать как делитель напряжения. Выходное напряжение, поступающее на следующий каскад, снимается с сопротивления $R_{\text{ВХЭ}}$. Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ опережает выходное напряжение в схеме на рис. 1.14,а, так как снимается с активного сопротивления; ток в цепи опережает по фазе приложенное напряжение. Поэтому сдвиг по фазе между выходным и входным напряжениями на низких частотах больше 180° .

Окончательный график ФЧХ аperiodического усилительного каскада приведен на рис. 1.16.

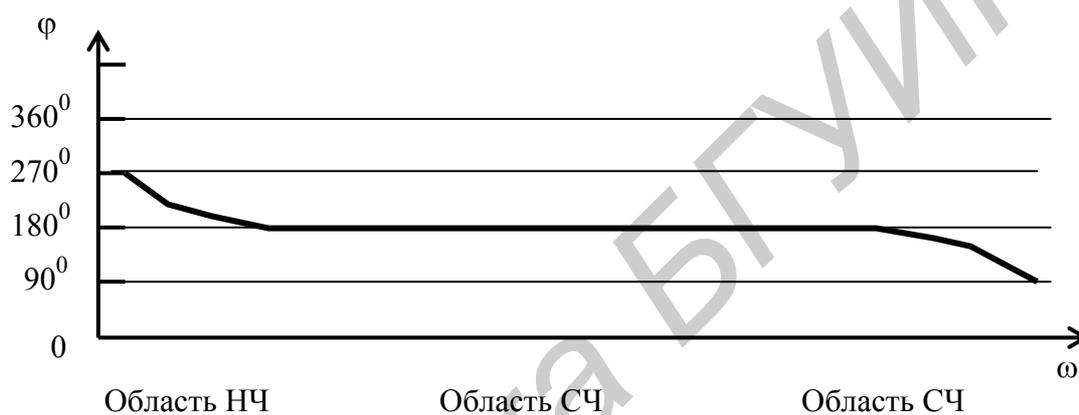


Рис.1.16. ФЧХ аperiodического транзисторного усилителя

1.3.4. Коррекция частотных характеристик усилителя

Полосу рабочих частот усилителя можно расширить с помощью коррекции (исправления) АЧХ. Форму АЧХ можно корректировать как в области низких, так и высоких частот.

Высокочастотная коррекция частотных характеристик усилителя

Простейшим способом расширения АЧХ усилителя в области высоких частот служит использование индуктивности L , подключаемой последовательно с резистором R_K . Поскольку величину индуктивности выбирают небольшой (порядка десятков микрогенри), ее влияние сказывается лишь на высоких частотах, так как индуктивное сопротивление катушки L на низких и средних частотах мало. Нагрузка каскада при введении корректирующей индуктивности на высоких частотах представляет собой параллельный контур, состоящий из индуктивности L , паразитной емкости $C_{KЭ}$ и активного сопротивления R_K . При правильном выборе индуктивности L собственная резонансная частота контура оказывается близкой к верхней граничной частоте некорректированного усилителя, что поднимает усиление в области высоких частот. Если ставится задача

максимально расширить полосу рабочих частот усилителя без подъема частотной характеристики, то выбирают $Q=0,64$. В этом случае необходимое значение корректирующей индуктивности L определяется исходя из соотношения $Q^2=L/C_{кэ}R_{к}$. При таком выборе корректирующей индуктивности полоса рабочих частот усилителя расширяется на 72% и форма АЧХ более всего приближается к прямоугольной. Однако при этом фазовые искажения не являются наименьшими (фазовые искажения минимальны при $Q=0,57$).

На практике очень часто важно получить неискаженную форму усиленных видеоимпульсов. В этих случаях следует выбирать добротность контура выше, чем 0,6. Но тогда возникают искажения вершины импульса, так как при подаче на вход усилителя прямоугольного видеоимпульса происходит ударное возбуждение контура $LC_{кэ}R_{к}$ и в нем возникают собственные быстро затухающие колебания. Если $Q>0,5$, то возникающие колебания носят периодический характер. Если $Q\leq 0,5$, то в контуре имеет место апериодический процесс. При этом на вершине выходного импульса появляется характерный выброс, величина которого увеличивается с ростом выбранной добротности контура $LC_{кэ}R_{к}$, а время нарастания импульса уменьшается. Поэтому обычно выбирают добротность контура $Q=0,5-0,7$.

Низкочастотная коррекция частотных характеристик усилителя

Для коррекции формы АЧХ в области низких частот используется фильтр $R_{ф}C_{ф}$, включаемый между источником питания и коллекторным сопротивлением усилителя (рис. 1.17,а). Одновременно этот фильтр служит целям предотвращения самовозбуждения усилителя из-за положительной обратной связи через источник питания и стабилизирует работу многокаскадного усилителя. Величину $R_{ф}$ можно выбирать в достаточно больших пределах, но чаще всего $R_{ф}=(2-5)R_{к}$. Емкость $C_{ф}$ должна быть настолько большой, чтобы на средних частотах выполнялось неравенство $C\gg 1/2\pi f_{ср}R_{к}$. При таком выборе емкости $C_{ф}$ можно считать, что коллекторной нагрузкой служит только сопротивление $R_{к}\ll R_{кэ}$. Следовательно, коэффициент усиления каскада на средних частотах $K_0=SR_{к}$.

С понижением частоты усиливаемых колебаний сопротивление всех емкостей каскада возрастает и выходное напряжение составляет только часть переменного напряжения, действующего на коллекторе транзистора. Значительная его часть падает на сопротивлении конденсатора C_1 . Это напряжение увеличивается с понижением частоты. Но при наличии коллекторного фильтра при понижении частоты входного сигнала происходит увеличение сопротивления коллекторной нагрузки, которая стремится к максимальной величине $R_{кэ}+R_{ф}$. В результате возрастания величины коллекторной нагрузки происходит увеличение переменного напряжения на коллекторе транзистора. Поэтому частотная характеристика такого усилителя в области низких частот поднимается по сравнению с характеристикой усилителя без фильтра $R_{ф}C_{ф}$.

Максимальное расширение полосы пропускания реостатного транзисторного усилителя в области низких частот получается при $C_{\Phi}R_K=C_1R_{ВХЭ}$, откуда необходимая величина емкости конденсатора фильтра равна

$$C_{\Phi}=C_1R_{ВХЭ}/R_K.$$

В этом случае нижняя граничная частота усилителя с коррекцией определяется по формуле

$$f_{НГ}=1/2\pi C_{\Phi}R_{\Phi}=R_K/2\pi C_{\Phi}R_{ВХЭ}.$$

Таким образом, в усилителе с низкочастотной коррекцией нижняя граничная частота полосы рабочих частот может быть значительно уменьшена. Для этого при выбранных значениях величин C_1 , R_K и $R_{ВХЭ}$ следует увеличивать сопротивление R_{Φ} . Наибольшая величина сопротивления R_{Φ} ограничивается допустимым падением постоянного напряжения на нем за счет постоянной составляющей коллекторного тока транзистора. Ориентировочно можно считать верхним пределом $R_{\Phi}=10R_K$.

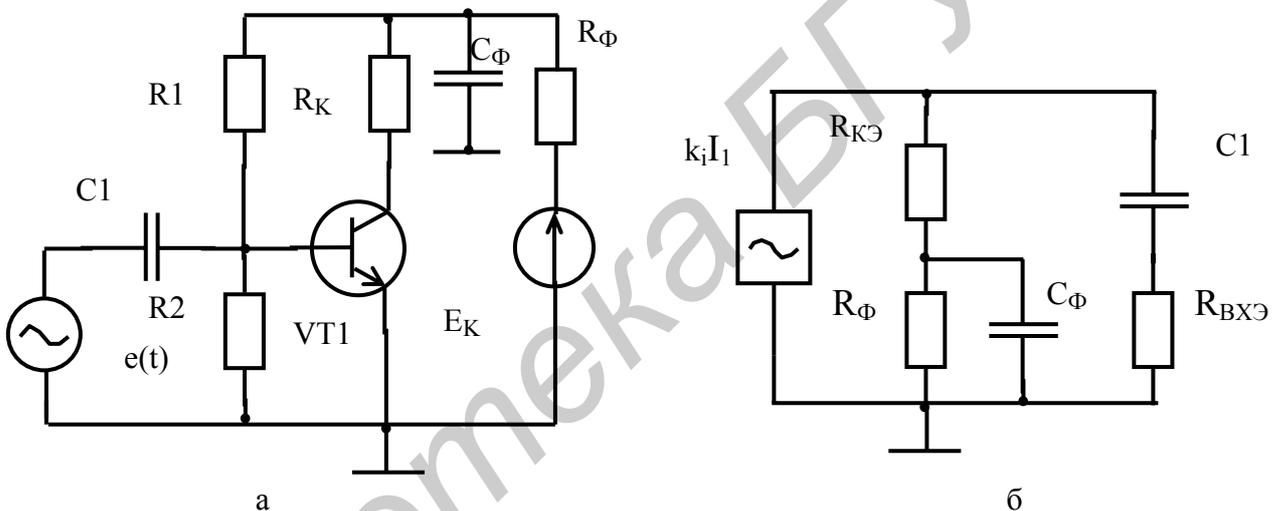


Рис.1.17. Принципиальная (а) и эквивалентная по переменному току (б) схемы усилительного каскада с коррекцией в области низких частот

1.3.5. АЧХ резонансного (избирательного) усилителя

Применение избирательных усилителей, например с контуром в цепи коллектора транзистора, позволяет помимо усиления сигнала повысить отношение сигнал/шум в тракте радиоприемного устройства, в результате чего повышается чувствительность приемника.

Колебательный контур в схеме избирательного транзисторного усилителя в значительной мере шунтируется выходным сопротивлением $R_{ВЫХ}$ транзистора и входным сопротивлением $R_{ВХЭ}$ цепи, подключаемой к выходу усилительного каскада. Их результирующая величина равна

$$R_{||}=R_{ВЫХ}R_{ВХЭ}/R_{ВЫХ}+R_{ВХЭ}.$$

Ввиду этого резонансное сопротивление контура, используемого в качестве коллекторной нагрузки усилителя, может быть только меньше $R_{||}$ или рав-

но ему (при очень малой величине резонансного сопротивления контура). Поэтому необходимо принимать меры для снижения влияния шунтирующего действия этих сопротивлений на избирательные характеристики резонансного усилителя. Одним из важнейших методов решения такой задачи является использование неполного включения контура.

АЧХ резонансного усилителя определяется параметрами используемого в его схеме колебательного контура. Характерной особенностью такого усилителя является использование неполного включения контура, внешней отличительной чертой которого является наличие хотя бы в одной из ветвей L или C элементов обоих знаков реактивности. Принципиальная электрическая и эквивалентная по переменному току схемы резонансного усилителя с неполным включением контура, у которого контурная катушка L состоит из трех частей: $L=L_1+L_2+L_3$, показаны на рис. 1.18 и 1.19 соответственно. Все катушки находятся на одном сердечнике и имеют соответственно число витков n_1, n_2, n_3 . Из рис.1.19 видно, что когда усилитель создает на контуре напряжение U_K , то выходное напряжение

$$U_{ВЫХ} = \frac{n_1}{n_1 + n_2 + n_3} U_K.$$

Например, если катушка L содержит $n_1+n_2+n_3=100$ витков, а выходное напряжение снимается с катушки L1, имеющей 10 витков, то легко понять, что $U_{ВЫХ}=0,1U_K$, т.е., используя неполное включение контура, мы снижаем полученное усиление в 10 раз. Однако при этом шунтируется только десятая часть витков катушки, а не вся катушка целиком. В результате этого сохраняется

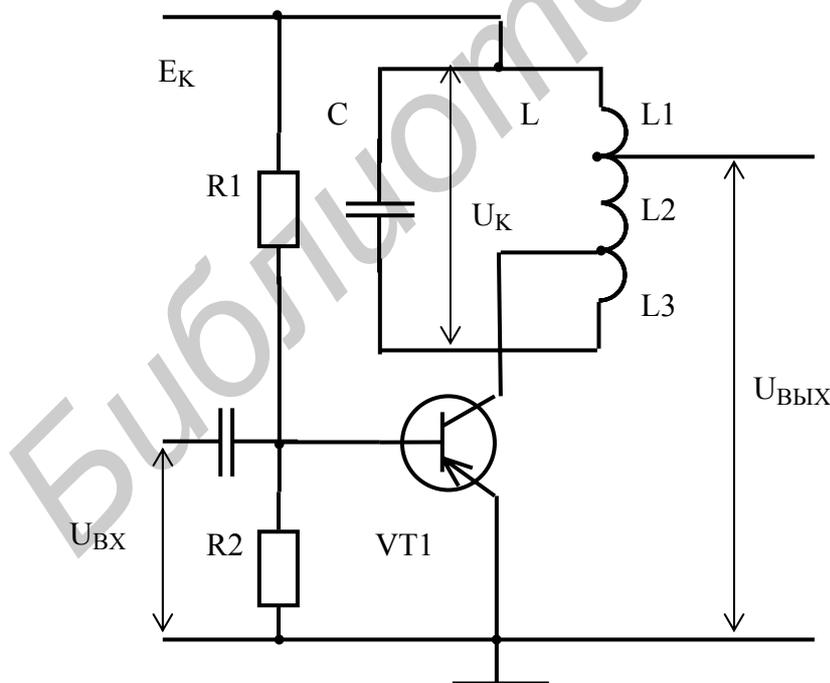


Рис. 1.18. Принципиальная электрическая схема резонансного усилителя

почти полностью ее достаточно высокая добротность, позволяющая сохранить высокие избирательные качества усилителя. А потеря усиления легко может быть компенсирована добавлением еще одной ступени усиления, но зато мы сохраним высокие избирательные качества усилителя. Таким образом, избирательность усилительного каскада можно сохранить ценой уменьшения коэффициента усиления.

Обратим внимание на аналогичные явления, относящиеся к подключению коллектора транзистора.

Поскольку выходное сопротивление транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, значительно выше его входного сопротивления, то точка подключения коллектора должна находиться выше точки подключения контура к выходным зажимам усилителя.

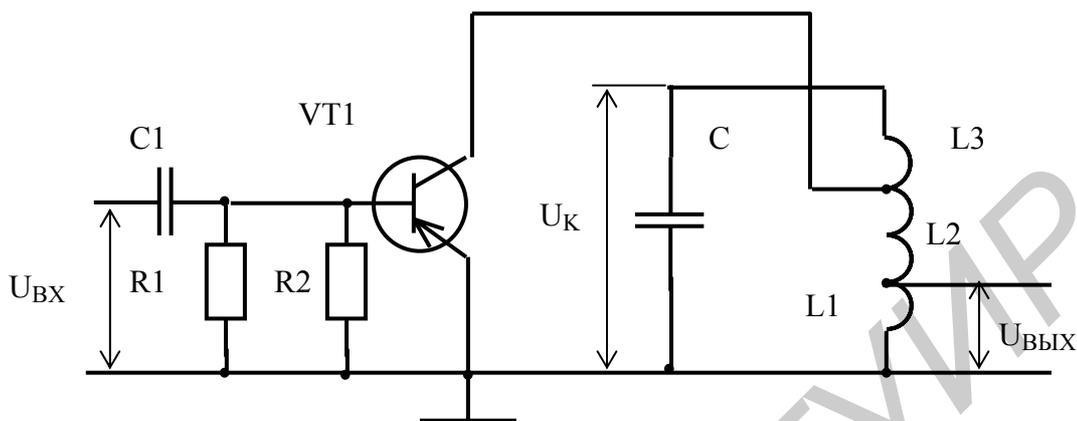


Рис. 1.19. Эквивалентная схема по переменному току резонансного усилителя

1.4. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В УСИЛИТЕЛЯХ

Обратная связь в усилителе представляет собой передачу на его вход усиленных колебаний с выхода усилителя (либо отдельного его каскада, если усилитель является многокаскадным). Эта передача определяется:

- 1) физическими свойствами и конструктивными особенностями усилительных нелинейных элементов. Такая обратная связь называется *внутренней*;
- 2) внешними цепями, обеспечивающими передачу выходного напряжения усилителя на его вход и реализующими замысел конструктора по приданию усилителю нужных свойств. Такая обратная связь называется *внешней*;
- 3) неудачным расположением и монтажом усилительных каскадов, когда паразитные емкостные и индуктивные связи создают путь для передачи колебаний с выхода на вход. Такая обратная связь, возникающая вопреки желанию конструктора, называется *паразитной*.

Если напряжение, поступающее из цепи обратной связи, совпадает по фазе с входным сигналом, то напряжение на выходе усилителя возрастает. В этом случае обратная связь называется *положительной*. Если же напряжение, поступающее из цепи обратной связи на вход усилителя, оказывается в противофазе со входным сигналом, то напряжение на выходе уменьшается и обратная связь называется *отрицательной*.

В результате применения обратной отрицательной связи происходит значительное уменьшение нелинейных, частотных и фазовых искажений, возникающих в усилителе. Заметно повышается стабильность коэффициента усиления и расширяется полоса его рабочих частот. Кроме того, использование обратной отрицательной связи способствует увеличению входного сопротивления

и снижению выходного сопротивления каскада, а также ослабляет зависимость параметров усилителя от смены транзисторов, старения элементов схемы и изменения питающих напряжений.

1.4.1. Структурные схемы усилителей с обратной связью

Так как усилитель с коэффициентом передачи $K(i\omega)$ и цепь обратной связи с коэффициентом передачи $\beta(i\omega)$ можно представить в виде четырехполюсников, то возможные структурные схемы усилителя с обратной связью будут определяться возможными способами соединения этих четырехполюсников. Возможны четыре способа соединения входных и выходных зажимов четырехполюсников (рис.1.20).

На схеме рис.1.20,а входные зажимы усилителя и выходные зажимы цепи обратной связи соединены параллельно. Также параллельно соединены выход усилителя и вход цепи обратной связи. При таком включении величина тока обратной связи I_{OC} зависит от выходного напряжения U_2 и при $Z_H = 0$ падает до нуля. Такая обратная связь называется *параллельной по напряжению*.

В схеме рис.1.20,б выходное напряжение четырехполюсника обратной связи и входное напряжение $e(t)$ включены во входную цепь усилителя последовательно. Выходные зажимы усилителя, входные зажимы цепи обратной связи и нагрузка Z_H включены параллельно. Напряжение обратной связи зависит от выходного напряжения. Такая обратная связь называется *последовательной по напряжению*.

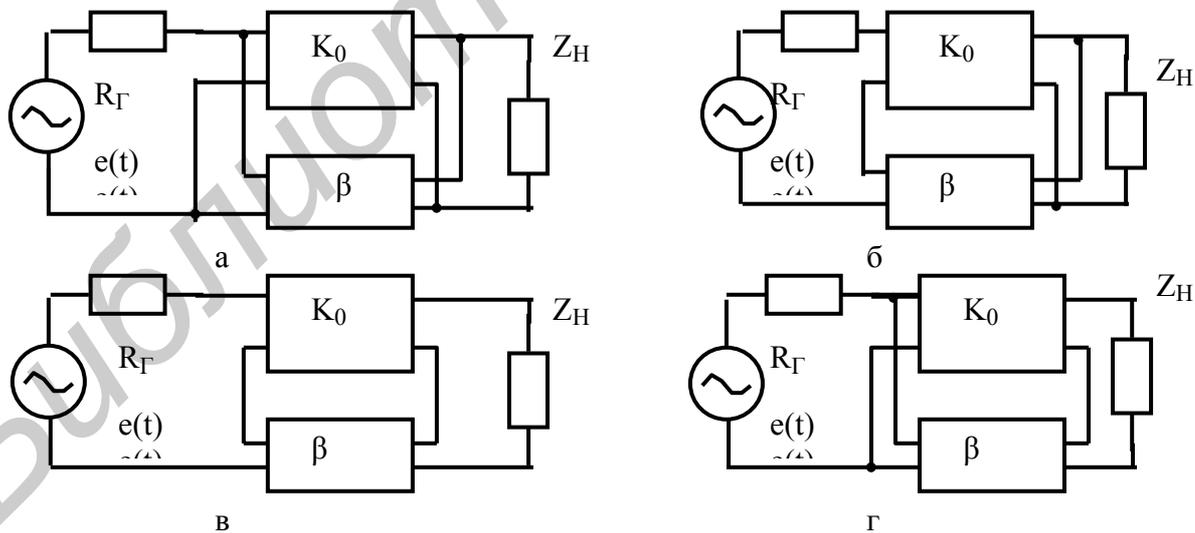


Рис.1.20. Структурные схемы усилителей с параллельной (а), последовательно-параллельной (б), последовательной (в) и параллельно-последовательной цепями (г) обратной связи

В схеме, изображенной на рис.1.20,в, напряжения обратной связи U_{OC} и усиливаемого сигнала $e(t)$ включены последовательно. Выход усилителя, вход цепи обратной связи и нагрузка Z_H также соединены последовательно и по цепи протекает выходной ток I_2 . В этом случае величина U_{OC} зависит от тока I_2 . Как видно из схемы, обратная связь исчезает при $Z_H \rightarrow \infty$, когда $I_2 = 0$. Это *последовательная обратная связь по току*.

На рис.1.20,г приведена схема, где входные зажимы усилителя и входные зажимы цепи обратной связи соединены параллельно, а вход усилителя, вход цепи обратной связи и нагрузка Z_H – последовательно. В этом случае величина I_{OC} определяется выходным током I_2 усилителя, поэтому такая обратная связь называется *параллельной по току*.

На основе простейших видов обратной связи можно создать различные смешанные виды. Внешнюю обратную связь, создаваемую при помощи специальной цепи обратной связи, всегда легко отнести к тому или другому виду. Для внутренней обратной связи, обусловленной собственным механизмом работы активного элемента, такой определенности нет. Обычно ее описывают теми же параметрами, какими описывается активный элемент.

1.4.2. Коэффициент передачи усилителя с обратной связью

На примере усилителя с последовательно-параллельной обратной связью (см. рис.1.20,б) определим коэффициент передачи усилителя с обратной связью. Введем обозначения: K_0 и K_{OC} – коэффициенты передачи усилителя без обратной связи и с обратной связью соответственно; $U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$ – напряжения на входе и выходе усилителя; β – комплексный коэффициент передачи цепи обратной связи.

Напряжение, непосредственно приложенное к усилителю,

$$U_C = U_{ВХ} + \beta U_{ВЫХ}. \quad (1.34)$$

Напряжение на выходе усилителя

$$U_{ВЫХ} = K_0 U_C. \quad (1.35)$$

Подставляя (1.35) в (1.34), имеем

$$U_{ВЫХ} = K_0 (U_{ВХ} + \beta U_{ВЫХ}), \quad (1.36)$$

откуда

$$K_{OC} = \frac{K_0}{1 - \beta K_0}. \quad (1.37)$$

Допустим, что усилительный каскад обеспечивает набег фазы выходного сигнала, кратный целому числу π , а цепь обратной связи не вносит дополнительных фазовых сдвигов. Тогда произведение βK_0 может быть либо отрицательным, либо положительным числом. Как следует из (1.37), при $\beta K_0 = |\beta K_0|$ коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$K_{OC} = \frac{K_0}{1 - |\beta K_0|} \quad (1.38)$$

возрастет, т.е. имеет место положительная обратная связь. Если $\beta K_0 = -|\beta K_0|$, то коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$K_{OC} = \frac{K_0}{1 + |\beta K_0|} \quad (1.39)$$

уменьшится в $1 + |\beta K_0|$ раз, т.е. имеет место отрицательная обратная связь.

В общем случае коэффициент усиления K_0 и коэффициент передачи цепи обратной связи β представляют собой некоторые комплексные величины. В результате модуль и фаза коэффициента усиления K_{OC} определяются величинами K_0 и β , сложным образом зависящими от частоты. Но в любом случае можно найти аналитические выражения для частотной зависимости модуля K_{OC} и его фазового угла $\varphi(\omega)$.

1.4.3. Влияние обратной отрицательной связи на параметры усилителя

При наличии обратной отрицательной связи происходит ослабление как основного (входного) сигнала, так и всех других составляющих, поступивших из выходной цепи.

Ослабление выходного сигнала можно компенсировать увеличением входного напряжения, которое может быть осуществлено в одном из предварительных каскадов (маломощных) без искажений. Таким образом, можно повысить соотношение между полезным сигналом и вредными напряжениями на выходе усилительного устройства. Это существенное достоинство усилителя с обратной связью. Кроме того, обратная связь (отрицательная) обеспечивает высокую стабильность коэффициента усиления устройства при весьма больших колебаниях величин питающих напряжений, нагрузочных сопротивлений и т.п.

1.4.4. Эмиттерный повторитель как схема с обратной отрицательной связью

В отличие от рассмотренного выше каскада, в котором триод включен по схеме с общим эмиттером, каскад с транзистором, включенным по схеме с общим коллектором (рис.1.21), не меняет полярности передаваемого сигнала. По этой причине он называется *эмиттерным повторителем*. Из схемы, приведенной на рис.1.21, видно, что

$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ} - U_{БЭ} < U_{ВХ},$$

т.е. коэффициент усиления каскада по напряжению меньше единицы. Другими словами, в каскаде осуществляется 100%-я отрицательная обратная связь по напряжению. В этом легко убедиться, если воспользоваться правилами определения вида обратной связи, описанными в предыдущих подразделах. Усиление сигнала в этой схеме осуществляется по току. Так как ток эмиттера $I_{Э}$, равный выходному току,

$$I_{Э} = I_{ВЫХ} = I_{Б} + I_{К} = I_{Б}(\beta + 1),$$

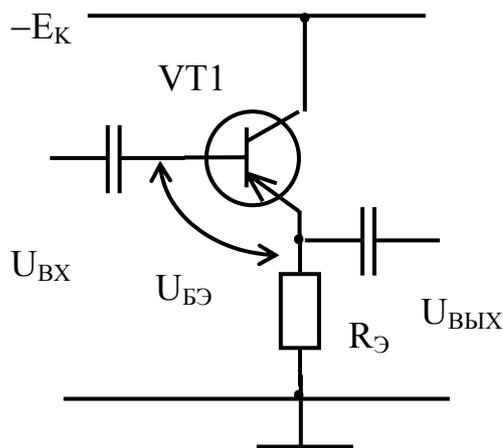


Рис.1.21. Схема эмиттерного повторителя

намного превышает величину входного тока $I_{ВХ}$, то отношение $I_{Э}/I_{ВХ} = \beta + 1$ получается большим. Здесь β – коэффициент усиления транзистора по току.

Из (1.39) видно, что при 100%–й обратной связи $\beta \approx 1$ и, следовательно, произведение $|\beta K_0| \gg 1$ (глубокая связь), т.е. коэффициент усиления усилителя с обратной связью $K_{OC} \approx 1/\beta$. Отсюда следует, что при глубокой отрицательной обратной связи усиление определяется в основном цепью обратной связи. Так как последняя обычно не содержит активных элементов, то усиление получается стабильным. Отсюда также следует,

что обратная отрицательная связь позволяет улучшать равномерность частотной характеристики усилителя.

Отметим также, что схема с общим коллектором обладает очень большим входным сопротивлением и очень малым выходным сопротивлением. Действительно, входное сопротивление транзистора

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}} = \frac{I_B r_B + I_{Э}(r_{Э} + R_{Э})}{I_B} = r_B + (r_{Э} + R_{Э})(\beta + 1).$$

Обычно $R_{Э} \gg r_{Э}$ и $R_{Э}(\beta + 1) \gg r_B$. Поэтому можно считать $R_{ВХ} \approx R_{Э}(\beta + 1)$.

1.4.5. Фазоинверсный каскад с разделенной нагрузкой

Схемы фазоинверсных каскадов с разделенной нагрузкой используются тогда, когда нужно получить сигналы, одинаковые по амплитуде, но сдвинутые относительно друг друга на 180° . Одна из таких схем изображена на рис.1.22. Эту схему по первому выходу можно рассматривать как усилитель с общим эмиттером с последовательной отрицательной обратной связью по току, а по второму выходу – как эмиттерный повторитель. Следовательно, фазоинверсный каскад с разделенной нагрузкой не усиливает сигнал по напряжению, что является недостатком этой схемы. Другой ее недостаток – различие в значениях выходных сопротивлений $R_{ВЫХ1} > R_{ВЫХ2}$, что затрудняет получение полной симметрии схемы.

1.4.6. Устойчивость усилителей с обратной связью

В реальной схеме усилителя с обратной связью всегда имеются элементы, создающие дополнительные фазовые сдвиги (паразитные емкости, переходные конденсаторы, индуктивности рассеяния и т.д.).

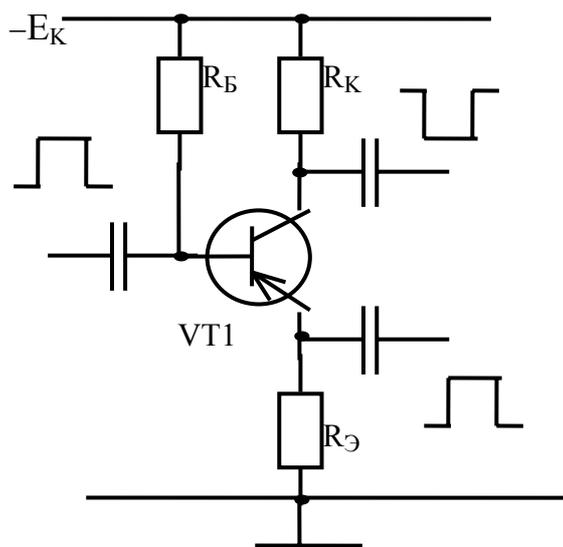


Рис.1.22. Схема каскада с разделенной нагрузкой

Если на какой-либо частоте, лежащей в полосе усиливаемых частот или вне ее, эти сдвиги дают в сумме дополнительный угол в 180° , то обратная связь из отрицательной превращается в положительную и может возникнуть паразитная генерация. Опасность возникновения генерации тем больше, чем больше величина $|\beta K_0|$. Это обстоятельство сильно ограничивает эффективность применения обратной отрицательной связи. Поэтому использование отрицательной обратной связи тесно связано с проблемой устойчивости усилителя.

Для правильного построения схемы усилителя большое значение имеют методы определения устойчивости усилителя.

Наиболее простым и наглядным является амплитудно-фазовый или частотный метод, применение которого к анализу устойчивости усилителя рассмотрим на примере схемы рис.1.20,б.

Разомкнем цепь обратной связи усилителя и составим выражение для коэффициента передачи двух последовательно соединенных четырехполюсников с коэффициентами передачи $K(i\omega)$ и $\beta(i\omega)$:

$$H(i\omega) = K(i\omega) \beta(i\omega) = K(\omega) \beta(\omega) e^{i(\varphi_k + \varphi_\beta)} = H(\omega) e^{i\varphi(\omega)}. \quad (1.40)$$

Если при изменении частоты от 0 до ∞ аргумент φ не достигает величины 2π , то замкнутая система устойчива при любом значении ω . Отсюда следует, что паразитная генерация возможна только на частотах, при которых одновременно выполняются два условия

$$\begin{cases} |H| = |K \beta| > 1, \\ \varphi = \varphi_k + \varphi_\beta = 2\pi. \end{cases} \quad (1.41)$$

Вычисление амплитудной $H(\omega)$ и фазовой $\varphi(\omega)$ характеристик для усилителя с обратной связью обычно не представляет большой сложности. Построив графики $H(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ в функции частоты, можно получить наглядное представление об устойчивости системы. Примеры графиков для устойчивого и неустойчивого усилителя приведены на рис.1.23.

Из рис.1.23,а следует, что в полосе рабочих частот усилителя условия (1.41) не выполняются одновременно. Это значит, что в полосе рабочих частот этот усилитель не будет возбуждаться и сохранит стабильность своей работы.

Из рис.1.23,б видно, что в том случае, когда модуль коэффициента передачи превышает единицу, набег фазы по кольцу обратной связи составляет величину 2π , т.е. выполнены условия для самовозбуждения усилителя.

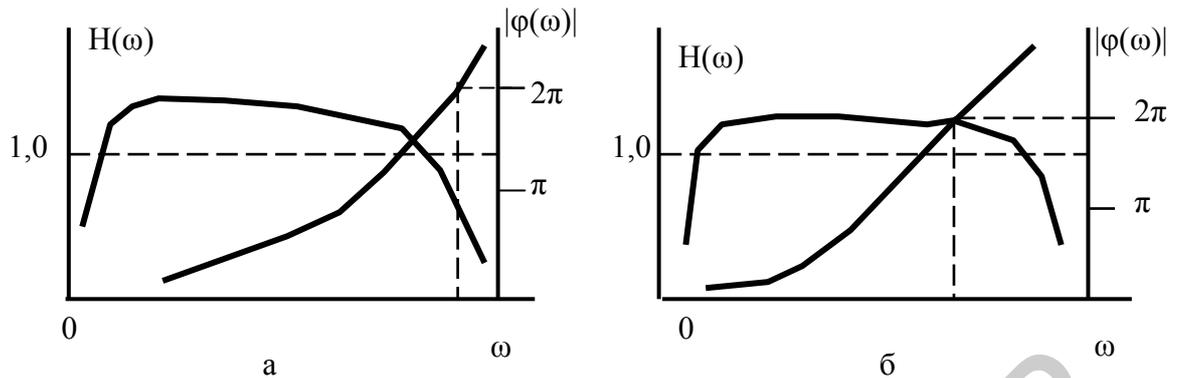


Рис.1.23. Графики $H(\omega)$ и $|\varphi(\omega)|$ для устойчивого (а) и неустойчивого (б) усилителей.

1.4.7. Влияние цепи обратной связи через источник питания на устойчивость усилителя

Наличие цепей обратной связи, особенно в многокаскадных усилителях, является основной причиной самовозбуждения усилителей как высокой, так и низкой частоты.

Наибольшее влияние на работу транзисторного усилителя оказывает обратная связь через общий источник коллекторного питания. Рассмотрим трехкаскадный усилитель (рис.1.24).

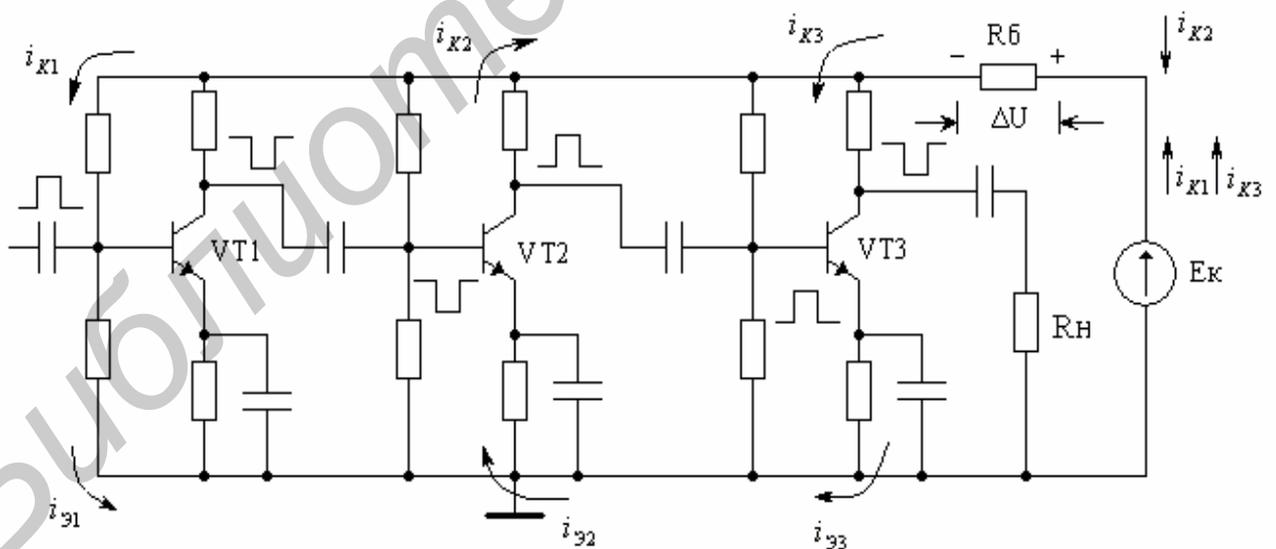


Рис.1.24. Усилитель с обратной связью через источник питания

Допустим, напряжение на входе усилителя изменилось на $+\Delta U$. Поскольку транзистор поворачивает фазу напряжения на 180° , можно показать фазы напряжений на электродах других транзисторов, а также направления коллекторных токов i_{k1} , i_{k2} , i_{k3} . Как видно из рис.1.24, через внутреннее сопротивление ис-

точника R_6 протекают токи всех трех транзисторов, причем токи i_{k1} и i_{k3} имеют одно направление, а ток i_{k2} – противоположное. Принимая во внимание усиление каскадов, следует отметить, что $i_{k1} + i_{k3} > i_{k2}$. При этом мгновенное напряжение ΔU на сопротивлении R_6 принимает знак, соответствующий напряжению, создаваемому суммарным током. Напряжение на сопротивлении R_6 имеет полярность, одинаковую с напряжением ΔU на сопротивлении коллекторной нагрузки транзистора VT1, и поэтому будет с ним суммироваться. Следовательно, напряжение на базе транзистора VT2 возрастает, а в усилителе возникает положительная обратная связь, которая может вызвать самовозбуждение схемы.

Для предотвращения самовозбуждения через общий источник питания используются так называемые развязывающие фильтры Г-образного типа, состоящие из сопротивлений R_ϕ и емкостей C_ϕ . Такие фильтры включают в коллекторные цепи многокаскадных усилителей в соответствии со схемой, приведенной на рис.1.25.

Сопротивления R_ϕ имеют величину порядка одного килоома, а значение емкости C_ϕ от десятых до сотых долей микрофарды.

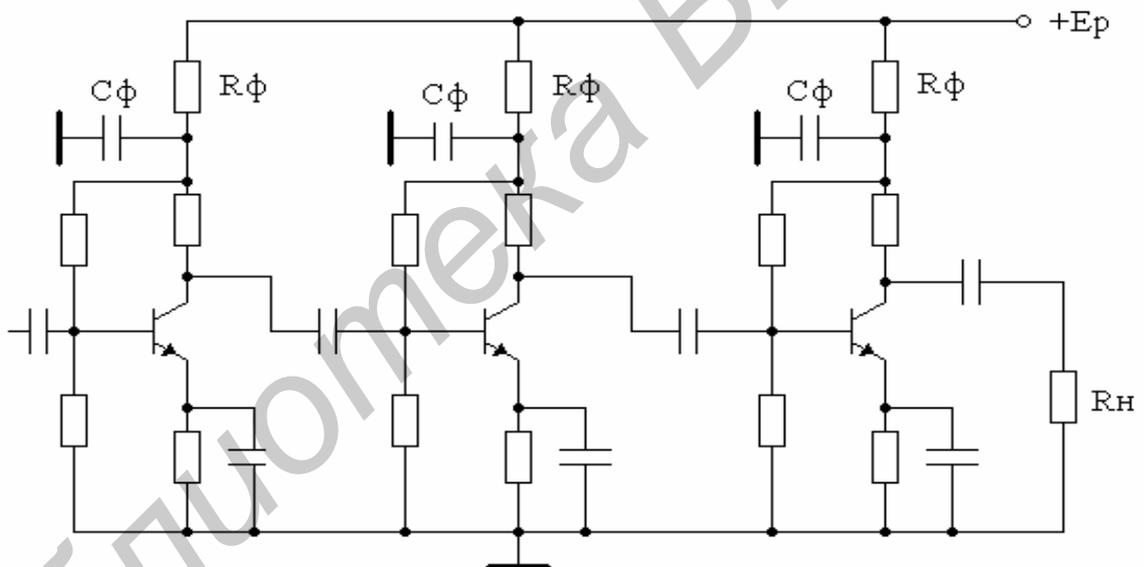


Рис.1.25. Устранение влияния цепи обратной связи на устойчивость усилителя

1.5. АНАЛИЗ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ ПРИ БОЛЬШИХ УРОВНЯХ ВХОДНОГО СИГНАЛА (НЕЛИНЕЙНОЕ УСИЛЕНИЕ)

Выше был проведен анализ работы усилителя в малосигнальном приближении, т.е. считалось, что рабочая точка хотя и смещается по вольт-амперной характеристике, но не настолько, чтобы сказывалась нелинейность этих характеристик и появлялись новые частоты в спектре выходного сигнала. Рассмотрим теперь работу усилителя при таких уровнях входного сигнала, когда нелинейный элемент работает с отсечкой протекающего по нему тока.

1.5.1. Усилитель при большом уровне входного сигнала

Заменим (аппроксимируем) вольт-амперную характеристику ломаной прямой и будем считать, что на вход усилителя подается постоянное напряжение (смещение) U_0 и гармоническое колебание (рис.1.26)

$$U_{BX} = U_0 + U_m \cos \omega t. \quad (1.42)$$

Уравнение ломаной прямой, аппроксимирующей вольт-амперную характеристику активного элемента усилителя, запишем в виде совокупности уравнений

$$i = \begin{cases} 0 & \text{при } u \leq U_H, \\ Su + I & \text{при } u > U_H, \end{cases} \quad (1.43)$$

где U_H – напряжение запирающего активного элемента; S – крутизна вольт-амперной характеристики; I – ордината точки пересечения аппроксимирующей прямой с осью ординат.

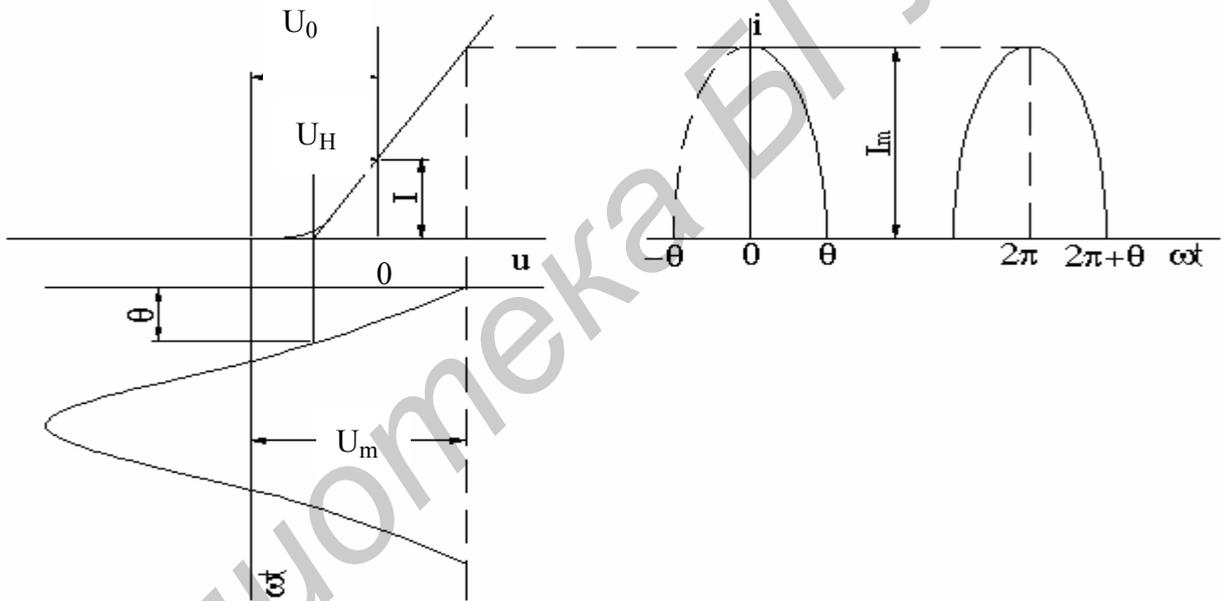


Рис.1.26. Усиление при большом уровне входного сигнала

Форму тока, протекающего через активный элемент усилителя, можно построить графически, как это сделано на рис.1.26, но можно описать и аналитически, подставив (1.42) в (1.43), а именно:

$$i = \begin{cases} 0 & \text{при } u \leq U_H, \\ S(U_0 + U_m \cos \omega t) + I & \text{при } u > U_H. \end{cases} \quad (1.44)$$

Из (1.44) определим фазу входного гармонического колебания, при которой прекращается ток через активный элемент (так называемый угол отсечки θ). Для этого в (1.44) положим $\omega t = \theta$ для $i = 0$. Имеем:

$$0 = S(U_0 + U_m \cos \theta) + I, \quad (1.45)$$

откуда

$$\cos \theta = -\frac{SU_0 + I}{SU_m}. \quad (1.46)$$

С учетом (1.42, 1.46) соотношение (1.44) можно записать в таком виде:

$$i = \begin{cases} 0 & \text{при } \theta \leq \omega t \leq 2\pi - \theta, \\ SU_m (\cos \omega t - \cos \theta) & \text{при } 0 < \omega t < \theta, 2\pi - \theta < \omega t < 2\pi. \end{cases} \quad (1.47)$$

Из (1.47) легко установить максимальное значение тока, протекающего через активный элемент

$$I_m = SU_m (1 - \cos \theta). \quad (1.48)$$

Найдем спектр выходного сигнала, которым является ток, определяемый выражением (1.47). Так как входное воздействие описывается четной функцией, то спектр выходного сигнала можно записать в виде ряда Фурье

$$i(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{n=\infty} a_n \cos n\omega t, \quad (1.49)$$

где

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i(t) d\omega t, \quad a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i(t) \cos n\omega t d\omega t. \quad (1.50)$$

Так как подынтегральное выражение отлично от нуля только при $-\theta \leq \omega t \leq \theta$, то интегрирование будем проводить от $-\theta$ до $+\theta$. Для постоянной составляющей имеем

$$I_0 = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} SU_m (\cos \omega t - \cos \theta) d\omega t = \frac{SU_m}{\pi} (\theta - \theta \cos \theta). \quad (1.51)$$

Величину первой гармоники выходного тока оценим по выражению

$$I_{1m} = a_1 = \frac{1}{\pi} \int_{-\theta}^{\theta} SU_m (\cos \omega t - \cos \theta) d\omega t = \frac{SU_m}{\pi} (\theta - \sin \theta \cos \theta). \quad (1.52)$$

Вообще для n -й гармоники выходного тока ($n > 1$) можем получить

$$I_{nm} = a_n = \frac{2SU_m \sin n\theta \cos \theta - n \cos n\theta \sin \theta}{\pi n(n^2 - 1)}. \quad (1.53)$$

Определив из (1.48) величину SU_m , вместо (1.51 – 1.53) получаем:

$$I_0 = \alpha_0 I_m, \quad (1.54)$$

$$I_{1m} = \alpha_1 I_m, \quad (1.55)$$

$$\dots \dots \dots I_{nm} = \alpha_n I_m, \quad (1.56)$$

где

$$\alpha_0 = \frac{1}{\pi} \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{1 - \cos \theta}, \quad (1.57)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{\pi} \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{1 - \cos \theta}, \quad (1.58)$$

.....

$$\alpha_{n,n>1} = \frac{1}{\pi} \frac{\sin n\theta \cos \theta - n \cos n\theta \sin \theta}{n(n^2 - 1)(1 - \cos \theta)}. \quad (1.59)$$

Коэффициенты $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$ представляют собой функции одного переменного и называются функциями А.И.Берга. Эти функции табулированы. Графики функций $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ приведены на рис.1.27.

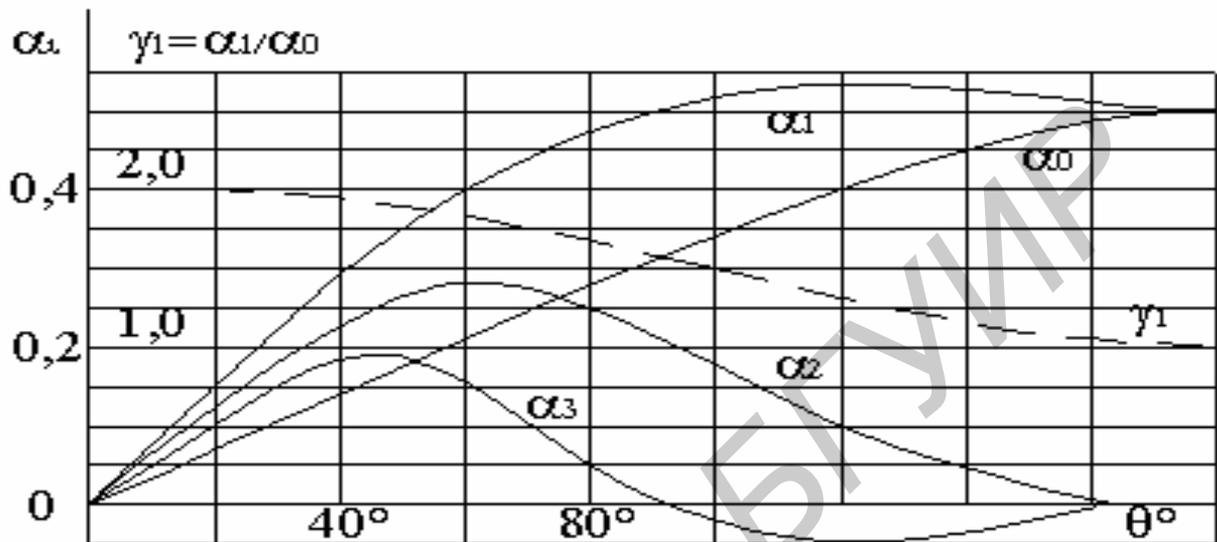


Рис.1.27. Графики функций А.И.Берга

1.5.2. Методика расчета спектра выходного тока нелинейного усилителя

Исходя из вышеизложенного, расчет спектра выходного тока усилителя, работающего с отсечкой, можно проводить в такой последовательности:

- по заданной вольт-амперной характеристике и параметрам входного сигнала по (1.46) вычислим угол отсечки;
- по формуле (1.48) оценим величину I_m и значения коэффициентов А.И.Берга;
- по формулам (1.54 – 1.56) находим амплитуды спектральных составляющих.

Пример 1.1. Кусочно-линейная аппроксимация проходной характеристики транзистора определяется параметрами: крутизна линейной части $S = 10 \text{ mA/V}$, напряжение, соответствующее точке излома, $U_H = 0,5 \text{ В}$. К этому транзистору приложено напряжение $u = 0,5 + 2 \cos \omega t, \text{ В}$. Оценить спектральный состав тока, протекающего через транзистор.

В соответствии с методикой расчета выходного тока нелинейного усилителя вычислим сначала величину угла отсечки. По формуле (1.46) имеем

$$\cos \theta = - \frac{SU_0 + I}{SU_m} = - \frac{10 \cdot 0,5 + (-5)}{10 \cdot 2} = 0,$$

откуда $\theta = 90^\circ$.

По формуле (1.48) найдем величину $I_m = 20 \text{ мА}$.

По формулам (1.57–1.59) или по графикам, приведенным на рис.1.27, получаем $\alpha_0 = 0,32$, $\alpha_1 = 0,50$, $\alpha_2 = 0,20$, $\alpha_3 = 0$.

По формулам (1.54–1.56) имеем $I_{0m} = 6,4 \text{ мА}$, $I_{1m} = 10 \text{ мА}$, $I_{2m} = 4,0 \text{ мА}$, $I_{3m} = 0$.

1.5.3. КПД нелинейного усилителя

Согласно (1.5) КПД усилителя

$$\eta = \frac{P_H}{P_0} = \frac{\frac{1}{2}U_{1m}I_{1m}}{E_k I_{0m}} = \frac{1}{2}\xi\gamma_1, \quad (1.60)$$

где $\gamma_1 = \frac{I_{1m}}{I_{0m}}$, а $\xi = \frac{U_{1m}}{E_k}$ – отношение амплитуды первой гармоники выходного напряжения к напряжению источника питания, называемое коэффициентом использования активного элемента усилителя по источнику питания.

Величина ξ в лучшем случае может достигать значений, близких к единице, и поэтому будем считать, что $\xi=1$. Тогда КПД будет определяться величиной отношения γ_1 . Учитывая (1.54, 1.55), для γ_1 имеем:

$$\gamma_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_0} = \frac{\theta - \cos\theta \sin\theta}{\sin\theta - \theta \cos\theta}. \quad (1.61)$$

Чтобы построить график этой функции, оценим величину γ_1 для трёх значений угла отсечки, равных 0 , $\pi/2$ и π . Из графика γ_1 (см. рис. 1.27) видно, что γ_1 уменьшается с увеличением угла отсечки. Это значит, что величина КПД нелинейного усилителя тем выше, чем с меньшим углом отсечки он работает. Однако при очень маленьких углах отсечки абсолютная величина выходной мощности получается невысокой. Поэтому в практических схемах угол отсечки устанавливают вблизи $\pi/2$, тогда КПД усилителя является еще достаточно высоким ($\approx 75\%$). Кроме того, важно отметить, что при $\theta \approx \pi/2$ все нечетные гармоники (за исключением первой) в спектре выходного сигнала обращаются в нуль. Таким образом, нелинейный усилитель характеризуется высокими энергетическими показателями при $\theta \approx \pi/2$, и в спектре выходного сигнала отсутствуют высшие нечетные гармоники. Если удастся устранить наличие четных гармоник входного сигнала, то нелинейный усилитель будет работать без искажений и с высоким КПД. Эта задача решается правильным проектированием схемы усилителя, например, применением двухтактных схем.

1.5.4. Двухтактные схемы

Двухтактная схема (рис.1.28) представляет собой усилитель, работающий с углом отсечки $\theta \approx \pi/2$, на входы которого подаются противофазные напряжения. Токи, протекающие в активных элементах, можно представить графиче-

ски. Гармонический анализ токов в двухтактной схеме проведён графически (рис.1.29). Из рис.1.29 следует, что первые гармоники токов i' и i'' , будучи противофазными вследствие двухтактного включения активных элементов усилителя, суммируются в нагрузке, создавая в ней ток удвоенной амплитуды.

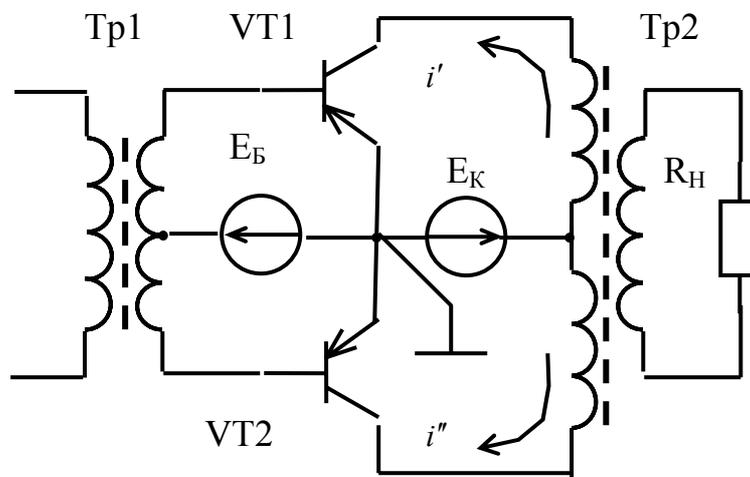


Рис.1.28. Упрощенная схема двухтактного усилителя

Четные гармоники токов i' и i'' синфазны, и так как по отношению к нагрузке токи i' и i'' протекают в противоположных направлениях, то в нагрузке проявятся не будут, компенсируя друг друга. Амплитуды нечетных гармоник порядка выше первого при $\theta \approx \pi/2$ равны нулю. Поэтому при хорошей симметрии схемы правильно спроектированный двухтактный усилитель не вносит значительных искажений и характеризуется высоким КПД.

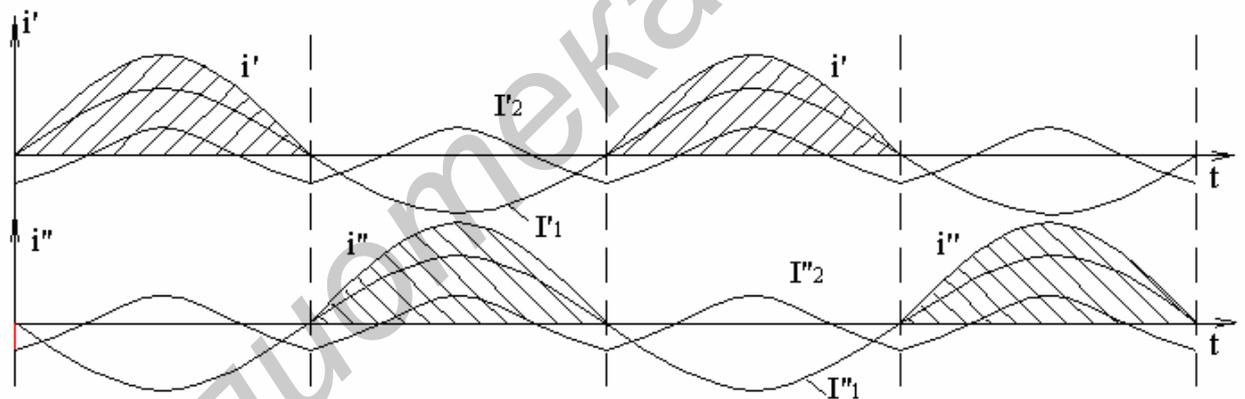


Рис.1.29. Гармонический анализ токов в двухтактной схеме

В цветных телевизорах выходные каскады кадровой развертки выполняются по двухтактной схеме с непосредственным (бестрансформаторным) выходом.

Пример упрощенной схемы такого каскада показан на рис.1.30. пилообразно-импульсное напряжение через парафазный усилитель, собранный на транзисторе VT1, подается в противофазных полярностях на базы транзисторов VT2 и VT3. Когда открыт транзистор VT2, его током заряжается конденсатор C_p .

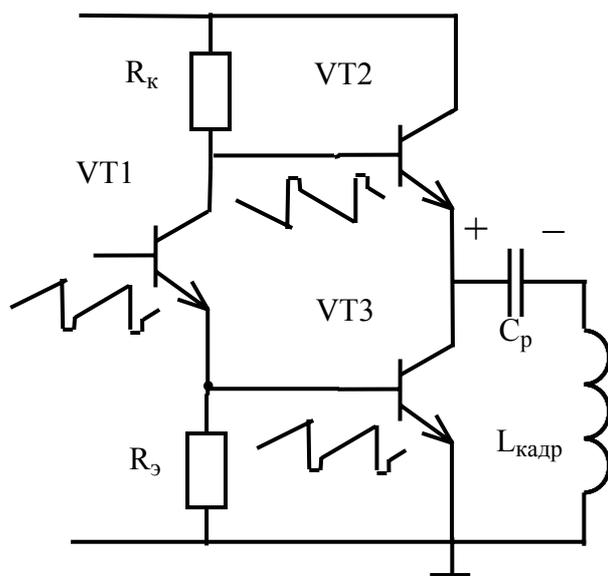


Рис.1.30. Упрощенная схема выходного каскада кадровой развертки телевизора

Транзистор VT3 при этом закрыт. Когда транзистор VT2 закрывается и начинает работать транзистор VT3, источником напряжения питания для него служит заряженный конденсатор C_p . Протекающий в отклоняющих катушках ток $I_K = I_1 + I_2$, где I_1, I_2 – токи поочередно работающих транзисторов VT1 и VT2.

Заметим, что выходные каскады кадровой развертки, кроме выполнения своей основной функции, обеспечивают электрическую центровку раstra по вертикали путем изменения постоянной составляющей отклоняющего тока, получение напряжения питания ускоряющего электрода кинескопа, управление работой ряда узлов телевизора.

Двухтактные схемы используются также в выходных каскадах модуляторов, где энергетические показатели являются существенными.

1.5.5. Умножение частоты

Наличие в составе импульсного коллекторного тока гармоник с частотами, кратными основной частоте возбуждения, позволяет использовать усилитель, работающий с отсечкой коллекторного тока, в качестве умножителя частоты. Для этого не требуется производить каких-либо изменений в схеме резонансного усилителя. Достаточно настроить нагрузочный колебательный контур на частоту выделяемой гармоники и установить режим работы нелинейного элемента, наиболее выгодный для подчеркивания полезной гармоники. Из графиков функций А.И.Берга можно установить оптимальные углы отсечки. Например, в случае удвоения частоты выгодно работать с углом отсечки, близким к 60° , при котором коэффициент α_2 проходит через максимум, а в случае утроения следует устанавливать угол отсечки равным 40° . Оптимальный угол отсечки можно рассчитывать по соотношению $\theta_{opt} = 120^\circ / n$, где n – порядок умножения частоты.

Для режима умножения частоты характерна работа с большими базовыми напряжениями. Это обстоятельство наряду со снижением полезной мощности при повышении порядка умножения из-за убывания коэффициентов α_i , заставляет в передатчиках ограничиваться удвоением или утроением частоты в одной ступени.

Умножение частоты широко применяется в ряде измерительных устройств, когда нужно получить сетку частот, кратных какой-либо одной определенной частоте, рассматриваемой в качестве опорной. В подобных системах часто используется транзистор или электронная лампа, работающие с очень малым углом отсечки. Подавая на базу транзистора или сетку лампы достаточно большое переменное напряжение, при большом смещении можно получить ток в виде последовательности остроконечных импульсов. Такой ток богат гармониками, образующими линейчатый спектр.

В передатчиках и гетеродинах приемников часто применяют умножение частоты в целое число раз. Особенно часто это делают при кварцевой стабилизации частоты. Дело в том, что из-за малой механической прочности трудно изготовить кварцевую пластинку для колебаний частотой порядка 10 МГц, в то время как частота задающего генератора со стабилизированной частотой может превышать 300 МГц. Поэтому возникает необходимость умножения частоты.

Умножитель частоты представляет собой резонансный усилитель с контуром, настроенным на гармонику входного сигнала. На практике используют удвоители и значительно реже утроители частоты, так как большие коэффициенты умножения снижают эффективность умножителей частоты по ряду причин. Дело в том, что при большом коэффициенте умножения угол отсечки получается небольшим и его трудно поддерживать постоянным на этом уровне. Величина соответствующей гармоники получается небольшой, вследствие чего снижаются энергетические показатели умножителя.

Кроме того, для автоматического поддержания постоянства амплитуды гармоники, выделяемой умножителем, при изменении режима питания, старении кварцев желательнее работать при углах отсечки, которые больше энергетически оптимальных. Действительно, если амплитуда колебаний на входе умножителя уменьшится, то амплитуда n -й гармоники входного сигнала, определяемая формулой (1.56), изменится незначительно вследствие уменьшения I_m , в то время, как коэффициент α_n увеличится и приблизится к значению $\alpha_{\text{опт}}$.

Пример 1.2. По условию предыдущей задачи найти оптимальное значение смещения, обеспечивающего удвоение частоты входного сигнала.

Из графиков функций А.И.Берга видим, что оптимальным для удвоения частоты является режим усиления с углом отсечки $\theta = 60^\circ$, так как именно при этом угле отсечки вторая гармоника достигает максимального значения. Для расчета необходимой величины смещения составим уравнение

$$\cos \theta = - \frac{SU_0 + I}{SU_m} = \frac{1}{2}.$$

Отсюда получаем $U_0 = -1,5$ В.

Пример 1.3. Во многих УКВ-радиостанциях осуществляется умножение частоты в $2 \times 3 \times 3 = 18$ раз. Постройте эффективную схему умножителя, т.е. решите задачу построения структурной схемы умножителя частоты в 18 раз путем выбора самого благоприятного случая из $2 \times 3 \times 3$, $3 \times 3 \times 2$ и $3 \times 2 \times 3$.

1.5.6. Режимы работы усилителя

В зависимости от положения рабочей точки в режиме покоя на сквозной динамической характеристике транзистора, а также значения усиливаемого напряжения различают три основных режима работы усилительных каскадов, или классов усиления: А, В и С. Основными характеристиками этих режимов являются нелинейные искажения и КПД.

Режим А характеризуется тем, что рабочую точку в режиме покоя выбирают на линейном участке (обычно посередине) сквозной динамической характеристики. Благодаря этому усилитель имеет минимальные нелинейные искажения, однако обладает существенным недостатком – такой усилитель имеет очень низкий КПД.

Режим В характерен для усилителей, работающих с углом отсечки, равным 90° . Такой усилитель имеет более высокий КПД по сравнению с усилителем класса А, так как ток покоя в таком усилителе практически равен нулю, а постоянная составляющая тока при наличии входного напряжения имеет сравнительно небольшое значение. КПД усилителя, работающего в режиме В, может достигать 80%.

Иногда используют режим работы усилительного каскада, промежуточный между режимами А и В. Его называют режимом АВ. Рабочая точка покоя находится в интервале между положениями рабочей точки в режимах А и В. В этом случае КПД усилителя больше, чем в режиме А, а нелинейные искажения меньше, чем в режиме В.

Режим С характеризуется тем, что рабочую точку выбирают за точкой отсечки и ток в транзисторе возникает только в течение небольшой части положительного полупериода входного напряжения. Этот режим сопровождается большими искажениями усиливаемого напряжения, но КПД устройства может быть очень высоким и достигать почти 100%.

1.6. МНОГОКАСКАДНЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Приступая к расчету усилителя, конструктор исходит из данных о необходимом усилении и допустимой величине искажений, которые может приобрести сигнал в устройстве. Выбор числа каскадов и их схем представляет в значительной степени творческую задачу, не имеющую однозначного решения, ибо заданные технические требования на усилители можно выполнить не единственным способом.

Не существует также единого критерия, позволяющего оценить, насколько оптимально предложенное решение. В одних случаях этот критерий может включать требования минимального числа каскадов, в других - наименьшего потребления энергии, в третьих – минимальных искажений и т.д. Однако, какими бы идеями ни руководствовался конструктор, перед ним всегда встает вопрос, как распределить искажения, допускаемые на весь усилитель, между его

отдельными каскадами. От этого зависит выбор как схемы каждого каскада, так и ее элементов.

Ответ на это дает знание законов суммирования искажений в многокаскадных усилителях. Установление таких законов суммирования является одним из основных вопросов теории усилителей, однако до настоящего времени он еще не получил полного разрешения. Поэтому мы рассмотрим только основные сведения по суммированию искажений и рекомендации, которые из них вытекают.

1.6.1. Структурная схема многокаскадного усилителя

Структурная схема многокаскадного усилителя представляет собой последовательное соединение n однокаскадных усилителей. Результирующая частотная характеристика такого усилителя

$$K(i\omega) = \prod_{j=1}^{j=n} K_j(i\omega). \quad (1.62)$$

Для упрощения усилительного устройства, унификации его узлов и удешевления производства обычно стремятся выполнить все его каскады идентичными. Исключение из этого правила делается для выходного каскада. Требования большой амплитуды выходного сигнала или выходной мощности, работы на заданную нагрузку и т.д. – все это существенно отличает окончательный каскад от каскадов предварительного усиления. В выходных каскадах приходится допускать большие частотные искажения. Оценив, при каких допустимых частотных искажениях в выходном каскаде его можно осуществить достаточно экономичным образом, оставшиеся частотные искажения делят между остальными каскадами равномерно.

Ориентировочное число каскадов транзисторного усилителя при предварительном расчете выбирают исходя из того, что коэффициент усиления одного каскада обычно составляет величину 15...20 дБ.

1.6.2. Схемы межкаскадных связей

Связь между отдельными каскадами может быть реостатно-емкостной, трансформаторной или непосредственной (гальванической).

Реостатно-емкостная связь используется главным образом в каскадах предварительного усиления. Анализ такого усилителя (см. рис.1.12) был проведен выше.

Трансформаторная связь чаще всего применяется между предпоследним и окончательным каскадами для связи окончательного каскада с нагрузкой, а также в избирательных УВЧ.

Выходное сопротивление каскадов с общей базой и общим эмиттером, как правило, всегда больше входного сопротивления. Поэтому для согласования выходного сопротивления предыдущего каскада с входным сопротивлением последующего необходимо использовать понижающий трансформатор.

В каскадах УВЧ используют трансформаторные и автотрансформаторные схемы связи контура с цепями транзистора, так как низкое входное сопротивление транзистора оказывает сильное шунтирующее действие на контур предшествующего каскада, вследствие чего резко падает усиление предыдущего каскада и ухудшаются его избирательные свойства.

На рис.1.31 показана схема резонансного УВЧ, связь между каскадами которого осуществляется трансформаторным путем. Отметим, что здесь может использоваться неполное включение контура в коллекторной цепи, если выходное сопротивление транзистора недостаточно велико.

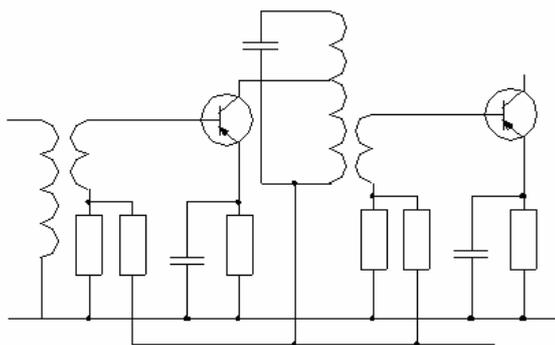


Рис. 1.31. Резонансный усилитель с трансформаторной связью между каскадами.

Гальваническая связь между каскадами используется в УПТ и содержит элементы, проводящие постоянный ток. Простейшие схемы усилителя с гальванической связью изображены на рис.1.32. Левый транзистор схемы рис.1.32,а работает как эмиттерный повторитель, обеспечивая большое входное сопротивление схемы. Усиление напряжения обеспечивается правым транзистором. В схеме рис.1.32,б коллекторные токи обоих транзисторов синфазны, что позволяет

пропустить токи через общую нагрузку и поднять этим усиление напряжения.

Для усилителей на транзисторах, работающих при малых напряжениях на электродах транзистора, наиболее подходящим элементом межкаскадной связи

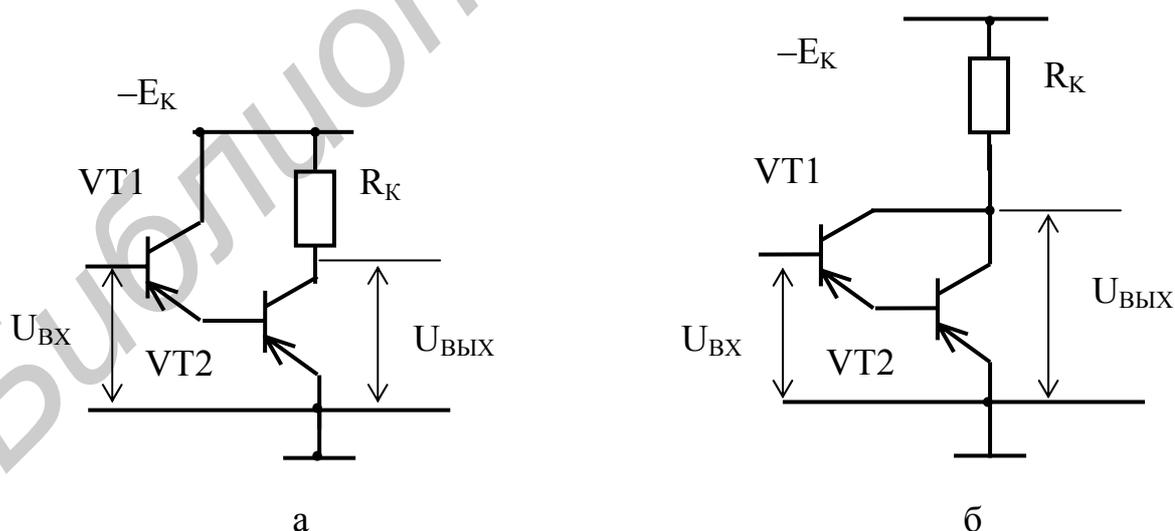


Рис.1.32. Гальваническая связь между каскадами:

а – схема с эмиттерным повторителем; б – схема с составным транзистором

является полупроводниковый стабилитрон (например, КС180 - рис. 1.33). В таких каскадах обычно можно обойтись только одним источником питания, рассчитывая величины резисторов R_1 , R_2 с учетом тока стабилитрона.

Из приведенных схем усилителей постоянного тока видно, что строят их, используя реостатные каскады. Поэтому полоса пропускания и частотные искажения для них рассчитываются так же, как и в обычных реостатных усилителях. Наиболее важным недостатком таких усилителей является существенное влияние на постоянную составляющую усиленного напряжения неизбежных изменений в положении рабочей точки каждого из активных элементов.

В многокаскадных схемах транзисторных усилителей широкое применение находят дифференциальные усилители. На рис.1.34 приведена схема дифференциального УПТ с симметричным входом и симметричным выходом. Усиливаемый сигнал подводится к базам транзисторов, а усиленный – выделяется на резисторе R_n .

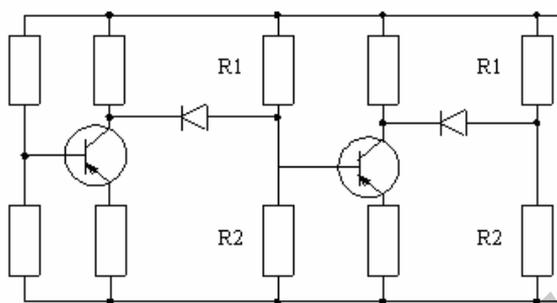


Рис. 1.33. Усилитель с межкаскадной связью на стабилитронах

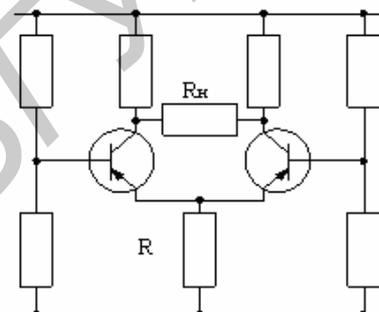


Рис.1.34. Дифференциальный усилитель

Для дифференциальных усилителей характерна высокая стабильность положения рабочей точки активных элементов, повышенное входное сопротивление и малое влияние на параметры усилителя изменения тока эмиттера за счет резистора R в цепи эмиттеров. Примечательно, что резистор R не вызывает отрицательной обратной связи по току, так как с увеличением тока через левый транзистор ток правого транзистора уменьшается и потенциал на эмиттерах триодов остается постоянным. Эти схемы обеспечивают любые варианты симметрии входов и выходов.

1.6.3. Устойчивость работы многокаскадных усилителей

Многокаскадный усилитель содержит большое число различных деталей, объединенных электрической схемой и конструктивным выполнением в некоторое единое устройство. Для компактности устройства его размеры и объем стремятся сделать возможно меньшими. Небольшие расстояния между деталями вызывают появление между ними заметных емкостных и индуктивных связей. В результате часть энергии усиленных колебаний с выходных элементов

схемы передается на детали, находящиеся на электрической схеме в предыдущих каскадах усилителя. При неудачной компоновке отдельных узлов и деталей свойства усилителя могут настолько измениться, что правильно рассчитанный усилитель не будет отвечать поставленным техническим требованиям и даже может самовозбуждаться.

Задачей конструктора является такой выбор решения, при котором все возможные паразитные связи сведены до приемлемого минимума. Строгая количественная оценка паразитных связей затруднена их большим числом, взаимным переплетением, а иногда и невозможностью их точной локализации. Опытным путем выработан ряд мер, правил и рекомендаций, соблюдение которых позволяет надежно бороться с паразитными связями. Однако при самом разумном конструктивном выполнении усилителя сохраняется еще один вид паразитной обратной связи, часто играющей основную роль в изменении свойств усилителя. Этим видом связи является обратная связь, возникающая в усилителе при питании его каскадов от одного общего источника питания. Для ее ослабления широко используют развязывающие фильтры, но это приводит к дополнительному расходу энергии в усилителе и увеличению его габаритов.

1.6.4. Регулировки в усилителях

Усилители электрических сигналов во многих случаях работают в широком динамическом диапазоне входных и выходных сигналов, поэтому они снабжаются регуляторами усиления, позволяющими получить нужную амплитуду выходного сигнала независимо от амплитуды входного сигнала.

Для изменения соотношения амплитуд частотных составляющих на выходе усилителя независимо от соотношения этих амплитуд на его входе усилители снабжаются регуляторами тембра. Регуляторы усиления и тембра могут производить соответствующие изменения плавно или скачками. Ступенчатая регулировка применяется сравнительно редко. Отношение коэффициентов усиления при крайних положениях регуляторов называют глубиной регулировки и выражают в децибелах.

Регуляторы усиления желательно ставить либо во входной цепи, либо в первых предварительных каскадах усилителя, предохраняя усилитель от перегрузок. На рис. 14.5 приведена схема потенциометрического регулятора (резистор R1). Его достоинствами являются постоянство режима транзистора, на который подается регулируемый сигнал, и сравнительно высокая глубина регулировки (30...40 дБ). Недостатком регулятора является наличие большой разделительной емкости, так как в противном случае на низких частотах при сильном ослаблении входного сигнала получаются большие частотные искажения. На высших частотах частотные искажения максимальны также при сильном ослаблении входного сигнала. Это происходит из-за влияния входной емкости транзистора.

Регулирование частотных характеристик усилителей производят цепочкой, сопротивление которой изменяется в зависимости от частоты сигнала. В

транзисторных усилителях из-за низкого входного сопротивления очень трудно регулировать тембр, поэтому регуляторы следует ставить между входом обычного каскада и входом эмиттерного повторителя.

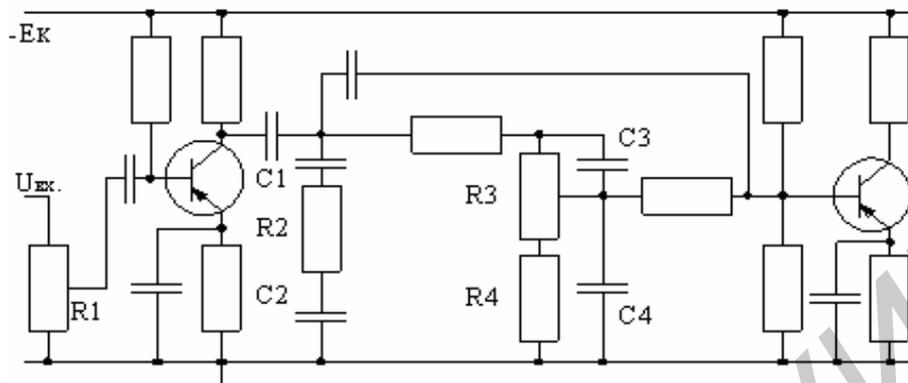


Рис. 1.35. Регулировка усиления и тембра в усилителе низкой частоты

На рис. 1.35 цепь, состоящая из $C1, R2, C2$, служит для регулировки высоких частот, а цепь $R3, R4, C4$ – для регулировки низких частот. Если не нужно регулировать частотную характеристику в широких пределах, то можно применять и более простые схемы регуляторов тембра.

1.6.5. Операционные усилители (ОУ)

Усилители, позволяющие выполнять операции суммирования, интегрирования, дифференцирования и логарифмирования, представляют основу аналоговых вычислительных машин. Используемые обычно для этих целей усилители постоянного тока, помимо малого дрейфа, должны иметь большой коэффициент усиления и допускать охват их глубокой обратной связью без нарушения устойчивости.

ОУ – это усилители постоянного тока с дифференциальным входом, обладающие весьма большим коэффициентом усиления (до 100 дБ), широкой полосой пропускания (от постоянного тока до 100 МГц), высоким (до 100 МОм) входным и низким (десятки ом) выходным сопротивлениями.

Условное обозначение ОУ и назначение его основных выводов показаны на рис.1.36. Вход 1, обозначенный на схеме знаком «0», называют инвертирующим, так как изменения выходного сигнала ОУ противоположны по знаку изменениям сигнала на этом входе. Вход 2 называют неинвертирующим. Изменения выходного сигнала ОУ совпадают по фазе с изменениями сигнала на этом входе.

Для получения выходного напряжения как положительной, так и отрицательной полярности ОУ питают от двух разнополярных источников напряжения. Это дает также возможность получить нулевой уровень выходного напряжения при отсутствии входного сигнала.

На входы ОУ можно подавать сигналы от одного источника с незаземленным выходом или от двух разных источников, имеющих одну общую точку. В любом случае входным напряжением ОУ является разность входных сигналов.

Коэффициент усиления напряжения ОУ определяют как отношение приращения выходного напряжения к вызвавшему это приращение значению входного напряжения. Частота входного сигнала, при которой коэффициент усиления уменьшается на 3 дБ (1,4 раза) по сравнению с его значением на низших частотах, определяет верхнюю границу полосы пропускания усилителя.

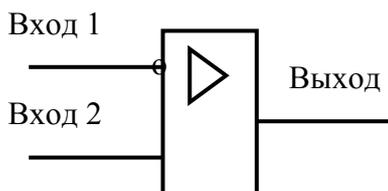


Рис. 1.36. Условное обозначение операционного усилителя

Напряжение на входе ОУ может быть сравнительно небольшим (единицы мВ) в то время, как напряжение на каждом из входов (по отношению к общему проводу) может достигать нескольких вольт.

Если амплитуда и фаза напряжений на входах ОУ (также по отношению к общему проводу) совпадают, их называют синфазными входными напряжениями. Значение синфазного входного напряжения принимается равным полусумме напряжений на входах ОУ.

Отношение приращения входного напряжения к приращению активной составляющей входного тока на заданной частоте сигнала называют входным сопротивлением. Это сопротивление следует отличать от входного сопротивления ОУ для синфазных входных напряжений, которое определяется как отношение приращения синфазных входных напряжений к приращению активной составляющей среднего входного тока на заданной частоте сигнала.

Идеальный ОУ обрабатывает изменения только дифференциального входного сигнала и не реагирует на изменения синфазного напряжения. В реальных же ОУ изменение синфазного входного напряжения вызывает изменение (правда, весьма незначительное) выходного напряжения. Способность ОУ отличать дифференциальный входной сигнал от изменений синфазного напряжения является одной из его важнейших характеристик. Количественно эта способность называется коэффициентом ослабления синфазных входных напряжений, равным отношению коэффициента усиления ОУ к его коэффициенту усиления синфазных входных напряжений.

Важнейшим выходным параметром ОУ является максимальное выходное напряжение – наибольшее неискаженное напряжение при определенном входном напряжении и заданном сопротивлении нагрузки. Для некоторых типов ОУ это напряжение может быть различным для положительной и отрицательной полярности сигнала.

Принципиальная схема одного из простейших интегральных ОУ К140УД1 приведена на рис.1.37.

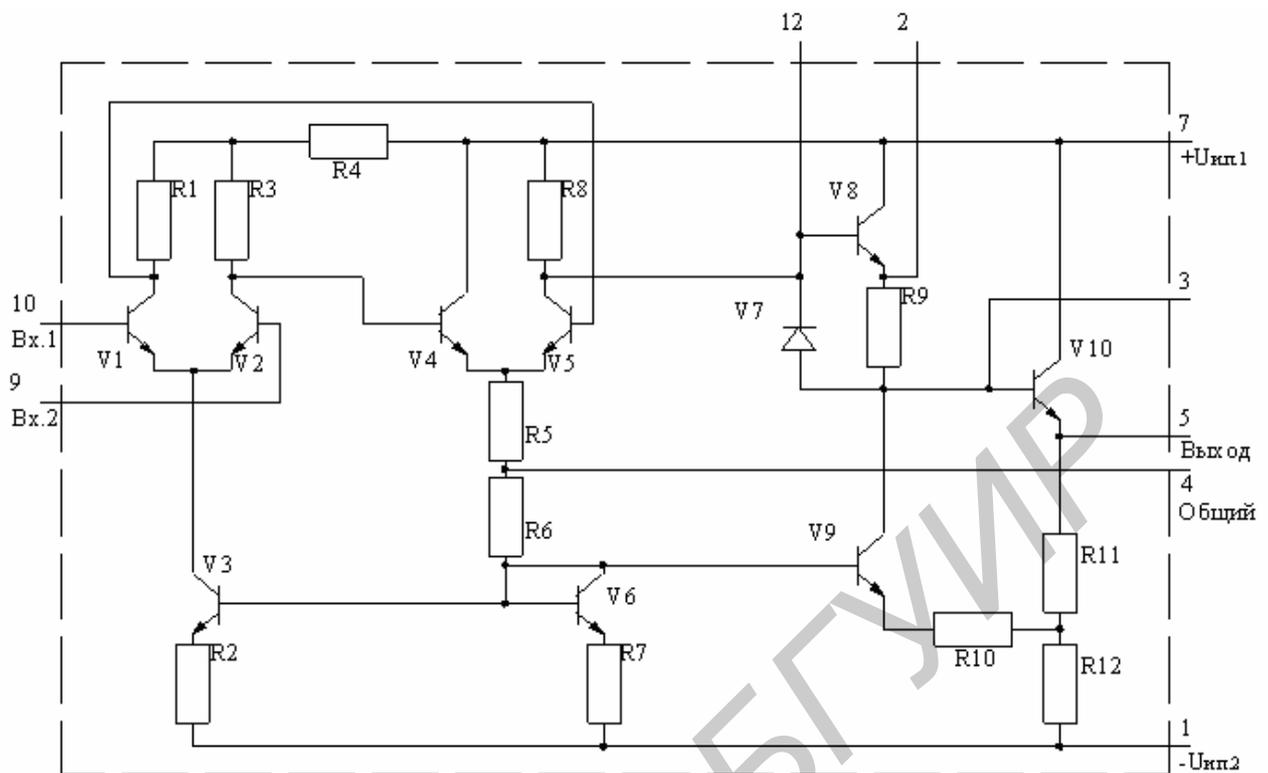


Рис. 1.37. Принципиальная схема операционного усилителя К140УД1

Первый дифференциальный каскад выполнен на транзисторах V1, V2. Эмиттерные токи этих транзисторов стабилизированы генератором тока на транзисторах V3, V6, причем последний (его коллекторный переход замкнут накоротко) использован в качестве термостабилизирующего диода.

Усиленный полный дифференциальный сигнал, выделяющийся на коллекторах транзисторов V1, V2, поступает на вход второго дифференциального каскада, выполненного на транзисторах. Переход от дифференциального выхода первого каскада к одиночному выходу второго осуществляется за счет включения транзистора V4 по схеме эмиттерного повторителя. При этом выходной сигнал, снимаемый с коллектора транзистора V1, изменяет (например, увеличивает) потенциал базы транзистора V5, а сигнал с коллектора транзистора V2 (через эмиттерный переход транзистора V4) уменьшает потенциал эмиттера транзистора. Иными словами, к эмиттерному переходу этого транзистора приложен практически полный выходной сигнал первого каскада.

С коллектора транзистора V5 усиленный сигнал поступает на вход следующего каскада, выполненного на транзисторе V8. Через резисторы R5 и R6 осуществляется обратная отрицательная связь по синфазному сигналу с эмиттеров транзисторов V4, V5 на базу транзистора V3.

Напряжение, подаваемое на вход эмиттерного повторителя на транзисторе V8, не равно нулю даже при отсутствии сигнала на входе ОУ. Выходное же напряжение ОУ в этом случае, как уже говорилось, должно быть равно нулю. Смещение уровня поступающего напряжения при переходе от одиночного вы-

хода второго дифференциального каскада ко входу оконечного (V10) происходит за счет подачи напряжения на резистор R9, через который течет строго определенный ток. Требуемая величина и стабильность этого тока обеспечиваются генератором тока, выполненным на транзисторе V9. Упомянутый ранее транзистор V6 выполняет функции термостабилизирующего диода и для этого генератора.

В большинстве случаев ОУ используют с внешней отрицательной обратной связью с выхода на вход. Для обеспечения устойчивой работы, т.е. для исключения возможности самовозбуждения ОУ, охваченного обратной связью, необходимо, чтобы произведение его коэффициента усиления на коэффициент передачи цепи обратной связи было меньше единицы на частоте, при которой фазовый сдвиг в ОУ превышает 180° . Выводы 2, 3, 12 интегрального ОУ К140УД1 предназначены для подключения внешних корректирующих цепей, обеспечивающих соблюдение этого условия.

В структуре рассмотренного усилителя можно выделить три основные части: дифференциальные каскады усиления напряжения, каскад сдвига уровня напряжения и выходной каскад усиления мощности. По такой структурной схеме построены все выпускаемые в настоящее время ОУ широкого применения. Различие между ними заключается лишь в соотношении составных частей.

В процессе эволюции схемотехнических и технологических решений был создан целый ряд интегральных схем операционных усилителей, которые можно разделить на четыре группы.

Основные ОУ—*общего применения (универсальные)* К153УД2, К140УД6, К140УД7, К553УД2, К544УД1, К1409УД1 и др. Они позволяют строить узлы радиоэлектронной аппаратуры, имеющие суммарную погрешность порядка 1%. Существуют конструкции интегральных схем, которые объединяют в одном корпусе несколько ОУ общего применения: двухканальные К140УД20, К551УД2, микросхема К1401УД1 содержит в одном корпусе четыре ОУ.

Прецизионные (измерительные) ОУ К153УД5, К553УД5, К140УД17 имеют коэффициент усиления порядка 10^6 . Они гарантируют малый уровень шумов, что дает возможность реализовать узлы с погрешностью порядка десятых долей процента.

Быстродействующие ОУ К140УД11, К544УД2 и другие имеют дополнительно высокочастотный канал и предназначены для построения широкополосных и быстродействующих узлов.

Микромощные ОУ К153УД4, К154УД1 и другие потребляют от источника питания ток менее 1 мА и могут продолжительное время работать с питанием от автономного источника.

Большинство ОУ выпускается в круглом корпусе с восемью выводами и одинаковым их расположением, что облегчает их замену. Выпускаются ОУ и в пластмассовом корпусе (КР140УД1), в керамическом корпусе (КМ551УД2). Существуют ОУ и в гибридно-пленочном исполнении (К284УД2), в бескорпусном, например серии К740.

2. ТИПОВОЙ РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Рассчитать линейный усилительный каскад на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (рис. 2.1), по следующим данным: выходная мощность $P_{\text{вых}} = 1 \text{ Вт}$, диапазон рабочих частот: $100 - 5000 \text{ Гц}$, коэффициенты линейных искажений $M_n = M_e = 0,9$; коэффициент гармоник $k_2 \leq 7\%$.

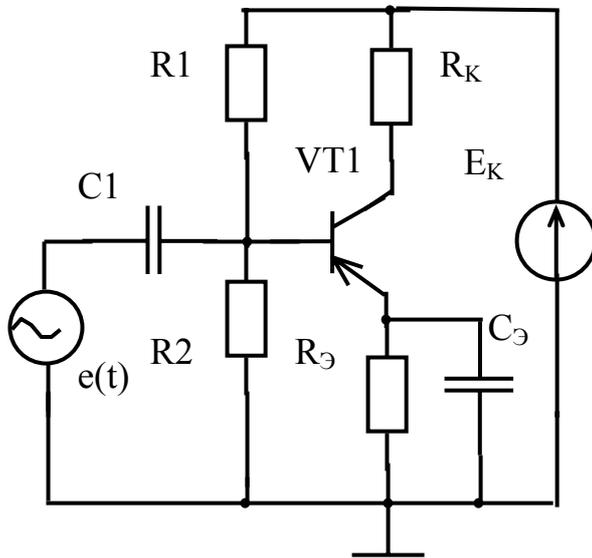


Рис. 2.1. Схема принципиальная электрическая усилителя на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером

1. Выбираем по справочнику транзистор П201А с параметрами:

наибольшее коллекторное напряжение $U_{Kmax} = 30 \text{ В}$;

наибольший коллекторный ток $I_{Kmax} = 1,5 \text{ А}$;

мощность, рассеиваемая без радиатора (допустимая мощность), $P_{\text{доп}} = 1 \text{ Вт}$, с радиатором $P_{\text{доп}} = 10 \text{ Вт}$.

Семейство выходных статических характеристик приведено на рис. 2.2, а семейство входных статических характеристик – на рис. 2.3.

2. Выбираем напряжение на коллекторе:

$$U_K = 10 \text{ В} < U_{Kmax}/2 = 15 \text{ В}.$$

3. Выходные характеристики транзистора имеют линейный характер, что позволяет увеличивать значение коэффициента использования коллекторного напряжения ξ почти до единицы. При таких значениях коэффициента ξ величина КПД каскада оказывается близкой к 50%. Значение КПД обычно выбирается в пределах 40–45%. С уменьшением напряжения источника питания КПД уменьшается до 25–35%.

Задаемся величиной гарантированного КПД $\eta = 25\%$ и находим величину мощности, потребляемой усилителем от источника коллекторного питания

$$P_0 = P_{\text{вых}}/\eta = 1,0/0,25 = 4,0 \text{ Вт}.$$

4. Определяем постоянную составляющую тока коллектора:

$$I_0 = P_0/U_K = 4,0/10 = 400 \text{ мА} < I_{Kmax} = 1,5 \text{ А}.$$

5. Оценим величину сопротивления нагрузки цепи коллектора:

$$R_K = U_K/I_0 = 10/0,4 = 25 \text{ Ом}.$$

6. Выполним построение динамической выходной характеристики. В нашем случае выходная динамическая характеристика проходит через рабочую точку А с координатами $U_K = 10 \text{ В}$ и $I_0 = 0,4 \text{ мА}$ и ограничивается точками В и С с координатами:

$$\text{точка В} - U_{Kmin} \approx 0,1 U_K = 1 \text{ В}, I_{Kmax} = I_0 + 0,9 U_K/R_K = 0,76 \text{ А};$$

$$\text{точка С} - U_{Kmax} = 1,9 U_K = 19 \text{ В}, I_{Kmin} = I_0 - 0,9 U_K/R_K = 0,04 \text{ А}.$$

7. По динамической выходной характеристике определяем:

ток базы в режиме покоя $I_{B0} = 4 \text{ мА}$;
максимальный ток базы $I_{Bmax} = 9,6 \text{ мА}$;
минимальный ток базы $I_{Bmin} = 0,4 \text{ мА}$.

8.Используя данные, полученные при расчете динамической выходной характеристики, построим входную динамическую характеристику на семействе входных статических характеристик (рис.2.3). Если в справочнике приводится не семейство входных статических характеристик, а только типовая входная характеристика для паспортного значения напряжения на коллекторе транзистора, то в первом приближении можно пользоваться только одной статической входной характеристикой. Обратите внимание на замечание, сделанное на с.11 настоящего пособия.

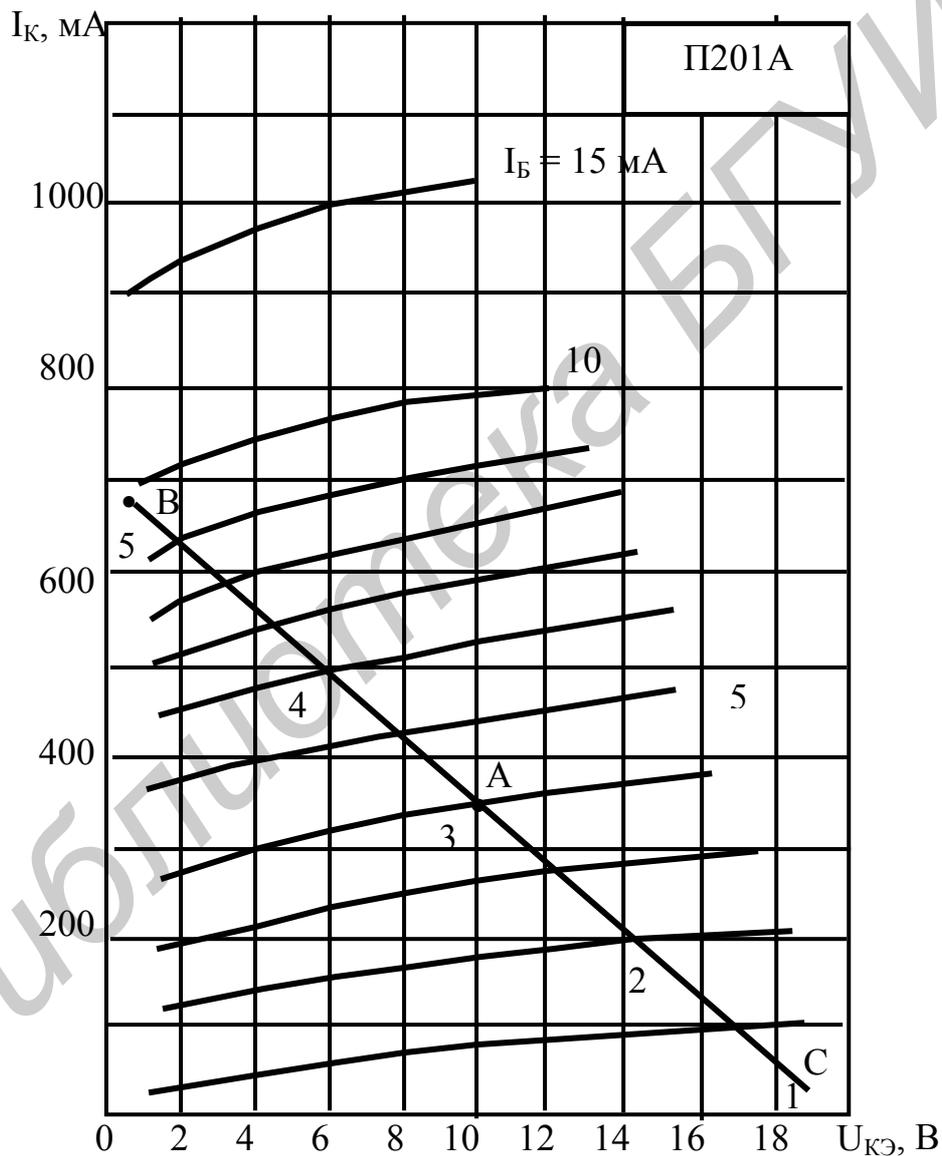


Рис. 2.2. Семейство выходных статических характеристик транзистора П201А и построение выходной динамической характеристики

9. По динамической входной характеристике находим:
 напряжение на базе в режиме покоя $U_{Б0} = 0,36$ В,
 минимальное напряжение на базе $U_{БЭmin} = 0,23$ В,
 максимальное напряжение на базе $U_{БЭmax} = 0,47$ В.

10. Оценим размах базового напряжения:

$$2U_{БЭ} = U_{БЭmax} - U_{БЭmin} = 0,47 - 0,23 = 0,24 \text{ В}$$

и размах изменений базового тока:

$$2I_{Б} = I_{Бmax} - I_{Бmin} = 9,6 - 0,4 = 9,2 \text{ мА.}$$

11. Оценим величину среднего значения входного сопротивления усилительного каскада:

$$R_{вх} = U_{БЭ}/I_{Б} = 0,12 / 4,6 \cdot 10^{-3} = 26,1 \text{ Ом.}$$

12. Выбираем величину тока делителя в цепи задания базового смещения

$$I_{д} = (2 \dots 5)I_{Б0} = 2 \cdot 4 = 8 \text{ мА.}$$

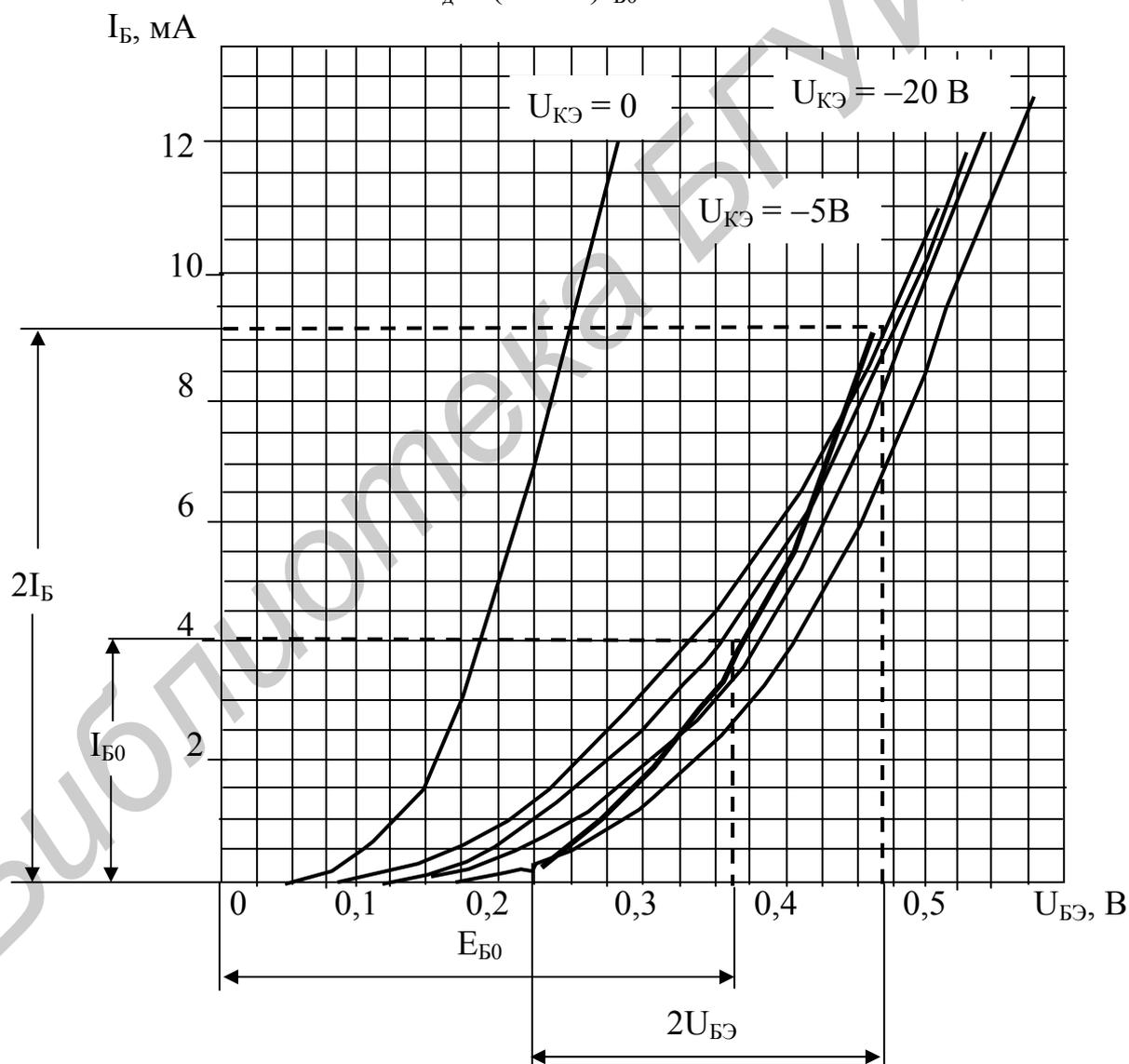


Рис. 2.3. Семейство входных статических характеристик транзистора П201А и построение входной динамической характеристики

13. Рассчитаем величины сопротивлений цепи делителя базового смещения и величину резистора в эмиттерной цепи транзистора. Выбираем $U_{\text{Э}} = 1$ В.

Тогда имеем:

$$R_1 \approx \frac{U_{\text{К}} - U_{\text{Б0}} - U_{\text{Э}}}{I_{\text{д}} + I_{\text{Б0}}} = \frac{10 - 0,36 - 1}{(8 + 4)10^{-3}} = 720 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \frac{U_{\text{Б0}} + U_{\text{Э}}}{I_{\text{д}}} \approx 170 \text{ Ом};$$

$$R_3 \approx U_{\text{Э}}/I_0 = 1/0,4 = 2,5 \text{ Ом}.$$

В соответствии с требованиями ГОСТ 28884-90 выбираем $R_1=750$ Ом, $R_2=180$ Ом, $R_3=2,4$ Ом.

14. Рассчитаем эквивалентную величину входного сопротивления. Поскольку по цепи переменного тока сопротивления R_1 и R_2 оказываются включенными параллельно, то сопротивление делителя R_1 - R_2 определится как

$$R_{12} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 720 \cdot 171 / (720 + 171) = 138 \text{ Ом}.$$

15. Тогда эквивалентное сопротивление усилителя можно определить как параллельно включенные сопротивления делителя R_1 - R_2 и входного сопротивления собственно усилительного каскада $R_{\text{вх}}$. Имеем:

$$R_{\text{вхЭ}} = R_{\text{вх}} \cdot R_{12} / (R_{\text{вх}} + R_{12}) = 26,1 \cdot 138 / (26,1 + 138) = 21,9 \text{ Ом}.$$

16. Определим мощность, потребляемую во входной цепи:

$$P_{\text{вх}} = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{БЭ}}^2}{R_{\text{вхЭ}}} = \frac{1}{2} \frac{0,12^2}{21,9} = 0,33 \text{ мВт}.$$

17. Переходим к построению сквозной (проходной) динамической характеристики $I_{\text{К}} = f(E_{\text{с}})$, где $E_{\text{с}}$ – амплитуда входного испытательного гармонического сигнала.

Для этого выбираем сопротивление источника сигнала $R_{\text{с}} = 150$ Ом и находим точки проходной характеристики.

Точка 1: $I_{\text{к1}} = 35$ мА, $I_{\text{Б1}} = 0,4$ мА, $U_{\text{БЭ1}} = 0,23$ В.

$$E_{\text{с1}} = U_{\text{БЭ1}} + R_{\text{с}} I_{\text{Б1}} = 0,23 + 150 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = 0,29 \text{ В}.$$

Точка 2: $I_{\text{к2}} = 190$ мА, $I_{\text{Б2}} = 2$ мА.

$$E_{\text{с2}} = 0,32 + 150 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,62 \text{ В}.$$

Точка 3: $I_{\text{к3}} = 352$ мА, $I_{\text{Б3}} = 4$ мА, $U_{\text{БЭ3}} = 0,365$ В.

$$E_{\text{с3}} = 0,365 + 150 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0,965 \text{ В}.$$

Точка 4: $I_{\text{к4}} = 500$ мА, $I_{\text{Б4}} = 6$ мА, $U_{\text{БЭ4}} = 0,415$ В.

$$E_{\text{с4}} = 0,415 + 150 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 1,315 \text{ В}.$$

Точка 5: $I_{\text{к5}} = 670$ мА, $I_{\text{Б5}} = 9,6$ мА, $U_{\text{БЭ5}} = 0,47$ В.

$$E_{\text{с5}} = 0,47 + 150 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3} = 1,91 \text{ В}.$$

Динамическая сквозная характеристика, построенная по полученным данным, показана на рис 2.4.

18. Вычислим амплитуды гармонических составляющих коллекторного тока, необходимые для расчета коэффициента нелинейных искажений.

Для определения спектральных составляющих тока цепи коллектора находим мгновенные напряжения:

$$2U_{\text{BX}} = E_{\text{C5}} - E_{\text{C1}} = 1,91 - 0,29 = 1,62 \text{ В};$$

$$U_{\text{BX}} = 0,81 \text{ В}, U_{\text{BX}}/2 = 0,405 \text{ В}$$

и следующие мгновенные значения токов:

$$I_{\text{Kmin}} = 35 \text{ мА}, \text{ при напряжении } E_{\text{C min}};$$

$$I_{\text{Kmax}} = 670 \text{ мА}, \text{ при напряжении } E_{\text{C max}};$$

$$I_0 = 395 \text{ мА}, \text{ при напряжении } E_{\text{C min}} + U_{\text{BX}};$$

$$I_{\text{K1}} = 565 \text{ мА}, \text{ при напряжении } E_{\text{C min}} + (3/2)U_{\text{BX}};$$

$$I_{\text{K2}} = 222 \text{ мА}, \text{ при напряжении } E_{\text{C min}} + U_{\text{BX}}/2.$$

Амплитуды составляющих коллекторного тока находим по формулам пяти ординат, которые позволяют рассчитать амплитуды первых четырех гармоник коллекторного тока. В большинстве практических случаев ограничиваются расчетом только этих амплитуд, так как амплитуды гармоник более высокого порядка, как правило, оказываются незначительными и ими просто пренебрегают. Итак, имеем:

$$I_{\text{Km1}} = \frac{(I_{\text{Kmax}} - I_{\text{Kmin}}) + (I_{\text{K1}} - I_{\text{K2}})}{3} = \frac{(670 - 35) + (565 - 222)}{3} = 326 \text{ мА};$$

$$I_{\text{Km2}} = \frac{0,5(I_{\text{Kmax}} + I_{\text{Kmin}}) - I_0}{2} = \frac{0,5(670 + 35) - 395}{2} = -21 \text{ мА};$$

$$I_{\text{Km3}} = \frac{(I_{\text{Kmax}} - I_{\text{Kmin}}) - 2(I_{\text{K1}} - I_{\text{K2}})}{6} = \frac{670 - 35 - 2(565 - 222)}{6} = 8,5 \text{ мА}.$$

$$I_{\text{Km4}} = \frac{(I_{\text{Kmax}} + I_{\text{Kmin}}) - 4(I_{\text{K1}} + I_{\text{K2}}) + 6I_0}{12} =$$

$$= \frac{(670 + 35) - 4(565 + 222) + 6 \cdot 395}{12} = 0,58 \text{ мА}.$$

19. Определим коэффициент гармоник:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{I_{\text{Km2}}^2 + I_{\text{Km3}}^2 + I_{\text{Km4}}^2}}{I_{\text{Km1}}} = \frac{\sqrt{21^2 + 8,5^2 + 0,58^2}}{326} \approx 0,07.$$

Таким образом, коэффициент гармоник рассчитанного усилительного каскада находится в пределах, требуемых заданием. Если в результате расчета получается более высокий коэффициент нелинейных искажений, чем предусмотрено заданием, тогда нужно принять меры для его снижения, например, уменьшить величину коэффициента использования ξ нелинейного элемента по коллекторному питанию или увеличить сопротивление коллекторной нагрузки и произвести новый расчет. Поскольку мы использовали графический метод расчета, то гарантируем высокую точность расчета, но не можем найти оптимальный режим работы усилительного каскада. Поэтому при всех изменениях параметров рассчитываемого усилителя всякий раз приходится проводить расчет заново. Но при приобретении практических навыков эта работа не представляется сложной. Тем более надо подчеркнуть, что графические методы позволяют избежать многих грубых ошибок, которые могут возникнуть при вы-

полнении расчета аналитическими методами, имеющими меньшую точность, но позволяющими оптимизировать некоторые параметры рассчитываемого усилительного каскада.

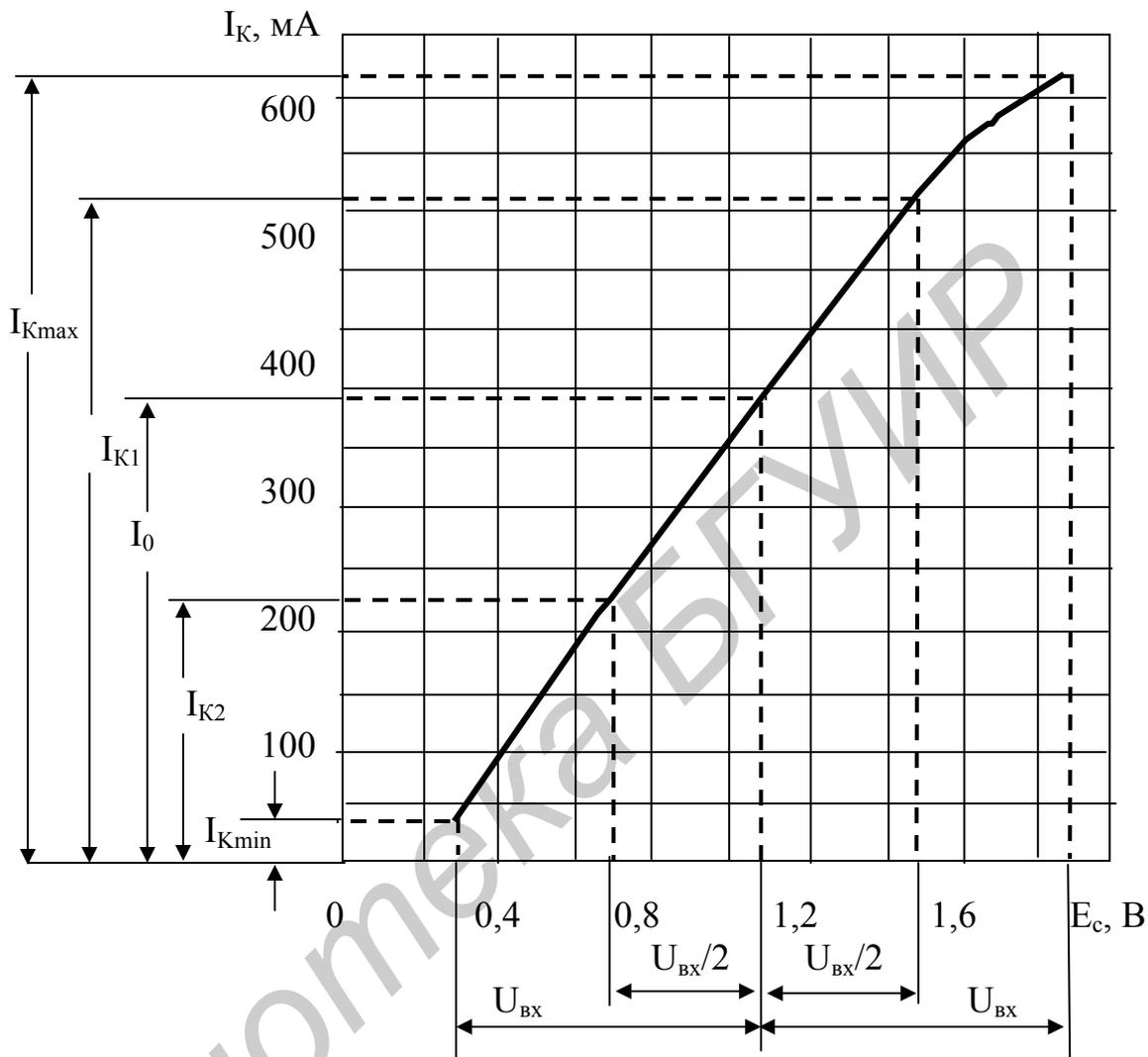


Рис. 2.4. Проходная динамическая характеристика транзистора П201А и расчет коэффициента гармоник по формулам пяти ординат

20. Коэффициент частотных искажений на нижних частотах определяется формулой

$$M_H = \sqrt{1 + \left[\frac{1}{\Omega_H C_P (R_{KЭ} + R_{ВХЭ})} \right]^2},$$

где $\Omega_H = 2\pi F_H$ – нижняя циклическая частота усилителя; $R_{KЭ}$ – параллельное сопротивление выходного сопротивления каскада и сопротивления в коллекторной цепи транзистора; $R_{ВХЭ}$ – входное эквивалентное сопротивление транзисторного каскада, равное параллельному сопротивлению входного сопротивления транзистора и эквивалентного сопротивления цепи смещения R_{12} (см. формулу (1.33)).

Поскольку выходное сопротивление в данной схеме значительно больше величины коллекторного резистора, то при расчете величины сопротивления

R_{K1} , можно ограничиться учетом только резистора $R_K = 25$ Ом. А так как сопротивление цепи смещения значительно больше входного сопротивления транзистора, то можно считать, что $R_{ВХЭ} \approx R_{ВХ} = 26,1$ Ом. Отсюда легко оценить величину разделительной емкости $C_P \geq 10,0$ мкФ. При установке такой большой емкости в усилительный каскад нужно учитывать то обстоятельство, что тем самым мы увеличиваем паразитную емкость каскада, снижая усиление на высоких частотах. Поэтому в технике всегда имеют дело с компромиссными проблемами, благодаря умелому разрешению которых и получаются прекрасные устройства.

21. Коэффициент частотных искажений в области верхних частот обусловлен влиянием паразитной емкости, условно обозначаемой $C_{КЭ}$, определяется формулой

$$M_B = \sqrt{1 + (\Omega_B R_{\parallel} C_{КЭ})^2},$$

где Ω_B – верхняя рабочая частота усилительного каскада; R_{\parallel} – эквивалентное сопротивление нагрузки усилительного каскада, равное параллельному сопротивлению R_K и $R_{ВХЭ}$ (см. формулу (1.25)).

Величина емкости $C_{КЭ}$ определяется качеством выполненного монтажа и изготовления конструкции усилителя. Продуманное выполнение усилительного каскада обеспечивает незначительную величину $C_{КЭ}$, равную 10–15 пФ, в то время как неряшливый монтаж той же схемы усилителя может увеличить емкость $C_{КЭ}$ до 50–100 пФ, в результате чего значительно снизится усиление в области верхних частот. В данном случае мы предполагаем, что усилитель выполнен качественно, поэтому его частотные свойства будут удовлетворять поставленным в условии требованиям.

22. Выбор величины емкости $C_Э$ носит компромиссный характер. Эта емкость вводится для нейтрализации влияния обратной отрицательной связи на величину коэффициента усиления в области средних и высоких частот. Чем большее значение мы дадим этой емкости во время расчета усилителя, тем большие размеры она будет иметь. Следовательно, увеличивая $C_Э$, мы одновременно увеличиваем коэффициент усиления усилителя и величину емкости $C_{КЭ}$, которая снижает усиление в области высоких частот. В практических схемах величину емкости $C_Э$ выбирают равной от нескольких микрофард до нескольких десятков микрофард.

На этом расчет усилительного каскада можно закончить, хотя можно рассчитывать еще ряд других, не менее важных параметров, таких, как устойчивость положения рабочей точки при изменении температуры окружающей среды в достаточно широких пределах, устойчивость режима работы усилителя при замене транзисторов и т.д.

3.МЕТОДИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

3.1. ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Курсовое проектирование по курсу «Основы радиоэлектроники и схемотехники» является ответственным этапом в подготовке инженеров-экономистов для работы на предприятиях радиоэлектронного профиля. Курсовой проект – это первый самостоятельный конструкторско-технологический проект или научно-исследовательская работа студентов, выполняемые по учебному плану. Главная цель и содержание курсового проекта – закрепление теоретического материала и выработка навыков проектирования и конструирования изделий или его составных частей, а также технологических процессов и организация их производства.

В процессе выполнения курсового проекта по курсу «Основы радиоэлектроники и схемотехники» студент овладеет навыками расчета радиоэлектронных устройств, которые в производственных условиях выполняются инженерами-схемотехниками, научится разрабатывать конструкторскую и технологическую документацию, с помощью которой идея, заложенная в разрабатываемое устройство, должна воплотиться в жизнь.

Очень важно научиться пользоваться специальной радиотехнической и справочной литературой, выполнять требования государственных стандартов к проектируемым устройствам и документации по их оформлению. Курсовое проектирование готовит студента к более ответственному этапу обучения – дипломному проектированию.

Тематика курсового проектирования отвечает задачам курса «Основы радиоэлектроники и схемотехники» и учитывает требования народного хозяйства и науки Республики Беларусь. Реальность тематики курсовых проектов – это ее научность, современность и направленность на получение студентами навыков самостоятельной работы.

Работа студента над выполнением курсового проекта проводится под руководством преподавателя. Однако студент не должен ожидать от руководителя готовых решений по проектному заданию, а обязан стремиться самостоятельно решить поставленную задачу, развивая и совершенствуя творческие навыки при выполнении работы.

Объем и содержание работы по выполнению курсового проекта по научно-исследовательской тематике кафедры, определяется преподавателем, осуществляющим руководство курсовым проектом.

Общие требования к построению и содержанию курсовых проектов устанавливает стандарт предприятия СТП 12-38-89 [1]. Эти требования являются обязательными для преподавателей и студентов БГУИР.

3.2. ОБЪЕМ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

3.2.1. Объем курсового проекта

Курсовой проект состоит из графической части, представляющей собой собственно курсовой проект, разработанный в виде чертежей, выполненных в соответствии с требованиями Единой системы конструкторской документации (ЕСКД), и расчетно-пояснительной записки к нему.

Графическая часть проекта выполняется в виде трех чертежей: структурной схемы устройства (лист формата А2), схемы принципиальной электрической (лист формата А1 или А2), элементов конструкции устройства, представляющих собой, например, чертеж печатной платы с технологическими особенностями ее обработки или другие элементы конструкции устройства (лист формата А2), отражающие наиболее оригинальные стороны выполненного проекта.

Расчетно-пояснительная записка выполняет роль приложения к проекту и содержит сведения, дополняющие информацию, представленную в виде чертежей. Объем расчетно-пояснительной записки не должен превышать 40 листов (страниц) рукописного текста, а графической части – 3-4 чертежей форматов, предусмотренных СТП 12-38-89 [1].

3.2.2. Порядок выполнения курсового проекта

Выполнение проекта рассчитано на 13-15 недель. Примерный календарный план работы выглядит следующим образом.

Первая неделя – получение и оформление задания на курсовое проектирование.

Вторая неделя – подбор литературы по теме задания, поиск и изучение основных литературных источников.

Третья неделя – выполнение предварительных расчетов, выбор и обоснование структурной схемы устройства.

Четвертая неделя – оформление выполненных предварительных расчетов и представление их руководителю для первой опрощенки.

Пятая неделя – разработка схемы принципиальной электрической устройства и ее описание.

Шестая – седьмая недели – электрический и конструктивный расчет каскадов и узлов, предусмотренных заданием, в том числе и с использованием ЭВМ.

Восьмая неделя – оформление соответствующих разделов расчетно-пояснительной записки по результатам проведенных расчетов и представление их руководителю проекта для второй опрощенки.

Девятая неделя – описание конструкции устройства, экономический расчет, составление спецификации к разработанному устройству.

Десятая – двенадцатая недели – оформление расчетно-пояснительной записки, выполнение графической части проекта.

Тринадцатая- четырнадцатая недели – представление выполненных чертежей на подпись руководителю проекта и сдача расчетно-пояснительной записки на проверку руководителем проекта, устранение сделанных руководителем замечаний.

Пятнадцатая неделя – защита курсового проекта.

3.2.3. Защита курсового проекта

Защита проекта является особой формой проверки выполнения полученного задания. Она должна научить студента всестороннему обоснованию предложенных решений и глубокому пониманию выполненной им работы. Защита проводится публично перед комиссией из 2-3 преподавателей, назначенных заведующим кафедрой. При этом защита заключается в коротком (продолжительностью 5-7 минут) докладе студента по выполненному заданию и ответах на вопросы членов комиссии по теме курсового проекта.

Рекомендуется следующий план доклада:

- полное название темы курсового проекта и назначение спроектированного устройства;
- перечень исходных данных к проекту;
- обоснование принятого решения, оценка его достоинств и недостатков;
- особенности выбранного решения;
- заключение.

Доклад должен сопровождаться демонстрацией графического материала.

3.3. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

3.3.1. Общие требования к содержанию расчетно-пояснительной записки

Расчетно-пояснительная записка к курсовому проекту должна быть написана от руки разборчивым и аккуратным почерком на одной стороне белой бумаги формата А4 (297x210 мм²). Допускается и поощряется выполнение расчетно-пояснительной записки с помощью ЭВМ в среде редактора Word. По всем четырем сторонам должны быть оставлены поля размерами, мм: левое – 30, правое – 10, верхнее – 20, нижнее – 27. Листы расчетно-пояснительной записки должны быть *аккуратно* сброшюрованы в обложке из плотной бумаги. Номера страниц проставляются в правом нижнем углу листа. Разделы расчетно-пояснительной записки и примерный их объем должны быть следующими:

	Количество листов
1. Титульный лист	1
2. Задание на курсовой проект	1
3. Содержание (оглавление)	1

4. Введение	1–2
5. Обзор методов решения аналогичных инженерных задач	5–7
6. Предварительный расчет (выбор и обоснование структурной схемы устройства)	5–7
7. Описание схемы принципиальной электрической	2–3
8. Электрический расчет основного узла устройства	6–10
9. Расчет на ЭВМ	1–2
10. Описание конструкции устройства	3–4
11. Анализ технологичности конструкции	2–3
12. Экономический расчет	3–4
13. Меры по энергосбережению	1–2
14. Охрана труда, техника безопасности, противопожарная техника, экологичность конструкции	1–2
13. Заключение	1
14. Список использованной литературы	1
15. Приложения	1–5
16. Спецификация к схеме принципиальной электрической	2–3

Титульный лист выполняется в соответствии с требованиями стандарта предприятия [1]. Оформление титульного листа показано в прил. 1.

Задание на курсовой проект является отчетным документом, без которого расчетно-пояснительная записка на проверку не принимается, а проект к защите не допускается. Задание заполняется студентом аккуратно от руки или на машинке на типографском бланке, подписывается студентом, руководителем проекта и утверждается заведующим кафедрой. Задание включает название темы проекта, исходные данные, содержание расчетно-пояснительной записки, перечень графического материала, календарный график работы.

Содержание (оглавление) включает в себя названия разделов и подразделов расчетно-пояснительной записки с указанием страниц, на которых они начинаются.

Введение должно быть кратким и посвящено теме курсового проекта. Во введении должны быть отражены следующие моменты: сведения о текущих и перспективных планах, отражающих темпы развития различных разделов радиоэлектроники и схемотехники и тенденции их дальнейшего развития, назначение проектируемого устройства, его особенности и области применения.

Обзор методов решения аналогичных инженерных задач должен содержать: сведения об устройствах, аналогичных проектируемому, сравнительный анализ различных схемных решений поставленной задачи с указанием их достоинств и недостатков, структурные и электрические схемы аналогичных устройств.

Целью *предварительного расчета* являются выбор и обоснование структурной схемы проектируемого устройства, определение числа каскадов, распределение линейных (частотных и фазовых) и нелинейных искажений в каскадах проектируемой схемы, выбор схем включения усилительных элементов и

способов межкаскадных связей, определение мест для включения регулировок. В этом разделе должна быть обоснована структурная схема устройства и принят окончательный вариант технического решения с указанием его достоинств и недостатков. Выбор структурной схемы производят на основе анализа различных схемных решений поставленной задачи и исходя из конкретных требований задания на курсовое проектирование.

Например, предварительный расчет усилителей низкой частоты выполняются в такой последовательности:

- выбирают схему оконечного каскада, типы транзисторов для него, способы включения и режимы работы транзисторов;
- определяют количество каскадов предварительного усиления, типы транзисторов и способы их включения;
- распределяют по каскадам заданные величины усиления, линейные и нелинейные искажения.

В разделе, посвященном *описанию схемы принципиальной электрической*, должно быть приведено полное описание схемы принципиальной электрической проектируемого устройства, выполненное в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД, пояснено назначение каждого входящего в нее элемента и приведены основные их параметры.

Электрический расчет основного узла проектируемой схемы производится при выполнении курсового проекта. Исходные данные для расчета оговорены в задании и дополняются данными предварительного расчета.

Поскольку в каждом проектируемом устройстве, как правило, содержится по крайней мере один усилительный каскад, то в разд.1 настоящего пособия приведены краткие теоретические сведения по анализу процессов в усилительном каскаде, а разд. 2 содержит типовой расчет простейшего усилителя на транзисторе с коллекторной нагрузкой, включенного по схеме с общим эмиттером.

Если студент пожелает рассчитать другой основной каскад проектируемого им устройства, то типовой расчет усилителя, приведенный в прил. 3 настоящего пособия, дает представление о качестве и объеме расчета этого основного узла. Инициатива студента в этом направлении поощряется.

При выполнении электрического расчета следует ориентироваться на современные детали и приборы. Результаты расчетов всех элементов должны быть округлены до ближайших стандартных значений, установленных ГОСТ 28884-90 и приведенных в прил. 2. Таблица буквенных обозначений основных величин приведена в прил. 3. Электрический расчет дополняется необходимыми иллюстрациями.

В этом разделе приводятся электрические схемы рассчитанного каскада, характеристики и параметры усилительных приборов и все графоаналитические построения, выполненные в процессе проведения расчета. Если при расчете используются номограммы и вспомогательные графики, то их следует привести в расчетно-пояснительной записке. Обязательной является ссылка на литературу, согласно которой выполняется расчет. Перечень стандартов ЕСКД, которые

нужно в обязательном порядке просмотреть всем студентам, выполняющим курсовой проект по курсу «Основы радиоэлектроники и схемотехники», приведен в прил. 4.

При выполнении курсового проекта студент должен продемонстрировать умение пользоваться современной вычислительной техникой. Как правило, на ПЭВМ рассчитываются амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), фазочастотные характеристики (ФЧХ), импульсная, переходная характеристики рассчитываемых каскадов. В этом разделе следует привести листинги программ, графики рассчитанных зависимостей вместе с нужными пояснениями к ним.

В разделе, посвященном *описанию конструкции устройства*, необходимо кратко описать конструкцию и технологию изготовления устройства, например, конструкцию и способ крепления силового и других трансформаторов, радиаторов охлаждения, указать размеры и материал кожуха, печатной платы, типы и назначение переключателей, гнезд и регулировок, выведенных на переднюю или заднюю панели устройства, и т.д.

Конструкторский раздел расчетно-пояснительной записки должен содержать:

- обоснование технологических требований к объекту проектирования;
- выбор и обоснование конструктивного исполнения и компоновки;
- расчет конструктивных параметров объекта;
- выбор и обоснование методов защиты конструкции от внешних и внутренних воздействующих факторов;
- анализ и учет требований эргономики, инженерной психологии и художественного проектирования;
- оценку степени реализации в проекте методов стандартизации.

Технологический раздел расчетно-пояснительной записки должен быть выполнен в соответствии с ГОСТ 14.201-83 и содержать:

- анализ технологичности конструкции изделия (объекта проектирования) и технические требования к нему с этой точки зрения;
- определение типа производства, выбор и обоснование принятого варианта технологического процесса;
- оценку степени реализации в проектируемых технологических процессах методов стандартизации (с расчетом соответствующих показателей и необходимыми обоснованиями).

Экономический расчет включает в себя, как правило, калькуляцию себестоимости и расчет государственной розничной цены спроектированного устройства и производится в соответствии с процедурой, описанной в прил. 5 [9].

В некоторых случаях экономический раздел может включать:

- расчет экономической целесообразности и эффективности внедрения спроектированного узла, устройства или процесса, если есть аналог (базовый вариант), включая выбор базы сравнения, расчет годовой производительности, приведенных (в расчете на год) издержек, капитальных вложений в сфере производства и эксплуатации и экономического эффекта;

- расчет сметы затрат на опытно-конструкторскую разработку и проведение научно-исследовательской работы;

- вопросы организации участка (цеха) на предприятии, оперативно-производственного и технико-экономического планирования;

- специальные вопросы, предусмотренные заданием на проектирование.

В разделе, посвященном *мерам по энергосбережению*, следует указать, какие меры приняты для сбережения электрической энергии, необходимой для нормального функционирования спроектированного устройства. Целям энергосбережения могут служить выбор микросхем с низким потреблением тока источника питания, схемные решения, в результате принятия которых реальные устройства будут потреблять небольшой ток, и то только в моменты экстренной необходимости и т. д.

В раздел *охраны труда, техники безопасности, противопожарной техники и экологичности конструкции* должно быть включено решение следующих вопросов:

- анализ опасностей и вредностей объекта проектирования с точки зрения охраны труда, пожаро- и взрывобезопасности;

- обоснование принятых решений с необходимыми расчетами и обязательными ссылками на действующие нормативно-технические документы с точки зрения охраны труда, пожаро- и взрывобезопасности, а также экологичности изделия;

- оценку эффективности принятых решений как с точки зрения охраны труда, так и с экономической точки зрения.

В *заключении* кратко подводятся итоги работы, проделанной при выполнении курсового проекта, указывается область применения разработанного устройства, отмечаются его параметры и особенности работы и эксплуатации.

При составлении *списка использованной литературы* необходимо соблюдать требования ГОСТ 7.1-76 и стандарта предприятия [1]. Описание литературы в перечне должно состоять из заголовка, включающего в себя фамилию, инициалы автора (или авторов), заглавие в том виде, как оно записано на титульном листе, подзаголовочные данные, место издания, название издательства, год издания. При наличии трех и более авторов допускается указывать фамилию и инициалы первого из них и слова «и др.». Наименование места издания приводится полностью, за исключением двух городов: Москва (М.) и Ленинград (Санкт-Петербург) (Л. и СПб.). При описании статей из журналов и продолжающихся изданий дополнительно указываются название журнала, наименование серии, том, страницы, на которых помещена статья. Используемые источники в списке располагаются в порядке появления их ссылок в тексте расчетно-пояснительной записки. При ссылках в тексте на источники информации следует приводить порядковый номер литературы, заключенный в квадратные скобки.

Расчетно-пояснительная записка оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-68, ГОСТ 1.5-93 и стандарта предприятия [1].

3.3.2. Порядок приведения формул

В формулах в качестве символов должны применяться буквенные обозначения физических величин, установленные государственным стандартом (см. прил. 3). Нумерованные формулы, а также формулы с расшифровкой символов следует располагать отдельными строками. Несложные нумерованные формулы допускается помещать внутри текста. Для экономии места несколько небольших формул, располагаемых отдельными строками, допускается помещать в один ряд (а не одну под другой). Двоеточие ставится перед формулами тогда, когда этого требует построение текста, предшествующего формуле. Например, абсолютная и относительная погрешности прибора определяются следующими выражениями:

$$\Delta A = A - A', \quad \delta A = \frac{\Delta A}{A'} 100,$$

где ΔA – абсолютная погрешность прибора; A – показания рабочего прибора, A' – показания образцового прибора; δA – относительная погрешность прибора, %.

После формул ставится тот знак препинания, который необходим. При этом исходят из построения фразы: если формулой заканчивается фраза, то ставится точка, если главное предложение – запятая (например, перед словом «где», начинающем расшифровку символов). Между идущими подряд формулами ставят точку с запятой. Если в документе содержится более одной формулы, то наиболее важные формулы при наличии в тексте ссылок на них нумеруют арабскими цифрами. Порядковые номера формул помещают в круглых скобках с правой стороны листа на уровне формулы без отточия от формулы к ее номеру. Для формулы, представляющей собой дробь с горизонтальной чертой как знаком деления, номер располагается посередине основной линейки. Номер для многострочной формулы ставится против последней ее строки. При нумерации группы формул применяют фигурные скобки, охватывающие по высоте все формулы; острие скобки должно находиться против середины этой группы, а порядковый номер помещается в скобки против острия у прямого края листа.

Нумерация формул в пределах пояснительной записки должна быть сквозная. Когда очередная формула является разновидностью приведенной ранее основной формулы, допускается нумерация формулы арабской цифрой и строчной прямой буквой русского алфавита, например: (16а), (16б) и т.д.

В тексте ссылку на порядковый номер формулы следует начинать со слов «Формула, уравнение, выражение» и затем в круглых скобках указывать номер формулы. Например: «В формуле (6) приведены...», «в выражении (2.1),...». Если ссылка на порядковый номер формулы находится внутри выражения, заключенного в круглые скобки, то их следует заменить на прямые скобки. Например, «Чувствительность /см. выражение (8)/ пропорциональна...».

В формулах следует применять в первую очередь круглые скобки, во вторую – прямые, в третью – фигурные, в четвертую – угловые. Допускается

применять в формулах только круглые скобки. Коэффициенты в формулах следует писать впереди буквенных обозначений слитно с ними. Точку на средней линии как знак умножения не ставят перед буквенными обозначениями физических величин и между ними, перед скобками и после них; между сомножителями в скобках, перед дробными выражениями и после них или между несколькими дробями, записанными через горизонтальную черту; перед знаками радикала, интеграла, а также перед аргументом тригонометрической функции. Точку, как основной знак умножения, на средней линии в формулах необходимо ставить во всех случаях, когда может возникнуть неоднозначная трактовка всего выражения или параметров, входящих в него. Знак умножения в виде крестика (\times) применяется чаще всего для указания размеров; между числовыми сомножителями в формулах при переносе формул с одной строки на другую на знаке умножения; для векторного произведения векторов. Например, размер блока: $480 \times 420 \times 200$; $A \times B$.

Знак корня (радикала) следует писать так, чтобы его горизонтальная черта полностью покрывала все подкоренное выражение.

Многоточие (отточие) внутри формулы применяется в виде трех точек на нижней линии строки.

Запятые, а также знаки сложения, вычитания и равенства ставят перед отточием и после него.

Если формула настолько длинна, что она не помещается в одной строке, то ее частично переносят на другую строку. В первую очередь перенос следует делать на знаках равенства и соотношения между левой и правой частями формулы (\approx , \leq , \equiv , \geq , $=$, $<$, $>$, и т.д.), во вторую – отточии (...), знаках сложения и вычитания, в третью – на знаке умножения применением крестика (\times) в конце одной строки и в начале следующей строки. Не допускается перенос знака деления.

При переносе формулы не допускается разделение индексов, показателей степени, а также выражений, относящихся к знакам логарифма, интеграла, тригонометрических функций, суммы (Σ , S) и произведения.

Значения символов и числовых коэффициентов, входящих как в правую, так и в левую части формулы, должны быть приведены непосредственно под формулой.

И с к л ю ч е н и е. Если перед формулой помещено обозначение величины, приводимое в левой части формулы, то в экспликации (расшифровке) ее можно не приводить.

Значение каждого символа дают с новой строки в той последовательности, в какой они приведены в формуле. Первая строка расшифровки должна начинаться со слова «где», без двоеточия после него. За словом «где» приводится обозначение первой величины и через тире дается ее расшифровка. Далее с новой строки указывается каждое следующее обозначение и его расшифровка. Колонки расшифровок выравниваются по знаку тире (эти знаки должны образовывать вертикаль).

Если правая часть формулы представляет собой дробь, то вначале приводятся объяснения величин, помещенных в числителе, а затем – в знаменателе.

Если расшифровка обозначения не умещается на одной строке, то вторая и следующие строки расшифровки должны начинаться от левого края первого слова расшифровки первой строки.

В конце каждой расшифровки рекомендуется ставить точку с запятой, а в конце последней расшифровки – точку. Допускается писать расшифровки формул в подбор (вместо столбца).

Обозначение единиц физических величин в каждой расшифровке следует отделять запятой от текста расшифровки.

Обозначение единиц физической величины в формуле следует помещать только после подстановки в нее числовых значений и конечного результата вычисления.

3.3.3. Правила оформления таблиц

Цифровой материал в тексте, как правило, должен оформляться в виде таблиц. В таблицах помещают сведения (числовые данные), приводимые в определенную систему и разнесенные по графам.

Таблица должна состоять из следующих элементов:

- тематический заголовок;
- головка таблицы;
- строки (горизонтальные ряды);
- боковик (заголовки горизонтальных рядов);
- графы (колоноки)
- заголовки граф;
- подзаголовки граф.

Высота строк таблицы должна быть не менее 8 мм. Отдельные графы «Номера по порядку» (№ п.п.)» и «единицы физических величин» в таблицу не включают. Диагональное деление головки таблицы не допускается.

Для наглядности и удобства чтения таблица должна быть построена компактно и экономично.

Таблицы с большим количеством граф допускается делить на части и помещать одну под другой, указывая над последующими частями слово «Продолжение». Слово «Таблица», порядковый номер таблицы и тематический заголовок над таблицами указываются один раз над первой частью таблицы.

При переносе таблицы на другой лист головку таблицы повторяют и над ней указывают «Продолжение табл.» или «Окончание табл.». Допускается головку таблицы не повторять. В этом случае пронумеровывают графы и повторяют их нумерацию на следующей странице. Все таблицы должны быть пронумерованы арабскими цифрами. Над правым верхним углом таблицы помещают слово «Таблица» с указанием порядкового номера (без знака №). Слово «Таблица» при наличии тематического заголовка ставят под заголовком. Тематический заголовок пишется симметрично относительно рамки таблицы. На все

таблицы в тексте должны быть ссылки. Слово «Таблица» в тексте пишется полностью, если таблица не имеет номера, но если она имеет номер – тогда сокращенно (например: в табл. 2).

3.3.4. Правила оформления иллюстраций

Помещаемые в записке в качестве иллюстраций графические материалы (чертежи, схемы, графики, диаграммы и т.п.) должны удовлетворять требованиям стандарта предприятия [1].

Иллюстрации могут быть расположены как по тексту документа, так и в конце его или даны в приложении. Размеры иллюстраций выбираются исходя из удобства их расположения и необходимой четкости условных изображений и подписей к ним.

Все иллюстрации нумеруются арабскими цифрами в пределах всей расчетно-пояснительной записки. Каждая иллюстрация должна отвечать тексту, а текст – иллюстрации. Это достигается применением подписей к иллюстрации. Сокращение слов в тексте и в подписи к иллюстрации не допускается.

Порядок размещения подписей к иллюстрациям устанавливает ГОСТ 1.5-93, согласно которому над иллюстрацией указывается ее название, а под ней приводится подрисуночный текст, ниже которого помещают сокращенное слово «рис.» с соответствующим порядковым номером. Цифровые обозначения на иллюстрациях ставят не на обозначаемом элементе, а на поле изображения у конца линии выноски, которая другим своим концом упирается в обозначаемый элемент. Нумеруют элементы арабскими цифрами: либо по часовой стрелке, либо по горизонтали слева направо, либо сверху вниз.

На графиках помещают следующие надписи:

- числовые значения величин по осям слева от вертикальной оси и под горизонтальной осью;
- наименование и единицу физической величины, числовые значения которой помещены у делений шкалы на осях графика. Наименование величин пишут вдоль осей отдельной строкой над числовыми значениями оси ординат и под числовыми значениями на оси абсцисс.

Буквенные обозначения величины пишут в ряду числовых значений, не выходя за рамку графика, над числовыми значениями оси ординат и справа от числовых значений оси абсцисс.

При отсутствии на осях графиков делений шкалы допускается нанесение на концах осей стрелок, указывающих их направление.

3.3.5. Правила оформления приложений

Иллюстративный материал, таблицы, расчеты или текст вспомогательного характера допускается давать в виде приложений. Каждое приложение должно начинаться с нового листа с указанием в правом верхнем углу слова «Приложение» и иметь тематический заголовок.

При наличии более одного приложения все приложения нумеруются арабскими цифрами (без знака №). Нумерация листов расчетно-пояснительной записки и приложений должна быть сквозной. Иллюстрации и таблицы в приложениях нумеруют в пределах каждого приложения. В тексте записки должны быть ссылки на приложения.

3.4. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

3.4.1. Общие требования к оформлению графической части проекта

Графическая часть курсового проекта должна включать в себя схему структурную, схему электрическую принципиальную проектируемого устройства и элементы конструкции устройства, например, чертеж печатной платы с указанием на нем технологических особенностей ее производства.

Графические материалы должны быть оформлены в соответствии с требованиями комплекса стандартов ГОСТ.2 «Единая система конструкторской документации» и дополнительными требованиями и ограничениями по их применению, оговоренными в стандарте предприятия [1].

Перечень основных стандартов ЕСКД, требования которых необходимо учитывать при выполнении курсовых проектов, приведен в прил. 4.

Схема – графический конструкторский документ, на котором показаны составные части изделия и связи между ними в виде условных изображений и обозначений. В зависимости от назначения схемы делят на типы, входящие в четыре группы; каждому типу присваивается шифр, состоящий из трех цифр: первая дает обозначение группы; вторая и третья указывают тип в группе.

Правила оформления структурных схем

Структурная схема – схема, определяющая основные функциональные части устройства, их назначение и взаимосвязи. Правила выполнения электрических структурных схем установлены ГОСТ 2.702-76. На структурной схеме изображают все основные функциональные части устройства и основные взаимосвязи между ними. Функциональные части на схеме изображают в виде прямоугольников или условных графических обозначений. На линиях взаимосвязей стрелками обозначают направление хода процессов, происходящих в устройстве. Размеры прямоугольников стандартами не установлены. Рекомендуются прямоугольники с соотношением размеров $a:b = 2:3$, где a – высота, b – ширина прямоугольника. На схеме должны быть указаны наименования каждой функциональной части устройства. Допускается указывать на схеме обозначения (номера) или типы (шифры) элементов и устройств. Обозначения и типы вписываются внутрь прямоугольников.

Наименование должно начинаться с прописной буквы, остальные буквы – строчные. Сокращение слов в наименованиях, за исключением общепринятых или установленных стандартами, например, УВЧ, УПЧ, АРУ и т.п., не допускается. При большом количестве функциональных частей допускается взамен наименований, обозначений и типов проставлять порядковые номера, как правило, сверху вниз в направлении слева направо. В этом случае наименования, обозначения и типы указывают в таблице, помещенной над основной надписью. Допускается помещать на схеме поясняющие надписи, диаграммы и таблицы, определяющие последовательность процессов во времени, а также указывать параметры в характерных точках. Поясняющие надписи должны начинаться с прописной буквы, например: «Вход», «Выход», «От УПЧ», «К детектору» и т.д.

Структурная схема определяет основные составные части изделия (объекта), их назначение и взаимосвязи. Графическое построение и компоновка схемы должны обеспечивать наиболее наглядное представление о последовательности взаимодействия функциональных частей в изделии.

На структурной схеме отображают все основные функциональные части изделия (элементы, устройства и функциональные группы) и взаимосвязи между ними. Функциональные части представляют на схеме преимущественно в виде прямоугольников или посредством условных графических обозначений, установленных в стандартах Единой системы конструкторской документации. На линиях взаимосвязей стрелками обозначают направления хода процессов. На схеме должны быть указаны наименования функциональных частей, отражающие выполняемую функцию. Допускается указывать на схеме тип элемента (устройства) и (или) обозначение документа (основной конструкторский документ, государственный стандарт, технические условия), на основании которого этот элемент применен.

Наименования, типы и обозначения функциональных частей рекомендуются вписывать внутри прямоугольников.

При большом количестве функциональных частей допускается проставлять порядковые номера взамен вписывания наименований. Порядковые номера располагают справа от изображения или над ним, как правило, сверху вниз и слева направо; тогда наименования, типы и обозначения указывают в таблице, которую помещают преимущественно над основной надписью на поле схемы.

На схеме могут быть приведены дополнительные данные в виде надписей, диаграмм или таблиц, определяющие последовательность процессов во времени, а также параметры в характерных точках: величины токов, напряжений, формы и величины импульсов, математические зависимости и т. п.

Пример выполнения структурной схемы приведен в прил. 6.

Основные правила выполнения функциональных схем

Функциональная схема – схема, разъясняющая определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях устройства или в устройстве

в целом. Правила выполнения электрических функциональных схем устройств общего назначения установлены ГОСТ 2.702-76, а схем цифровой вычислительной техники – ГОСТ 2.708-72 и 2.743-72. На функциональной схеме изображают функциональные части устройства, участвующие в процессе, иллюстрируемом схемой, и связи между этими частями. Функциональные части на схеме изображают в виде условных графических обозначений. Отдельные функциональные части допускается изображать в виде прямоугольников. На схеме должны быть указаны наименования каждой функциональной группы, наименование части устройства, изображенного в виде условного графического обозначения. Наименования, обозначения и типы условного графического обозначения вписываются в прямоугольники. На схеме рекомендуется указывать технические характеристики функциональных частей (рядом с графическим обозначением или на свободном поле схемы)

Основные правила выполнения принципиальных схем

Чертежи должны выполняться на листах следующих форматов, установленных ГОСТ 2.301-68: формат А1 (594x840 мм²), формат А2 (594x420 мм²). Предельное отклонение размеров сторон форматов не должно превышать $\pm 0,5\%$.

Схема электрическая принципиальная, как правило, выполняется на формате А1, а схема электрическая структурная и чертеж, относящийся к конструкторской документации (печатная плата с указанием технологических особенностей ее производства, различного рода монтажные схемы, например, с использованием жгутов и т.п.), – на формате А2. Каждый чертеж должен иметь рамку, ограничивающую поле чертежа. Рамка проводится на расстоянии 5 мм от края бумаги справа, снизу и сверху и на расстоянии 20 мм с левой стороны листа. Форма, размер и порядок заполнения основной надписи установлены ГОСТ 2.104-68 и показаны на рис. 3.1.

Графа 2 основной надписи заполняется согласно требованиям, изложенным в межведомственной нормали системы чертежного хозяйства (МНсч., ч. IV, ред. 2-60), в виде, показанном на рис. 3.2.

Графическую часть допускается выполнять черной тушью или карандашом. На каждом чертеже помещают основную надпись, которую располагают в правом углу над нижней линией рамки.

Наименование изделия в основной надписи должно соответствовать принятой терминологии, быть возможно кратким и записываться в именительном падеже единственного числа. В наименовании, состоящем из нескольких слов, на первом месте помещают существительное, например: «Плата печатная».

Масштабы изображений на чертежах установлены ГОСТ 2.302-68. Масштабы выбирают исходя из габаритов конструкции и выбранного формата листа, причем коэффициент использования площади листа должен быть не менее 0,8. Предпочтительными масштабами являются натуральная величина (масштаб

1:1), масштабы увеличения: 2:1, 4:1, 5:1, 10:1 и масштабы уменьшения: 1:2, 1:4, 1:5, 1:10.



Рис. 3.1. Основная надпись чертежа по ГОСТ 2.104-68

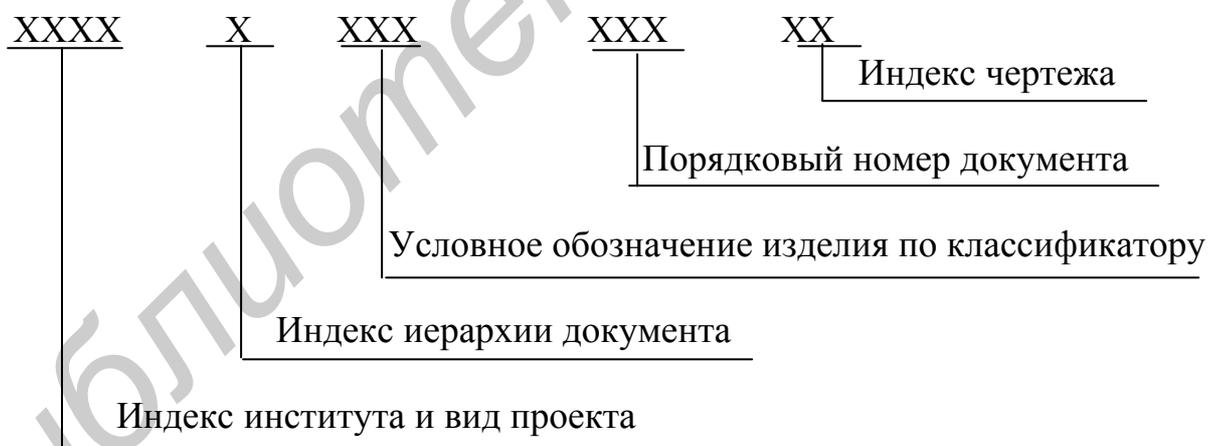


Рис. 3.2. Графа основной надписи по МНсч., ч. IV, ред. 2-60

Высота основной надписи определяется произведением $5 \times 11 = 55$ мм.

Начертания и основные линии на чертежах установлены ГОСТ 2.303-68. Толщина сплошной основной линии должна быть в пределах от 0,6 до 1,5 мм в зависимости от величины и сложности изображения, а также от формата чертежа. Толщина линий должна быть одинаковой для всех изображений на данном чертеже, вычерчиваемых в одинаковом масштабе.

Надписи, наносимые от руки на схемы и чертежи, должны выполняться чертежным шрифтом, установленным ГОСТ 2.304-68. Все схемы в соответствии с ГОСТ 2.701-76 в зависимости от назначения и видов элементов и связей, входящих в состав изделия, делятся на следующие виды и типы.

<i>Вид схемы</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Тип схемы</i>	<i>Обозначение</i>
Электрическая	Э	Структурная	1
Гидравлическая	Г	Функциональная	2
Пневматическая	П	Принципиальная	3
Кинематическая	К	Соединений, подключений	4, 5
Оптическая	Л	Общая	6
Комбинированная	С	Прочая	8
		Совмещенная	0

Таким образом, полное обозначение, например, схемы электрической принципиальной – ЭЗ. Запрещается применять другие наименования типов схем взамен стандартных, например, блок-схема, скелетная схема и др. Схемы выполняются без соблюдения масштабов (за исключением условных обозначений элементной базы).

Принципиальная схема – схема, определяющая полный состав элементов и связей между ними и, как правило, дающая детальное представление о принципах работы устройства. Правила выполнения схем электрических принципиальных для устройств общего назначения установлены ГОСТ 2.702-76 и стандартом предприятия [1]. Пример выполнения схемы принципиальной электрической показан в прил. 7.

На схеме принципиальной электрической изображаются все электрические элементы, необходимые для осуществления и контроля в изделии за заданными электрическими процессами, и неэлектрические связи между ними, а также электрические элементы (разъемы, зажимы и т.д.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи. Схемы вычерчивают для изделий, находящихся в отключенном положении. Элементы на схеме изображают в виде условных графических обозначений, установленных ГОСТ 2.747-68 и 2.730-73 и показанных в прил. 8. Допускается все обозначения пропорционально увеличивать или уменьшать. При этом расстояние между двумя соседними линиями условного графического обозначения должно быть не менее 0,8 мм. Толщина линий всех графических условных обозначений элементов выбирается равной толщине линии электрической связи. Условные графические обозначения элементов вычерчивают на схеме либо в положении, в котором они изображены в соответствующих стандартах, либо повернутыми на угол, кратный 90° по отношению к этому положению. Расположение условных графических обозначений элементов на схеме должно определяться удобством чтения схемы, а также необходимостью изображения связей между элементами кратчайшими линиями при минимальном количестве пересечений. Линии связи должны быть показаны, как правило, полностью. Допускается обрывать линии связи удаленных друг от друга элементов, если графическое изображение связей затрудняет чтение схе-

мы. Обрыв линий заканчивается стрелками с обозначением места подключения. Толщина линий электрической связи на схемах должна быть от 0,2 до 0,6 мм в зависимости от форматов схемы и размеров графических обозначений. Каждый элемент, входящий в изделие и изображенный на схеме, должен иметь буквенно-цифровое обозначение, составленное из буквенного обозначения и порядкового номера, проставленного после буквенного обозначения.

Порядковые номера элементам следует присваивать начиная с единицы в пределах группы элементов, которым на схеме присвоено одинаковое буквенное позиционное обозначение, например, R1, R2, R3 и т.д., затем С1, С2, С3 и т.д. Цифры порядковых номеров и их буквенные позиционные обозначения следует выполнять одним размером шрифта. Позиционные обозначения проставляют на схеме рядом с условным графическим обозначением элементов по возможности с правой стороны или над ним. Порядковые номера должны быть присвоены в соответствии с последовательностью расположения элементов на схеме, считая, как правило, сверху вниз в направлении слева направо.

Перечень элементов, входящих в схему, выполняют на формате А4 в виде приложения в составе расчетно-пояснительной записки. Основную надпись без дополнительных граф к ней выполняют по ГОСТ 2.104-68. Пример выполнения перечня элементов показан в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Пример выполнения перечня элементов

№ п.п.	Наименование	Количество	Примечание
	<u>Резисторы</u>		
R1, R4	МЛТ 0,125-510 Ом ± 10% ГОСТ 7113-77	2	
R3	С5-56 5 Вт 0,68 Ом ± 5% ОЖО467543 ТУ	1	
	<u>Конденсаторы</u>		
С1	МБМ-250-1-ДОЖО 462-032 ТУ	1	и т.д.

Запись элементов начинают с соответствующего заголовка, который записывают в графе «Наименование» и подчеркивают.

При указании около условных графических обозначений номиналов резисторов и конденсаторов допускается применять упрощенный способ обозначения единиц измерений для резисторов:

- от 0 до 999 Ом – без указания единиц измерения;
- от $1 \cdot 10^3$ до $999 \cdot 10^3$ Ом – в килоомах с обозначением единицы измерения строчной буквой к;

- от $1 \cdot 10^6$ до $999 \cdot 10^6$ Ом – в мегаомах с обозначением единицы измерения строчной буквой М;
- свыше $1 \cdot 10^9$ Ом – в гигаомах с обозначением единицы измерения прописной буквой Г.

Аналогично выполняются обозначения для конденсаторов:

- от 0 до $9999 \cdot 10^{-12}$ Ф – в пикофарадах без указания единицы измерения;
- от $1 \cdot 10^{-8}$ до $9999 \cdot 10^{-6}$ Ф – в микрофарадах с обозначением единицы измерения строчными буквами мк.

Если в состав изделия входят только несколько одинаковых устройств, не имеющих самостоятельных принципиальных схем, то на схеме изделия допускается не повторять схемы этих устройств, а изображать их в виде прямоугольников. Схема такого устройства изображается внутри одного из прямоугольников. При этом элементам присваиваются обозначения в пределах каждого устройства.

Если на схеме изображены элементы, параметры которых должны быть уточнены подбором при регулировке, то около позиционных обозначений таких элементов на схеме и в перечне элементов проставляют звездочки, например $R1^*$, а на поле схемы помещают строку «Подбирают при регулировке».

3.4.2. Формализация требований стандартов ЕСКД на правила выполнения схем

Схемная документация занимает значительное место в комплекте конструкторских документов. В нее входят различные виды и типы схем, регламентируемые ГОСТ 2.701-84.

Правила разработки и оформления схемных документов определены стандартами ЕСКД. Стандарты ЕСКД устанавливают, кроме того, основной состав условных графических обозначений в схемах.

Условные графические обозначения – это средство передачи информации о функции и строении схем. С их помощью передается информация о функциональных свойствах элементов и устройств.

Для обеспечения единообразия условных графических обозначений, а также для простоты их построения следует применять основные фигуры А и В. Под основной фигурой понимается такая геометрическая форма, которая с помощью вспомогательных элементов делает возможным определение пропорций графических символов и представляет собой сетку линий, содержащую простые геометрические элементы. Простые геометрические элементы основной фигуры: квадраты, окружности, треугольники, прямые линии – должны быть связаны между собой не только геометрически, но и математическими соотношениями. Условные графические обозначения выполняют с помощью основной фигуры таким образом, чтобы было возможно применение простых геометрических элементов.

Для создания форм конкретных условных графических обозначений используются простые геометрические элементы в целом или их отдельные части. В случае необходимости можно использовать диагонали основного квадрата. Основную фигуру можно поворачивать на 90° . Размер условного графического обозначения определяется модулем основной фигуры. В качестве модуля принимается длина стороны основного квадрата. Модуль основной фигуры выбирают из ряда 3,5; 5; 7; 10; 14; 20; 28; 40. Этим обеспечивается согласование условных обозначений с размером шрифта.

При построении условного графического обозначения на базе основной фигуры следует применять:

- горизонтальную и вертикальную сплошные линии и геометрические элементы, из которых составлена основная фигура;
- прямые линии, которые связывают точки пересечения линий основной фигуры, имеющие наклон 15° (или кратный 15°) по отношению к горизонтали или вертикали;
- прямоугольники;
- правильные многоугольники;
- окружности.

Основная фигура А показана на рис. 3.3. Модуль основного квадрата составляет 4 части.

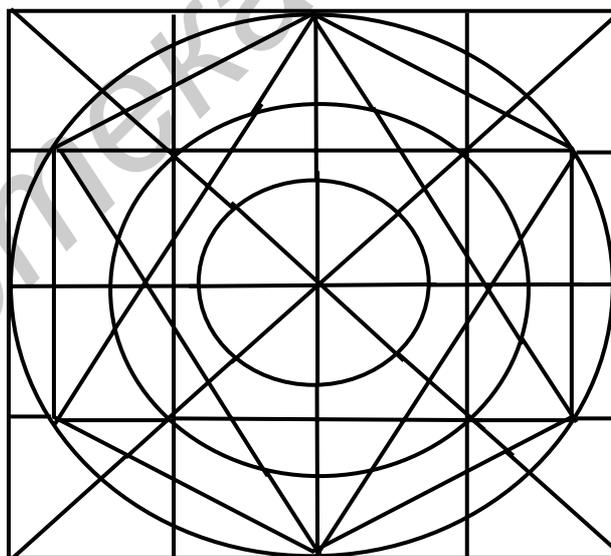


Рис.3.3. Основная фигура А

Основная фигура В показана на рис. 3.4. Если при разработке условного графического обозначения недостаточно простых геометрических элементов основной фигуры, выполненных сплошной линией, используют дополнительные элементы, выполненные пунктирной линией внутри или вне основного квадрата. Она применяется, например, для обозначения конденсатора, пьезоэлектрического элемента, громкоговорителя, кинескопа и т.д.

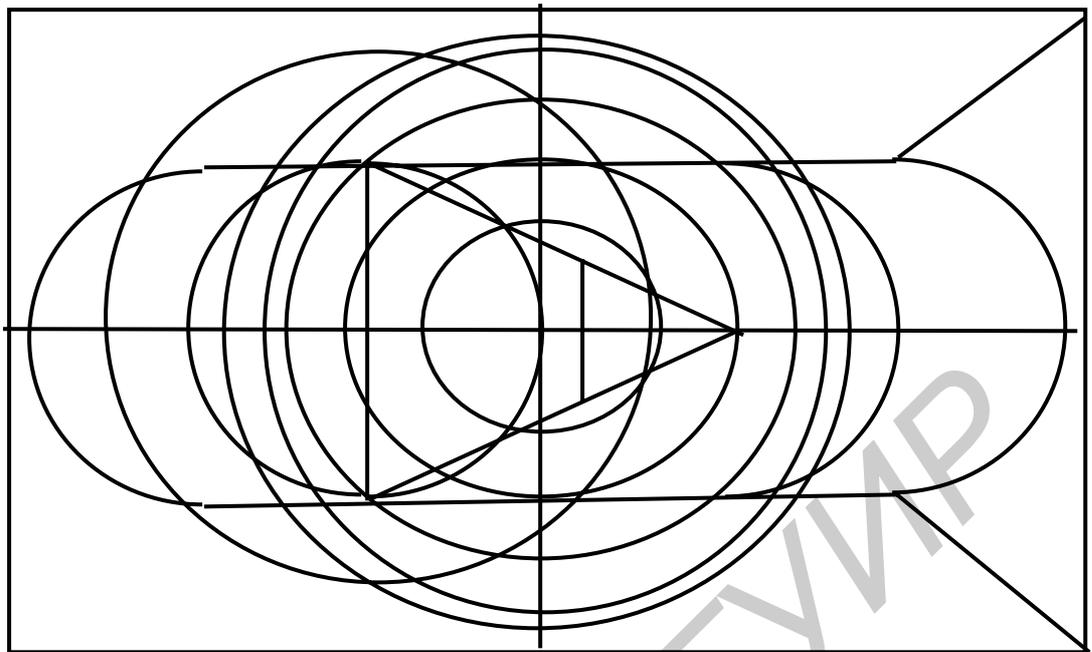


Рис. 3.4. Основная фигура В

Модуль основного квадрата фигуры В составляет 10 частей. Размер модуля в миллиметрах выбирают из того же ряда, что и модуль основного квадрата фигуры А, кроме значения 3,5.

При ручном выполнении условного графического обозначения допускается равнобедренный треугольник в основной фигуре заменить равносторонним треугольником с таким же основанием.

В основном прямоугольнике, равном 1×2 модуля, допускается длинную сторону увеличивать в любую сторону на целые числа, кратные 5, а также использовать прямоугольники со сторонами, равными 10×15 частей.

С целью рационального построения условного графического обозначения автоматизированным способом их начертание должно соответствовать требованиям автоматизированного проектирования, при этом отдельные элементы условного графического обозначения можно оформлять вручную.

3.4.3. Конструирование печатных плат и оформление чертежей на них

В разрабатываемом при выполнении курсового проекта устройстве рекомендуется использовать удобный, прогрессивный способ монтажа входящих в устройство элементов – печатный монтаж, основанный на применении печатных плат.

При разработке печатной платы и оформлении чертежа на нее необходимо руководствоваться требованиями ГОСТ 2.417-91. Термины, применяемые в проекте, и их определения должны соответствовать требованиям ГОСТ 20406-75, а обозначения чертежей печатных плат – ГОСТ 2.201-80. Чертежи односторонней и двусторонней печатных плат должны иметь наименование «Плата», а

многослойной печатной платы – «Плата. Сборочный чертеж». Изображение каждого слоя многослойной печатной платы размещают на отдельных листах сборочного чертежа. Материалы печатных слоев следует записывать в спецификацию в раздел «Материалы» с указанием размера слоя и количества слоев.

Чертежи однотипных печатных плат предпочтительно выполнять по ГОСТ 2.113-75 с учетом требований ГОСТ 2.417-91.

Размеры на чертеже печатной платы указываются одним из следующих способов:

- в соответствии с требованиями ГОСТ 2.307–68;
- нанесением координатной сетки в прямоугольной системе координат;
- нанесением координатной сетки в полярной системе координат;
- комбинированным способом при помощи размерных и выносных линий и координатной сетки в прямоугольной или полярной системе координат;
- в виде таблицы координат элементов проводящего рисунка (проводников, контактных площадок и т.п.).

Для изготовления печатных плат рекомендуется применять гетинакс фольгированный марки ГФ-I-II или стеклотекстолит СФ-I (ГОСТ 10316-62) толщиной $0,5 \pm 0,05$ мм, $1,0 \pm 0,2$ мм или $1,5 \pm 0,2$ мм. Исходным параметром при конструировании печатных плат является шаг координатной сетки. Стандарт ГОСТ 10317-79 предусматривает применение прямоугольных координатных сеток с основным шагом 2,5 мм. При использовании шага координатной сетки менее основного следует применять шаг, равный 1,25; 0,625 мм. Шаг 0,5 мм применять не рекомендуется. Шаги координатной сетки 0,625 и 0,5 мм не распространяются на присоединительные размеры любых навесных элементов, устанавливаемых на печатные платы. При компоновке печатной платы стремятся достигнуть максимального заполнения ее поверхности навесными элементами и разместить эти элементы так, чтобы обеспечить между ними кратчайшие связи, выполненные печатными проводниками. Стандарт не ограничивает типоразмеры печатных плат, но, как правило, размер каждой стороны печатной платы должен быть кратным: 2,5 при длине 100 мм, 5 при длине 350 мм, 10 при длине более 350 мм. Конфигурацию плат, отличную от прямоугольной, следует выбирать только при крайней необходимости.

Максимальный размер любой из сторон должен быть не более 470 мм, а соотношение сторон печатной платы – не более 3:1. Допуски на линейные размеры сторон выбираются согласно ГОСТ 25346-89 и 25347-82.

Шаг координатной сетки в полярной системе координат задают по углу и диаметру и назначают в зависимости от расположения элементов печатной платы.

За начало отсчета в прямоугольной системе координат на главном виде печатной платы принимают:

- центр крайнего левого или правого нижнего отверстия;
- левый или правый нижний угол печатной платы;
- левую или правую нижнюю точку, образованную линиями построения.

Для круглых печатных плат за начало отсчета в прямоугольной системе координат принимается центр печатной платы или точка, образованная линиями пересечения двух касательных к окружности.

Если размеры и конфигурация рисунка печатной платы оговорены в технических требованиях чертежа, допускается элементы печатных плат изображать условно.

Чертеж печатной платы с повторяющимися элементами допускается изображать не полностью с указанием закономерности расположения таких элементов. Допускается давать дополнительный вид, на котором рисунок печатной платы изображается частично, для нанесения размеров, обозначения шероховатостей, сопровождая его надписью, как, например, «Проводники не показаны».

Круглые контактные площадки с отверстиями, в том числе имеющие зенковку, и контактные площадки произвольной формы, не обозначенные размерами, изображают на чертеже одной окружностью. Допускается контактные площадки изображать на чертеже условно в виде квадрата, прямоугольника, многоугольника и т.п. Размеры и форму контактных площадок указывают в технических требованиях чертежа.

Отверстия, близкие по диаметру, изображают окружностью одного диаметра с обязательным указанием условного обозначения диаметра отверстия в соответствии с ГОСТ 2.307-68.

Размеры и конфигурацию крепежных, конструктивных, технологических отверстий следует выбирать по ГОСТ 11284-75. Допускается по ГОСТ 10317-79 использование диаметров монтажных и переходных металлизированных и неметаллизированных отверстий из ряда: 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0; 2,1; 2,2; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 3,0 мм.

Диаметр отверстия, его условное обозначение, диаметр контактной площадки, наличие металлизации, количество отверстий следует объединять в таблицу.

Проводники на чертеже обозначаются одной линией, являющейся осью симметрии проводника, с указанием на чертеже ширины проводника.

Проводники шириной 2,5 мм и более изображаются двумя линиями. Если они совпадают с линиями координатной сетки, то ширина проводника на чертеже не указывается.

Допускается отдельные элементы рисунка печатной платы (проводники, экраны, изоляционные участки и т.п.) выделять на чертеже штриховкой, зачернением, растриванием и т.п.

На изображении печатной платы допускается наносить надписи, знаки, которые могут отсутствовать на изделиях, о чем делается запись в технических требованиях чертежа.

Если на изображении печатной платы частично отсутствует информация об отдельных элементах этой платы, то в технических требованиях чертежа должна быть ссылка на документ, содержащий отсутствующую информацию.

Технические требования располагают на чертеже печатной платы в соответствии с ГОСТ 2.316-68. Для печатных плат допускается оформлять техниче-

ские требования отдельным документом с названием «Технические требования» и кодом документа «Д...», на который должна быть ссылка в технических требованиях чертежа.

В технических требованиях чертежа допускается давать пояснения о взаимодействии элементов.

Маркировку печатных плат располагают на чертеже с одной или с двух сторон.

Все центры монтажных, переходных и крепежных отверстий располагают в узлах координатной сетки. Отверстия диаметром 0,8, 1,3, и 2,0 мм являются предпочтительными. Расстояние между внешним контуром платы и краем отверстия должно быть не менее толщины платы. Проводники располагают по координатной сетке или под углом 45° к ней. Размеры контактных площадок вокруг отверстий рекомендуется выбирать из приведенных ниже.

Диаметр отверстия, мм ...	0,6	0,8	1,0	1,3	1,6	2,0
Диаметр площадки, мм ...	1,8	2,3	2,5	2,8	3,1	3,5

Как правило, расстояние между отверстиями выдерживают с допуском $\pm 0,2$ мм в узких местах и $\pm 0,5$ мм в свободных местах платы. Ширина печатных проводников определяется следующими основными параметрами:

- допустимой токовой нагрузкой;
- допустимой температурой нагрева платы;
- толщиной печатных проводников;
- разрешающей способностью технологического процесса изготовления плат.

Обычно при размере платы 120×180 мм² ширина проводников составляет 0,2–0,4 мм, а при размерах 240×360 мм² – 0,5–0,8 мм. При выборе минимально допустимых зазоров между проводниками рекомендуется руководствоваться следующими данными.

Напряжение между проводниками, В	0-50	51-150	151-300	301-500
Минимальный зазор, мм	0,38	0,56	0,76	1,6

Конфигурацию проводников и контактных площадок в свободных местах выдерживают по координатной сетке с отклонением ± 2 , $\pm 1,5$, $\pm 1,0$, $\pm 0,5$ мм в зависимости от сложности и насыщенности монтажа.

На каждой сетке предусматривают не менее двух технологических отверстий диаметром не менее 1,3 мм, расположенных в узлах координатной сетки по углам платы, которые в дальнейшем могут быть использованы для крепления платы к кожуху устройства.

В настоящее время печатные платы в промышленности изготавливаются двумя методами: методом травления фольги (химическим) и методом химического и гальванического осаждения (электрохимическим). Применяется также комбинированный метод. При этом для формирования рисунка используются маски, полученные либо сеткографическим способом, либо фотоспособом.

Чертеж печатной платы выполняют согласно требованиям ГОСТ 2.217-68 в масштабе 1:1, 2:1, 4:1, 5:1, 10:1. Размеры печатных проводников контактных площадок и отверстий на чертеже указывают при помощи размерных и вынос-

ных линий либо нанесением координат на сетки. Допускается комбинированный способ указания размеров, а при выполнении курсовых проектов рекомендуется применение координатной сетки.

Проводники, ширина которых на чертеже менее 2 мм, изображают сплошной линией. Допускается изображать сплошной утолщенной линией проводники шириной на чертеже 2 мм и более, если их действительная ширина оговорена в технических требованиях.

Контактные площадки, примыкающие к проводникам, изображенным сплошной утолщенной линией, не штрихуют.

Монтажные и контактные отверстия, в том числе имеющие зенковку, изображают одной окружностью. Второй концентрической окружностью изображают контактные площадки круглой формы, а также площадки, форма которых не задана чертежом и определяется при изготовлении печатной платы. В последнем случае размеры окружности соответствуют минимальным размерам контактной площадки.

Промежуток между ними не штрихуют, если расстояние между линиями на изображении менее 2 мм.

Обозначение материала основания платы указывают в графе 3 основной надписи чертежа.

Технические требования на чертежах печатных плат излагают, группируя однородные и близкие по характеру требования в такой последовательности:

- способ изготовления платы;
- обозначение материала токопроводящего слоя или изоляционных участков и толщины слоя;
- шаг координатной сетки.

За начало координат принимают центр крайнего левого нижнего отверстия, в том числе и технологического.

Допускается за начало координат принимать левый нижний угол платы или точку, образованную линиями построения.

Координатную сетку наносят сплошными тонкими линиями. Если частота линий сетки велика, то рекомендуется выделять каждую пятую или десятую линии, увеличивая их толщину до 0,5 толщины контурных линий.

Чтобы разрядить сетку, допускается наносить линии через одну, при этом в технических требованиях помещают соответствующее указание, например, «Линии сетки условно нанесены через одну». Координаты монтажных и контактных отверстий задают следующими способами:

- указанием размеров координат в миллиметрах;
- нумерацией отверстий с занесением размеров их координат по осям x и y в миллиметрах в таблицу;
- нумерацией линий координатной сетки.

Пример выполнения чертежа печатной платы с навесными деталями приведен в прил. 9.

ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Кафедра электроники

«К защите допускаю»

Руководитель проекта _____

« _____ » _____ 2004 г

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовому проекту по курсу
«Основы радиоэлектроники и схемотехники» на тему

« _____
_____ »

Студент _____
(№ учебной группы)

(фамилия)

(имя, отчество)

Руководитель проекта

(должность, фамилия, инициалы)

Минск 2004 г.

РЯДЫ НОМИНАЛЬНЫХ ЕМКОСТЕЙ И РЕЗИСТОРОВ ПО ГОСТ 28884-90

Величины номинальных емкостей и резисторов в зависимости от назначения и конструктивных особенностей должны выбираться по одному из указанных ниже рядов. Конкретно величины емкостей резисторов устанавливаются в стандартных или технических условиях на отдельные типы конденсаторов и резисторов.

1. Величины номинальных емкостей электролитических алюминиевых конденсаторов должны выбираться из ряда: 0,5; 1; 2; 4; 5; 10; 20; 30; 50; 100; 200; 300; 500; 1000; 2000; 5000.

2. Величины номинальных емкостей (от 0,1 мкФ и выше) конденсаторов с бумажным и пленочным диэлектриком в прямоугольных корпусах должны выбираться из ряда: 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 10; 20; 40; 60; 100; 200; 400; 600; 800; 1000.

3. Величины номинальных емкостей конденсаторов и резисторов с допустимым отклонением $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ и более (за исключением конденсаторов, указанных в пп.1 и 2) должны соответствовать числам, приведенным ниже в обозначении рядов E24 и E6, и числам, полученным путем умножения этих чисел на 10.

4. Обозначение рядов:

E24 (допустимое отклонение $\pm 5\%$) – 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1.

E6 (допустимое отклонение $\pm 20\%$) – 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8.

Прил. 2 используется для выбора номинальных величин конденсаторов и резисторов после их расчета.

Например, в результате расчета величины коллекторного сопротивления получается, что $R_K = 1396$ Ом. Но в техническую документацию на проектируемое изделие должно быть внесено значение этого сопротивления, выбранное в соответствии с требованиями ряда E24 или E6, т.е. либо $R_K = 1,3$ кОм, либо $R_K = 1,5$ кОм. Выбор того или иного значения сопротивления решается инженером, который разрабатывает это устройство.

Аналогично решается вопрос и с выбором нужных величин емкости конденсатора для внесения их в техническую документацию по результатам электрического расчета. Например, в результате расчета получается значение емкости конденсатора колебательного контура передатчика $C = 4500$ пФ. Это значит, что в техническую документацию должно быть внесено значение $C = 4300$ пФ или $C = 4700$ пФ. Если же нужно именно значение емкости $C = 4500$ пФ, тогда оно набирается из двух, трех и более номинальных величин, регламентируемых ГОСТ 2884-90.

**ТАБЛИЦА БУКВЕННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН
(ПО ГОСТ 1494-77 И 15808-70)**

НАИМЕНОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ	Обозначение	
	Основное	Запасное
1	2	3
Амплитуда	A	
Восприимчивость диэлектрическая	K_{ϵ}	
Восприимчивость магнитная	K_M	
Время	t	τ
Длина волны	λ	
Добротность	Q	
Емкость электрическая	C	
Индуктивность	L	
Индуктивность взаимная	M	
Индукция магнитная	B	
Количество электричества	Q	
Коэффициент модуляции	m	
Коэффициент распространения	γ	
Коэффициент связи	K	
Коэффициент полезного действия	η	
Коэффициент затухания	α	
Коэффициент – волновое число	β	
Крутизна	S	
Мощность электрическая активная	P	
Мощность электрическая реактивная	Q	
Напряжение электрическое	U	
Напряженность магнитного поля	H	
Напряженность электрического поля	E	
Период	T	
Постоянная распространения волны	ν	
Постоянная времени электрической цепи	τ	T
Постоянная магнитная	μ_0	
Постоянная электрическая	ϵ_0	
Поток магнитный	Φ	
Потокоцепление	Ψ	
Проводимость удельная электрическая	σ	
Проводимость электрической цепи активная	ρ	

1	2	3
Проводимость электрической цепи комплексная	Y	
Проводимость электрической цепи реактивная	b	B
Проницаемость абсолютная диэлектрическая	ϵ_a	
Проницаемость абсолютная магнитная	μ_0	
Проницаемость диэлектрическая	ϵ	
Потенциал электрический	V	
Разность фаз напряжения и тока	φ	
Сопротивление волновое комплексное	Z_b	
Сопротивление характеристическое	Z_c	
Сопротивление электрической цепи, активное	r	R
Сопротивление электрической цепи, реактивное	x	X
Сопротивление электрической цепи, комплексное	Z	$Z = r+jx$
Сопротивление электрической цепи, полное	z	
Сила тока	I	
Температура	t	t^0
Температура абсолютная	T	
Угол диэлектрических потерь	δ	
Частота	f	ν
Частота угловая	ω	Ω
Число витков обмотки	w	N
Число оборотов в минуту	n	
Энергия магнитного поля	W_M	
Энергия электрического поля	W_E	

**КРАТКИЙ ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СТАНДАРТОВ ЕСКД, КОТОРЫЕ
НУЖНО ПРОСМОТРЕТЬ ВСЕМ СТУДЕНТАМ, ВЫПОЛНЯЮЩИМ
КУРСОВОЙ ПРОЕКТ ПО КУРСУ
«ОСНОВЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И СХЕМОТЕХНИКИ»**

ГОСТ	Наименование стандарта
1	2
2.105–95 ЕСКД	Общие требования к текстовым документам
2.106–96 ЕСКД	Текстовые документы
2.109–73 ЕСКД	Основные требования к чертежам
2.301–68 ЕСКД	Форматы
2.302–68 ЕСКД	Масштабы
2.303–68 ЕСКД	Линии
2.304–81 ЕСКД	Шрифты чертежные
2.305–68 ЕСКД	Изображения, виды, разрезы, сечения
2.306–68 ЕСКД	Обозначения графические материалов и правила их нанесения на чертежах
2.307–68 ЕСКД	Нанесение размеров и предельных отклонений
2.309–68 ЕСКД	Правила нанесения на чертежах надписей, технических требований и таблиц
2.413–72 ЕСКД	Правила выполнения конструкторской документации изделий, изготовленных с применением электрического монтажа
2.414–75 ЕСКД	Правила выполнения чертежей жгутов, кабелей и проводов
2.415–68 ЕСКД	Правила выполнения чертежей изделий с электрическими обмотками
2.416–68 ЕСКД	Условные изображения сердечников магнитопроводов
2.417–91 ЕСКД	Правила выполнения чертежей печатных плат
2.701–84 ЕСКД	Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению
2.702–75 ЕСКД	Правила выполнения электрических схем
2.705–70 ЕСКД	Правила выполнения обмоток и изделий с обмотками
2.708–81 ЕСКД	Правила выполнения электрических схем цифровой техники
2.721–74 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения
2.723–68 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители

1	2
2.725–68 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Устройства коммутирующие
2.727–68 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Разрядники. Предохранители
2.728–74 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы
2.729–68 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Приборы электроизмерительные
2.730–73 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые
2.731–81 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Приборы электровакуумные
2.736–68 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Элементы пьезоэлектрические и магнитострикционные. Линии задержки
2.737–68 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Устройства связи
2.741–68 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Акустические приборы
2.743–91 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Элементы цифровой техники
2.745–91 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Электронагреватели, устройства и установки электротермические
2.755–87 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения
2.758–81 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Сигнальная техника
2.759–82 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники
2.766–88 ЕСКД	Обозначения условные графические в схемах. Системы передачи информации с временным разделением каналов

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СЕБЕСТОИМОСТИ И ОТПУСКНОЙ ЦЕНЫ ИЗДЕЛИЯ

Статьи расходов, определяющие себестоимость и отпускную цену спроектированного изделия, можно свести в табл.П5.1.

Таблица П5.1

Статьи расходов, определяющие себестоимость и отпускную цену
спроектированного изделия

Номер графы	Статьи расходов	Сумма, р.
1	Основные материалы	
2	Покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты	
3	Основная заработная плата	
4	Дополнительная заработная плата (10%)	
5	Начисления на заработную плату (40%)	
6	Общепроизводственные расходы (160-180%)	
7	Общехозяйственные расходы (200-220%)	
Производственная себестоимость		
8	Коммерческие расходы (3% от производственной себестоимости)	
Полная себестоимость		
9	Плановая прибыль (15% от полной себестоимости)	
Оптовая цена		
10	Отчисления в местный бюджет (2,5% от оптовой цены)	
11	Отчисления в республиканский бюджет (2% от суммы: оптовая цена + отчисления в местный бюджет)	
12	Налог на добавленную стоимость (20% от суммы: оптовая цена + отчисления в местный бюджет + отчисления в республиканский бюджет)	

Отпускная цена отрасли

Расчет стоимости основных материалов производится с помощью табл. П5.2.

Содержание граф 1-2 табл. П5.1 определяется по спецификации деталей. В графе 5 указывается цена в соответствии с действующими прейскурантами. Сумма в графе 6 получается в результате умножения данных граф 4 и 5. К ито-

говой сумме графы 6 прибавляется 5-10% на транспортно-заготовительные расходы и вычитается стоимость реализуемых отходов в размере 1-2%.

Таблица П5.2

Расчет стоимости основных материалов

Наименование материала	Марка, профиль, сорт материала	Единица измерения	Норма расхода на одну деталь	Цена на единицу, р.	Сумма, р.	Обоснование цены (№ прейскуранта)
1	2	3	4	5	6	7

Расчет стоимости покупных изделий и полуфабрикатов осуществляется с помощью табл. П5.3

Таблица П5.3

Расчет стоимости покупных изделий и полуфабрикатов

Наименование изделий и полуфабрикатов	Тип изделий и полуфабрикатов	Количество	Цена за единицу, р.	Сумма, р.	Обоснование цены (№ прейскуранта)
1	2	3	4	5	6

Итого:

Транспортно-заготовительные расходы 2-6% от стоимости изделий добавляются к итоговой сумме, в результате чего получается:

Всего _____(р.)

Данные для граф 1, 2 и 3 берутся по спецификации деталей разрабатываемого изделия.

Зарплата производственных рабочих рассчитывается по видам работ, согласно табл. П5.4.

Таблица П5.4

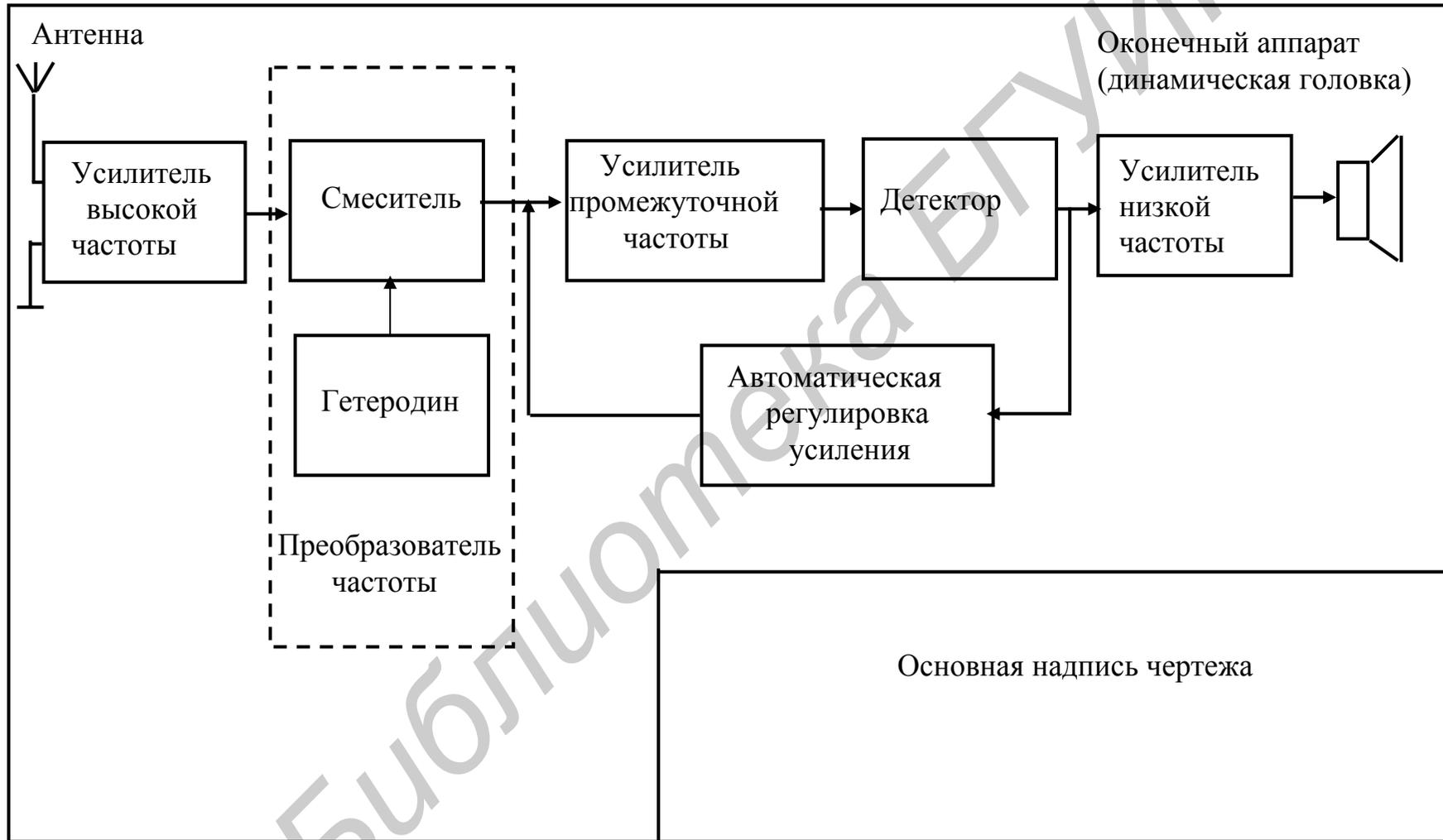
Заработная плата производственных рабочих

Виды работ	Разряд	Нормо-часы	Часовая ставка, р.	Заработная плата
Заготовительные	IV			
Штамповочные	IV			
Токарные	V			
Слесарно-механические	VI			
Фрезерные	V			
Сборочные	V			
Монтажные	VI			
Намоточные	V			
Отделочные	V			
Настройка и регулировка	VI			

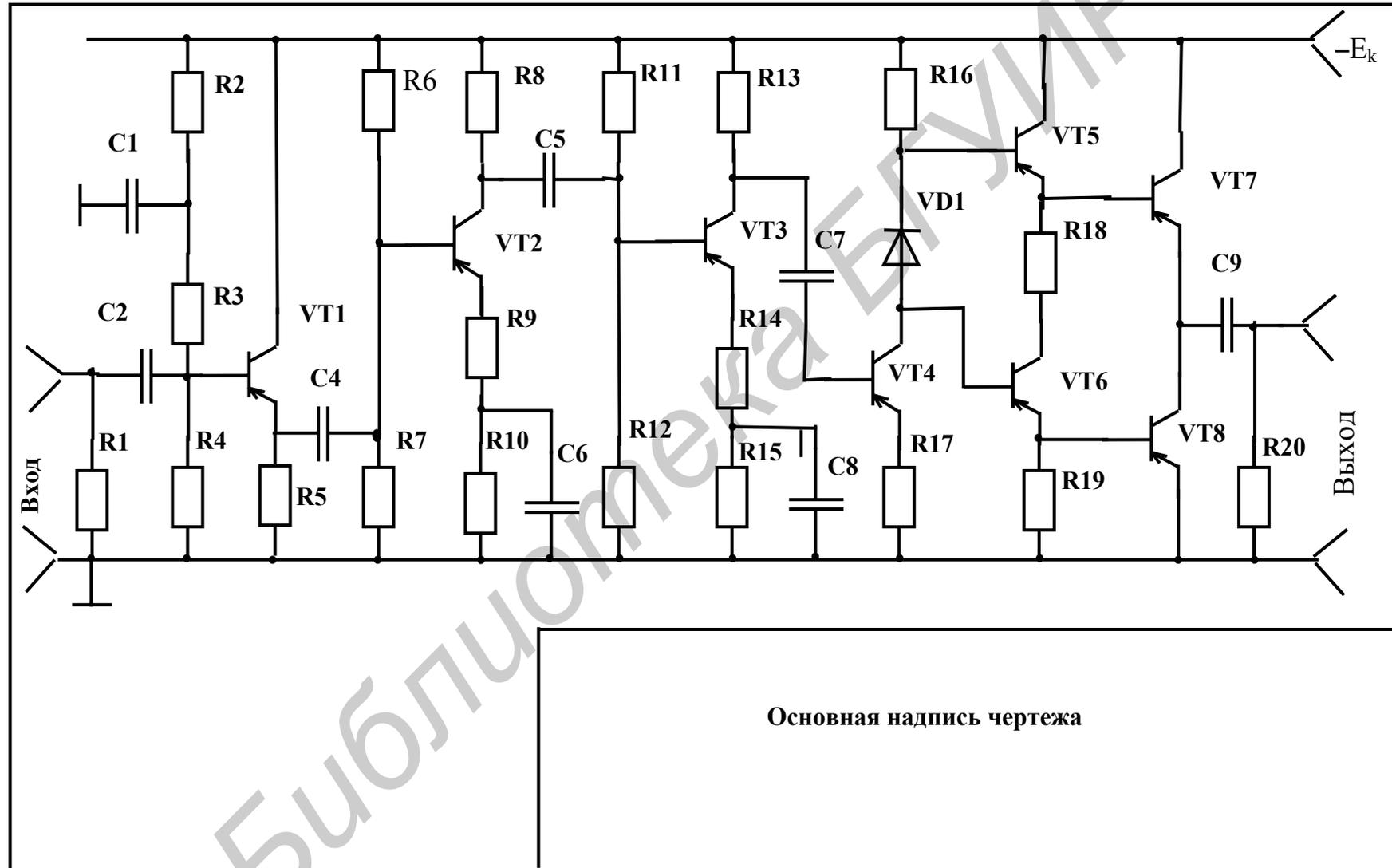
И т о г о: _____

Дополнительная заработная плата, общепроизводственные, общехозяйственные и коммерческие расходы берутся в виде процентной надбавки к основной заработной плате, начисления на заработную плату – основной и дополнительной заработных плат.

ПРИМЕР ВЫЧЕРЧИВАНИЯ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА



ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ СХЕМЫ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ



ОБОЗНАЧЕНИЯ УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ НА СХЕМАХ

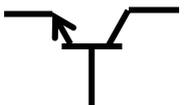
Примеры вычерчивания дискретных транзисторов

ГОСТ 2.730-73 устанавливает правила построения условных графических обозначений полупроводниковых приборов на схемах, выполняемых вручную или автоматическим способом, во всех отраслях промышленности.

Примеры построения обозначений транзисторов с р-п-переходами приведены в табл. П8.1.

Таблица П8.1

Вычерчивание дискретных транзисторов

Наименование	Обозначение
Транзистор типа р-п-р	
Транзистор типа n-р-n с коллектором, электрически соединенным с корпусом	
Транзистор лавинный типа n-р-n	
Транзистор однопереходный с n-базой	
Однопереходный транзистор с р-базой	
Многоэмиттерный транзистор n-р-n	

П р и м е ч а н и я. Для упрощения графиков схемы допускается:

1. Выполнять обозначения транзисторов в зеркальном изображении, например, изображать транзистор так, как это показано на рис.П8.1 или П8.2.



Рис.П8.1. Изображение транзистора

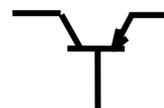


Рис.П8.2. Вычерчивание транзистора в зеркальном изображении

2. Выполнять обозначения с окружностью (или овалом). Например, можно вычерчивать транзистор либо так, как показано на рис. П8.3, либо так, как показано на рис. П8.4.



Рис.П8.3. Вычерчивание транзистора



Рис. П8.4. Вычерчивание транзистора без окружности

3. Проводить линию электрической связи от эмиттера или коллектора в одном из двух направлений – перпендикулярно или параллельно линии вывода базы.

Примеры построения обозначений полевых транзисторов приведены в табл. П8.2.

Таблица П8.2

Обозначения полевых транзисторов

Наименование	Обозначение
1	2
Транзистор полевой с каналом n-типа	
Транзистор полевой с каналом p-типа	
Транзистор полевой с изолированным затвором: обогащенного типа с p-каналом	
обогащенного типа с n-каналом	
обедненного типа с p-каналом	
обедненного типа с n-каналом	

1	2
Транзистор полевой с изолированным затвором обогащенного типа с р-каналом с выводом от подложки	
Транзистор полевой с изолированным затвором обогащенного типа с n-каналом с внутренним соединением истока и с выводом от подложки	
Транзистор полевой с двумя изолированными затворами обедненного типа с n-каналом и с выводом от подложки	

П р и м е ч а н и е. Допускается изображать корпус транзисторов окружностью.

2. Примеры вычерчивания полупроводниковых диодов и тиристоров

Примеры построения обозначений полупроводниковых диодов и тиристоров приведены в табл. П8.3.

Таблица П8.3

Вычерчивание полупроводниковых диодов и тиристоров

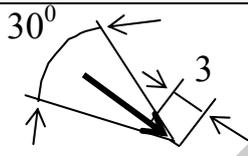
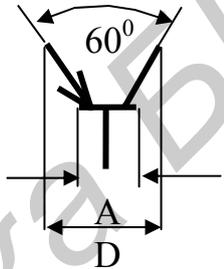
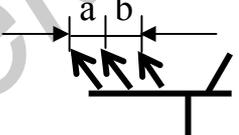
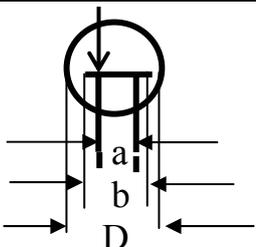
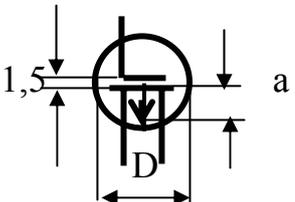
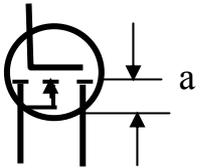
Наименование	Обозначение
Диод	
Диод туннельный	
Стабилитрон (диод лавинный выпрямительный): односторонний	
двусторонний	
Варикап	
Тиристор диодный, запираемый в обратном направлении	
Тиристор триодный, запираемый в обратном направлении, с управлением по аноду	
Тиристор триодный запираемый с управлением по катоду	
Диод Шоттки	

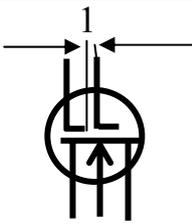
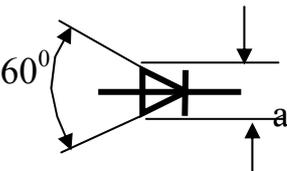
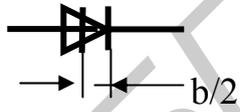
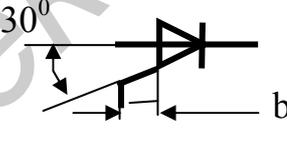
Геометрические формы изображений полупроводниковых приборов

Все геометрические элементы условных графических обозначений выполняются линиями той же толщины, что и линии электрической связи. Геометрические формы обозначений, их относительные и абсолютные размеры должны соответствовать приведенным в табл. П8.4.

Таблица П8.4

Формы изображений полупроводниковых приборов

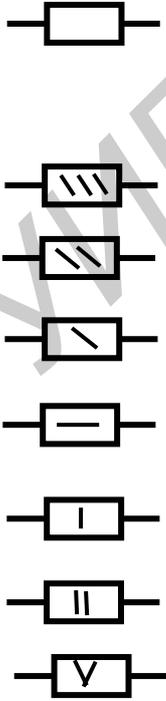
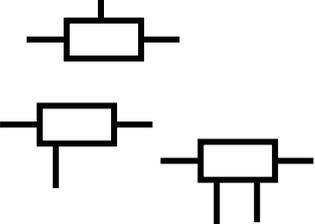
Наименование	Обозначение	Размеры												
1	2	3												
Эмиттер р-п-р-транзистора														
Транзистор типа р-п-р		<table border="1"> <tr> <td>D</td> <td>12</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>9</td> <td>11</td> </tr> <tr> <td>a</td> <td>2,5</td> <td>3,5</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> </table> <p>$A = 3D/4/$</p>	D	12	14	A	9	11	a	2,5	3,5	b	3	4
D	12	14												
A	9	11												
a	2,5	3,5												
b	3	4												
Транзистор многоэмиттерный типа п-р-п														
Транзистор полевой		<table border="1"> <tr> <td>D</td> <td>10</td> <td>12</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>a</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>7</td> <td>8</td> <td>9</td> </tr> </table>	D	10	12	14	a	5	6	7	B	7	8	9
D	10	12	14											
a	5	6	7											
B	7	8	9											
Транзистор полевой с изолированным затвором обедненного типа с р-каналом		<table border="1"> <tr> <td>D</td> <td>12</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>a</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> </table>	D	12	14	a	4	5						
D	12	14												
a	4	5												
Транзистор полевой с внутренним соединением истока и подложки (обогащенный тип п-канала)														

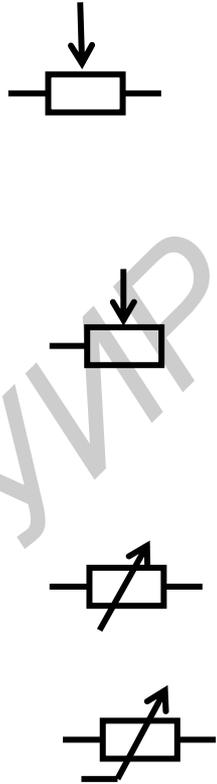
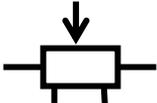
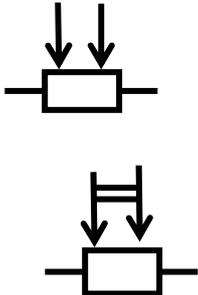
1	2	3									
Транзистор полевой с двумя изолированными затворами обедненного типа, с n-каналом и с выводом от подложки											
Диод		<table border="1" data-bbox="1129 577 1385 719"> <tr> <td>A</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>1,5</td> <td>2</td> </tr> </table>	A	5	6	b	4	5	d	1,5	2
A	5	6									
b	4	5									
d	1,5	2									
Динистор											
Диод туннельный											
Тиристор											

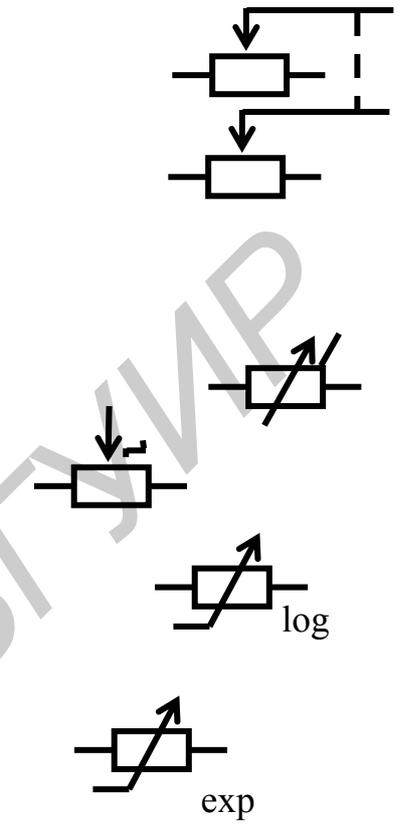
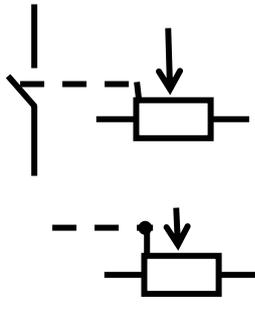
Графические изображения резисторов

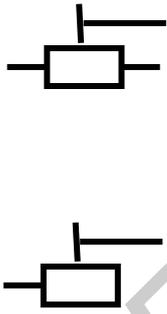
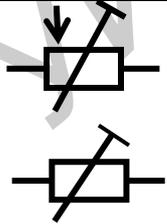
ГОСТ 2.728-74 устанавливает условные графические обозначения резисторов и конденсаторов на схемах, выполненных вручную или автоматизированным способом во всех отраслях промышленности. Обозначения резисторов общего применения приведены в табл. П8.5.

Графические изображения резисторов

Наименование	Обозначение
1	2
<p>Резистор постоянный</p> <p>Примечание. Если необходимо указать величину номинальной мощности рассеяния резисторов, то для диапазона от 0,05 до 5 Вт допускается использовать следующие обозначения резисторов, номинальная мощность которых равна, Вт:</p> <p>0,05</p> <p>0,125</p> <p>0,25</p> <p>0,5</p> <p>1,0</p> <p>2,0</p> <p>5,0</p>	
<p>Резистор постоянный с дополнительными отводами:</p> <p>а) с одним симметричным</p> <p>б) одним несимметричным</p> <p>в) с двумя отводами</p>	
<p>Шунт измерительный</p> <p>Примечание. Линии, изображенные на продолжении коротких сторон прямоугольника, обозначают выводы для включения в измерительную цепь</p>	

1	2
<p>Резистор переменный</p> <p>Примечания. 1. Стрелка обозначает подвижный контакт</p> <p>2. Неиспользуемый вывод допускается не изображать</p> <p>3. Для переменного резистора в реостатном включении допускается использовать следующие обозначения:</p> <p> общее обозначение</p> <p> нелинейного регулирования</p>	
<p>Резистор переменный с дополнительными отводами</p>	
<p>Резистор переменный с несколькими подвижными контактами, например, с двумя:</p> <p>а) механически не связанными</p> <p>б) механически связанными</p>	

1	2
<p>Резистор переменный сдвоенный</p> <p>Примечание. Если необходимо уточнить характер регулирования, то следует применять обозначения регулирования по ГОСТ 2.721-68, например, резистор переменный:</p> <p>с плавным регулированием</p> <p>со ступенчатым регулированием</p> <p>с логарифмической характеристикой регулировки</p> <p>с обратной логарифмической (экспоненциальной) модуляцией</p>	 <p>The diagram shows five schematic symbols for double potentiometers. The top two symbols represent smooth and stepped regulation, respectively, with dashed lines indicating the wiper's range. The middle symbol shows a logarithmic characteristic with a diagonal arrow and the label 'log'. The bottom symbol shows an exponential characteristic with a diagonal arrow and the label 'exp'.</p>
<p>Резистор переменный с замыкающим контактом, изображенный:</p> <p>совместно</p> <p>разнесенно</p> <p>Примечания: 1. Точка указывает положение подвижного контакта резистора, в котором происходит срабатывание замыкающего контакта. При этом замыкание происходит при движении от точки, а размыкание – при движении к точке. 2. При разнесенном способе замыкающий контакт следует изображать как контакт путевого выключателя по ГОСТ 2.725-73</p>	 <p>The diagram shows two schematic symbols for potentiometers with a closing contact. The top symbol shows the combined representation where the closing contact is integrated into the potentiometer symbol. The bottom symbol shows the separated representation where the closing contact is drawn as a separate switch contact.</p>

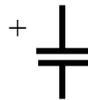
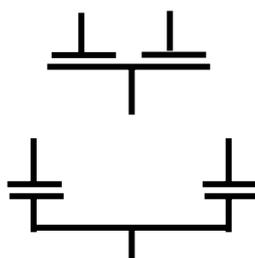
1	2
<p>Резистор подстроечный</p> <p>Примечания. 1. Неиспользуемый вывод допускается не изображать.</p> <p>2. Для подстроечного резистора в реостатном включении допускается использовать следующее обозначение</p>	
<p>Резистор переменный с подстройкой</p> <p>Примечание. Приведенному обозначению соответствует следующая эквивалентная схема</p>	

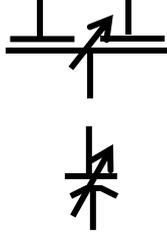
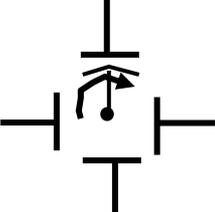
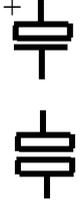
Графические изображения конденсаторов

Обозначения конденсаторов приведены в табл. П8.6.

Таблица П8.6

Графические изображения конденсаторов

Наименование	Обозначение
1	2
Конденсатор постоянной емкости	
Конденсатор электрический полярный	
<p>Конденсатор постоянной емкости с тремя выводами (двухсекционный), изображенный:</p> <p>совмещенно</p> <p>разнесенно</p>	

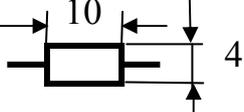
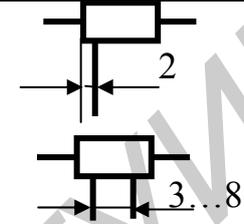
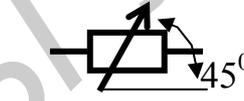
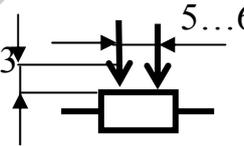
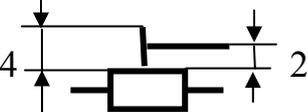
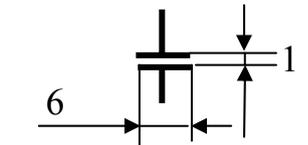
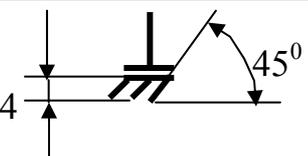
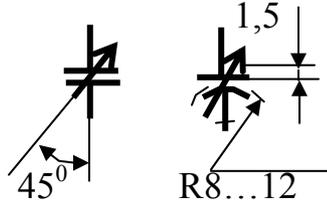
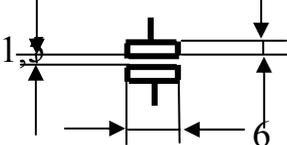
1	2
Конденсатор проходной П р и м е ч а н и е. Дуга обозначает наружную обкладку конденсатора (корпус)	
Конденсатор опорный. Нижняя обкладка соединена с корпусом (шасси) прибора	
Конденсатор переменной емкости	
Конденсатор переменной емкости многосекционный, например трехсекционный	
Конденсатор дифференциальный П р и м е ч а н и е. Если в каком-либо из вышеприведенных конденсаторов необходимо указать подвижную обкладку (ротор), то ее следует изображать в виде дуги, например следующим образом	
Фазовращатель емкостный	
Конденсатор подстроечный	
Конденсатор электролитический: поляризованный неполяризованный	

Геометрические формы изображений резисторов и конденсаторов

Размеры условных графических изображений резисторов и конденсаторов приведены в табл. П8.7.

Таблица П8.7

Геометрические формы изображений резисторов и конденсаторов

Наименование	Обозначение
Резистор постоянный	
Резистор постоянный с дополнительными отводами: с одним с двумя	
Резистор переменный	
Резистор переменный с двумя подвижными контактами	
Резистор подстроечный	
Конденсатор постоянной емкости	
Конденсатор опорный	
Конденсатор переменной емкости	
Конденсатор электролитический	

**Обозначения условные графические в схемах
катушек индуктивности, дросселей и трансформаторов**

ГОСТ 2.273-68 устанавливает условные графические обозначения в схемах катушек индуктивности, дросселей и трансформаторов. Примеры их построения показаны в табл. П8.8.

Таблица П8.8

Обозначения условные катушек индуктивностей

Наименование 1	Обозначение 2
Катушка индуктивности, дроссель без магнитопровода	
Катушка индуктивная с отводами	
Катушка индуктивности со скользящими контактами, например двумя	
Катушка индуктивности с магнитоэлектрическим магнитопроводом	
Катушка индуктивности, подстраиваемая магнитоэлектрическим магнитопроводом	
Катушка индуктивности, подстраиваемая немагнитным магнитопроводом, например медным	
Трансформатор с магнитоэлектрическим магнитопроводом	
Трансформатор, подстраиваемый общим магнитоэлектрическим магнитопроводом	

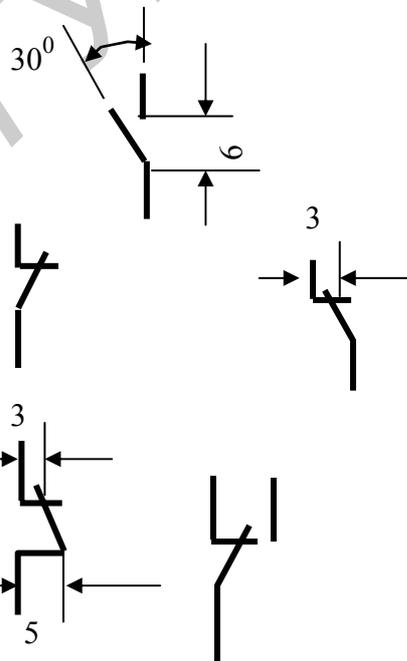
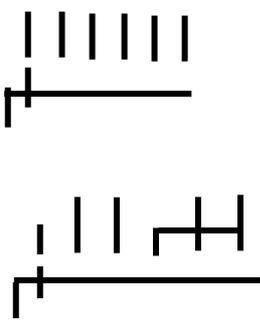
1	2
Дроссель с ферромагнитным магнитопроводом	

**Обозначения условные графические
в схемах коммутационных устройств**

ГОСТ 2.755-74 устанавливает условные графические обозначения в схемах коммутационных устройств и контактных соединений, примеры построения которых приведены в табл. П8.9.

Таблица П8.9

Обозначения условные графические коммутационных устройств

Наименование	Обозначение
<p>Контакт коммутационного устройства Общее обозначение:</p> <p>закрывающий</p> <p>размыкающий</p> <p>переключающий</p>	
<p>Переключатель однополюсный многопозиционный, например 6-позиционный</p> <p><i>Примечание.</i> Позиции переключателя, в которых отсутствуют коммутируемые цепи, или позиции, соединенные между собой, обозначаются короткими штрихами, например 6-позиционный переключатель, не коммутирующий электрическую цепь первой позиции и коммутирующий одну и ту же цепь в 4- и 6-й позициях</p>	

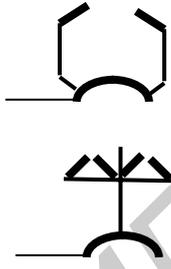
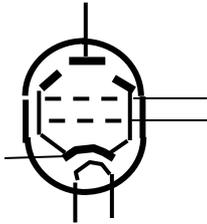
Обозначения условные графические приборов электровакуумных

Термины и определения, обозначаемые этими терминами, в области электровакуумных приборов устанавливает ГОСТ 13820–77, систему обозначений электровакуумных и ионных приборов определяет ГОСТ 13393–76, а электронных приборов СВЧ – ГОСТ 137806–68. Обозначения условные графические электровакуумных приборов, согласно ГОСТ 2.731, состояются из обозначений их элементов. Примеры выполнения элементов электровакуумных приборов приведены в табл. П8.10.

Таблица П8.10

Обозначения условные графические приборов электровакуумных

Наименование 1	Обозначение 2
Баллон электронного прибора	
Анод электронной лампы и ионного прибора	
Катод прямого накала, подогреватель	
Катод косвенного накала (изображен без подогревателя)	
Электрод управляющий (изображен без подогревателя)	

1	2
Пластины лучеобразующие лампы: одноанодной комбинированной	
Диоды – электронные лампы с двумя электродами: катодом и анодом	
Тетрод – многоэлектродная лампа, имеющая ка- тод, анод и две сетки	

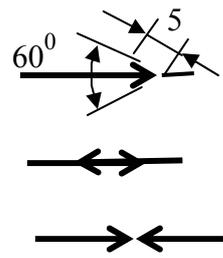
Обозначения условные графические широкого применения

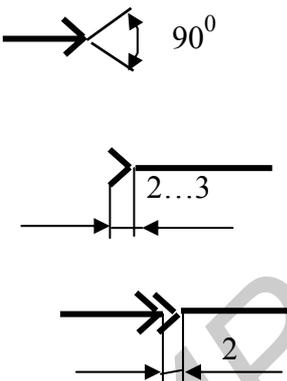
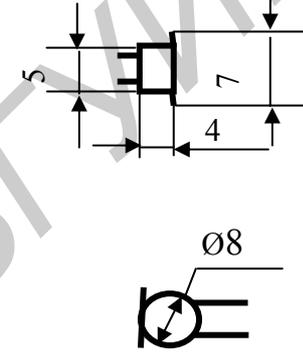
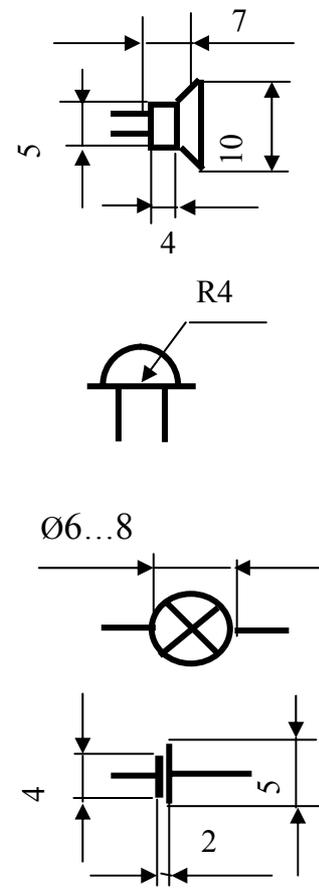
Условные графические обозначения элементов вычерчивают на схеме таких же размеров и линиями той же толщины, как и на изображениях в стандартах ЕСКД. Все обозначения допускается пропорционально увеличивать.

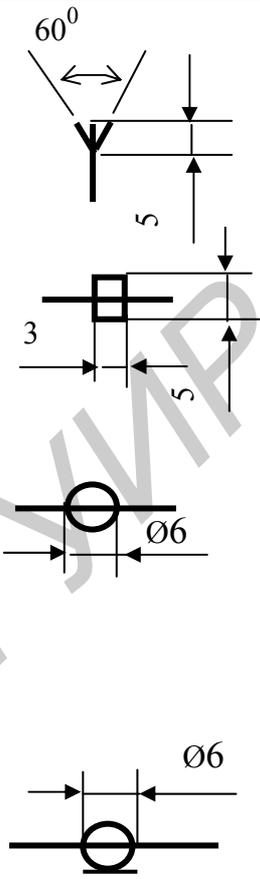
Обозначения условные графические широкого применения приведены в табл. П8.11.

Таблица П8.11

Обозначения условные графические широкого применения

Наименование	Обозначения
1	2
Передача тока, сигнала потока энергии в направлении: в одном в обоих направлениях неодновременно в обоих одновременно	

1	2
<p>Контактные соединения:</p> <p>штырь</p> <p>гнездо</p> <p>разъемное соединение</p>	
<p>Элементы схем телефонии:</p> <p>телефон</p> <p>микрофон</p>	
<p>Элементы радиосхем:</p> <p>громкоговоритель</p> <p>звонок</p> <p>лампа накаливания сигнальная (и осветительная)</p> <p>элемент гальванический</p>	

1	2
<p>Линии радиосхем:</p> <p>антенна</p> <p>волновод прямоугольный</p> <p>волновод круглый</p> <p>кабель коаксиальный</p>	

Основные правила начертания обозначений. Обозначения на входах и выходах электрических схем вычислительной техники

В верхней части основного поля обозначения помещают символ функции, выполняемой логическим элементом, а под ним записывают шрифтом меньшего размера дополнительные данные по ГОСТ 2.708-81.

Размеры основного поля принимают кратными некоторому модулю c , выбираемому в зависимости от способа выполнения схемы: при выполнении вручную $c=5$, при выполнении автоматически $c=4$ мм. Если в основное поле помещают только символ функции, состоящий не более чем из трех знаков, $h=10, \dots, 12$; $b=8, \dots, 12$ мм. Если помещают дополнительные данные с количеством знаков в строке не более пяти, $h=20, \dots, 25$, $b=12, \dots, 17$ (рис. П8.5,а).

Основное поле может быть с левым дополнительным полем, в котором помещают обозначения входов (метки); дополнительное поле может быть и справа – для меток выходов; ширина дополнительного поля $b_1 \geq 5$ мм (рис. П8.5,б).

Изображения входов и выходов логических элементов выполняют следующим образом: входы – с левой, выходы – с правой стороны прямоугольника. Расстояние между горизонтальной стороной прямоугольника и ближайшей входной (выходной) линией, а также между входными (выходными) линиями должно быть не менее выбранного модуля c (рис. П8.5,в).

Обозначения на входах и выходах выполняются с помощью логических индикаторов, определяющих либо инверсный статический вход (выход) (рис. П8.5,г), либо прямой динамический вход (выход) (рис. П8.5,д), либо инверсный динамический вход (выход) (рис. П8.5,е).

Для обозначения логической операции «И» используется символ &.

При этом:

- не допускается поворачивать условное графическое обозначение;
- прямые статические входы (выходы) следует изображать без логических индикаторов;
- максимальный размер индикатора не должен превышать 3 мм;
- символ функции нельзя составлять из строчных букв, римских цифр, букв, не входящих в русский и латинский алфавит.

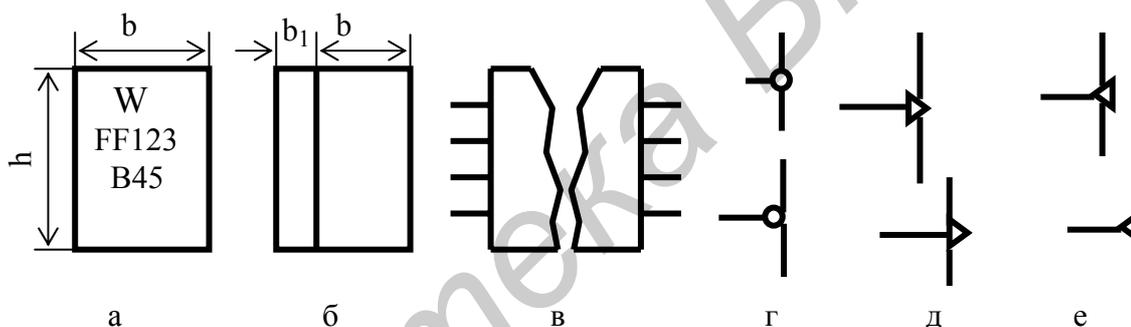


Рис. П8.5. Обозначения основного поля и входов и выходов: основное поле (а); основное поле с левым дополнительным полем (б); входы и выходы логических элементов (в); инверсный статический вход (выход) (г), прямой динамический вход (выход) (д), инверсный динамический вход (выход) (е)

ГОСТ 2.743–91 устанавливает правила построения условных графических обозначений комбинационных логических элементов с равноценными и неравноценными входами, а также изображения монтажной логики, т.е. непосредственного соединения на общую нагрузку логических выходов нескольких элементов.

Условные графические обозначения элементарных комбинационных логических элементов с равноценными входами, построенные на основе логических операций «И» (символ &), «ИЛИ» (символ 1), «НЕ» показаны на рис. П8.6.

Для получения логически эквивалентной формы условных обозначений, как это показано для повторителя (см. рис.П8.6,в,г), необходимо:

- прямые входы заменить на инверсные и наоборот;

- символ функции & заменить на 1 или наоборот;
- для логических элементов с одним входом («Повторение» и «НЕ») символ функции 1 не изменяют;
- метки входов & заменить на 1 или наоборот.

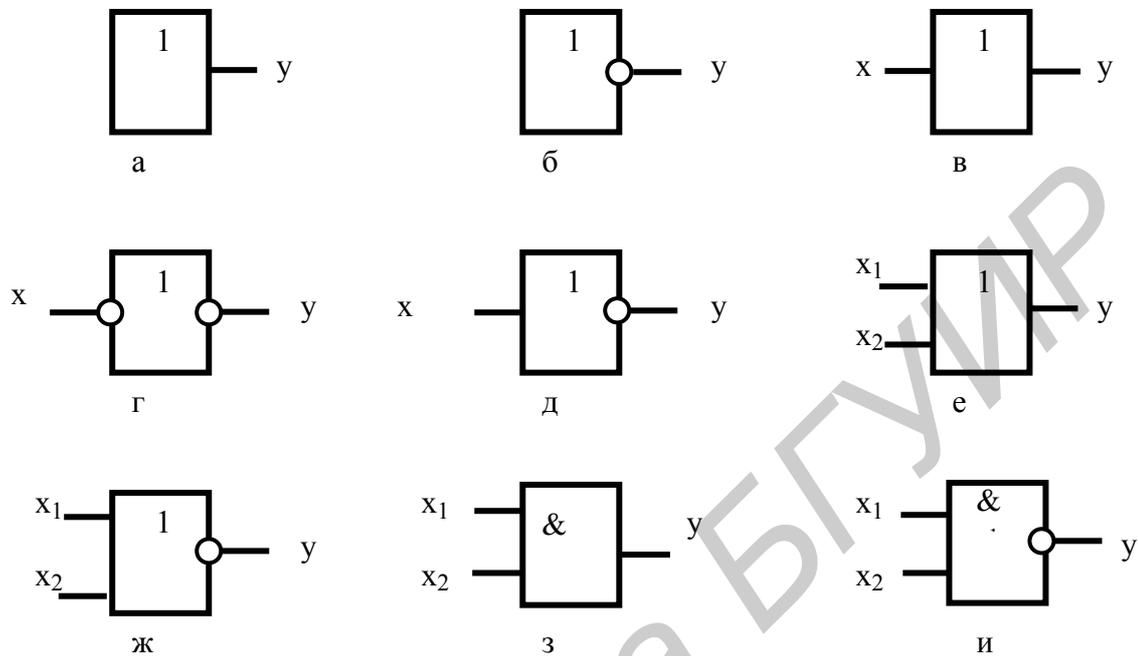


Рис.П8.6.Условные графические обозначения элементарных комбинационных логических элементов с равноценными входами, построенные на основе логических операций «И» (символ &), «ИЛИ» (символ 1), «НЕ»:

а – единичный элемент(генератор «единицы»), $y=1$; б – нулевой элемент (генератор «нуля»), $y=0$; в – повторитель; г – то же, логически эквивалентная форма; д – «НЕ» (инвертор); е – «ИЛИ» (дизъюнктор); ж – «ИЛИ–НЕ» (элемент Пирса); з – «И» – конъюнктор); и – «И–НЕ» (элемент Шеффера)

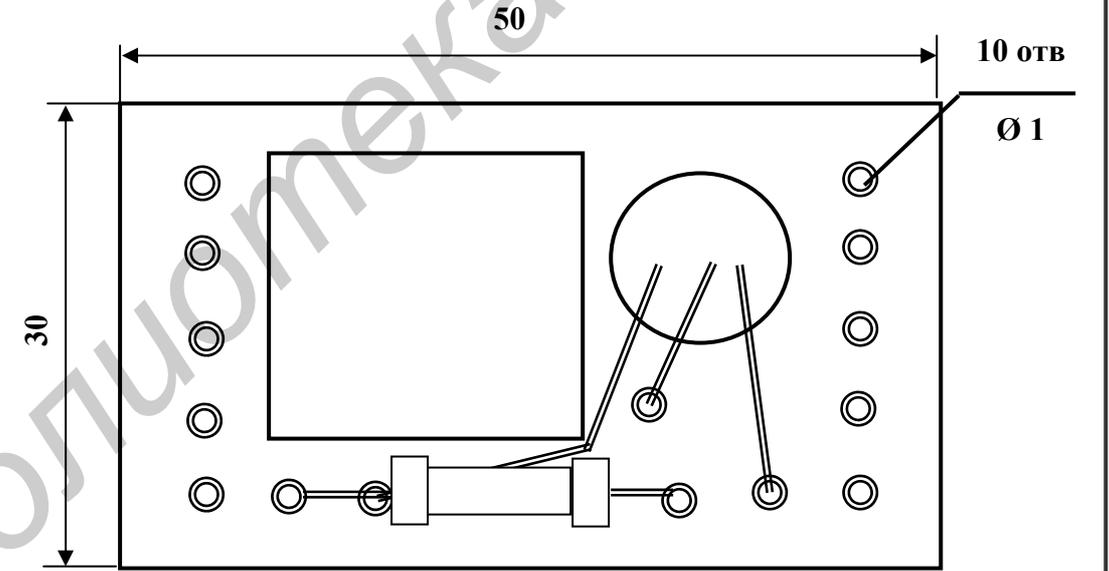
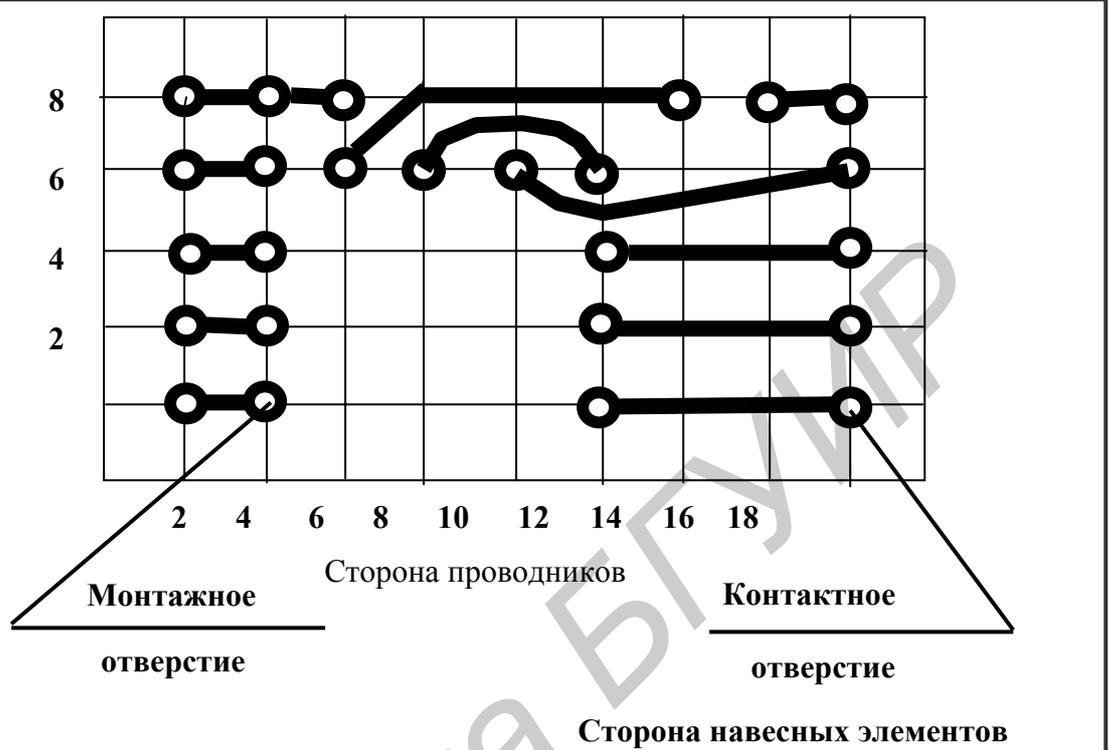
ГОСТ 2.743–91 описывает правила построения условных графических элементов, приводит обозначения монтажной логики.

Для уменьшения объема документации допускается сокращенное выполнение групп условных графических обозначений. Кроме того, условные графические обозначения могут быть изображены совмещенно, прилегая друг к другу одной или двумя сторонами, параллельными распространению информации. При этом логическое соединение между данными элементами отсутствует.

В схемах с повторяющимися элементами допускается также применять пакетный метод сжатия информации, т.е. пакетное изображение условных графических обозначений элементов и линий их связи.

В этом стандарте приведены также многочисленные примеры выполнения условных графических обозначений элементов цифровой техники.

ПЛАТА ПЕЧАТНАЯ С НАВЕСНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ



1. Шаг координатной сетки 2,5 мм. Линии сетки нанесены через одну.
2. Покрытие стороны проводников – ЛАК ГФ-35.

Основная надпись чертежа

Л и т е р а т у р а

1. Стандарт предприятия СТП 12–38–89. Курсовые проекты (работы). Общие требования. –Мн.: МРТИ, 1989. –17 с.
2. Ушаков В.Н. Основы радиоэлектроники и радиотехнические устройства. –М.: Высш.шк.,1976. –424 с.
3. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1985. –488 с.
4. Иванов М.Т., Сергиенко А.Б., Ушаков В.Н. Теоретические основы радиотехники. –М.: Высш. шк., 2002. –306 с.
5. Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи. – М.: Высш. шк., 2002. –510 с.
6. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 320 с.
7. Потишко А.В., Крушевская Д.П. Справочник по инженерной графике / Под ред. А.В.Потишко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Будівельник, 1983. –264 с.
8. Усатенко С.Г., Каченюк Т.К., Терехова М.В. Выполнение электрических схем по ЕСКД. –М.: Изд.-во стандартов, 1992. –316 с.
9. Носенко А.А., Грицай А.В. Техничко-экономическое обоснование дипломных проектов. Метод. пособие. В 4 ч. Ч.2: Расчет экономической эффективности инвестиционных проектов: –Мн.: БГУИР, 2002. –56 с.
10. Першин В.Т. Методическое пособие по расчету сложных цепей на ПЭВМ с использованием пакета Mathcad PLUS 6 для студентов специальности Э.01.03.00. «Экономика и управление на предприятии». –Мн.: БГУИР, 1999. –18 с.
11. Першин В.Т. Методическое пособие по выполнению контрольного задания по курсу «Основы радиоэлектроники и схемотехники» для студентов специальности Э.01.03.00. «Экономика и управление на предприятии» заочной формы обучения. – Мн.: БГУИР, 2001. –52 с.
12. Першин В.Т. Основы радиоэлектроники и схемотехники: Учеб. пособие для студ. спец. 41 01 02 «Микроэлектроника», 39 02 02 «Проектирование и производство радиоэлектронных средств» и 41 01 01 «Экономика и управление на предприятии» всех форм обучения. –Мн.: БГУИР, 2003. –94 с.
13. Баркан В.Ф., Жданов В.К. Радиоприемные устройства. –М.: Сов. радио, 1966. –496 с.

Учебное издание

Першин Виктор Тихонович

ОСНОВЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И СХЕМОТЕХНИКИ

Учебное пособие
по курсовому проектированию
для студентов специальности
27 01 01 «Экономика и организация производства»
всех форм обучения

Редактор Т.А.Лейко
Корректор Е.Н.Батурчик

Подписано в печать	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Печать ризографическая.	Гарнитура Таймс.	Усл. печ. л.
Уч.-изд. л.	Тираж 250 экз.	Заказ.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования

«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Лицензия ЛП №156 от 30.12.2002. Лицензия ЛВ №509 от 03.08.2001.
220013, Минск, П. Бровка, 6