Федеральное агентство связи
ФГОБУ ВПО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»
Уральский технический институт связи и информатики (филиал)

В.А. Матвиенко

СХЕМОТЕХНИКА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Методические указания к курсовой работе
для студентов всех форм обучения направления
210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
по профилям: «Многоканальные телекоммуникационные системы»
«Инфокоммуникационные технологии в сервисах и услугах связи»
«Оптические системы и сети связи»
«Сети связи и системы коммутации»
«Цифровое телерадиовещание»

Екатеринбург
2012

УДК 621.382
ББК 32.852

Рецензент: доцент, канд. техн. наук В.В. Муханов

Матвиенко В.А.

Схемотехника телекоммуникационных устройств : методические указания к курсовой работе / В.А. Матвиенко. – Екатеринбург : УрТИСИ ФГОБУ ВПО «СибГУТИ», 2012. – 33 с.

Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Схемотехника телекоммуникационных устройств» предназначены для студентов всех форм обучения направления 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Рекомендовано научно-методическим советом УрТИСИ ФГОБУ ВПО «СибГУТИ» в качестве методических указаний к курсовой работе по дисциплине «Схемотехника телекоммуникационных устройств» для студентов всех форм обучения направления 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по профилям: «Инфокоммуникационные технологии в сервисах и услугах связи», «Многоканальные телекоммуникационные системы», «Оптические системы и сети связи», «Сети связи и системы коммутации», «Цифровое телерадиовещание».

УДК 621.382
ББК 32.852

Кафедра общепрофессиональных дисциплин технических специальностей

© УрТИСИ ФГОБУ ВПО «СибГУТИ», 2012
© В.А. Матвиенко, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 5
1.1. Каскад с эмиттерной стабилизацией тока коллектора 5
1.2. Методика выбора режима работы транзистора 7
1.3. Расчет емкости конденсаторов 12
2. СОДЕРЖАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ 13
3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ 14
3.1. Выбор режима работы транзистора 14
3.2. Расчет делителя в цепи базы 15
3.3. Определение *h*-параметров транзистора по статическим характеристикам 16
3.4. Расчет параметров элементов схемы замещения транзистора 18
3.5. Расчет основных параметров каскада 20
3.6. Оценка нелинейных искажений каскада 21
3.7. Выбор резисторов и конденсаторов 24
4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ... 26
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 29
ПРИЛОЖЕНИЕ
Ряды номинальных сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов постоянной емкости по ГОСТ 28884–90 (МЭК 63–63) 32

ВВЕДЕНИЕ

Курсовая работа по дисциплине «Схемотехника телекоммуникационных устройств» заключается в расчете типового усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.

Целью курсовой работы является

- закрепление теоретических знаний, полученных при изучении дисциплины;
- формирование углубленного понимания физических процессов в усилительных устройствах;
- изучение методов расчета усилительных устройств и их основных параметров;
- ознакомление с элементной базой телекоммуникационных устройств;
- получение навыков информационного поиска и пользования справочной информацией;
- ознакомление с системой стандартизации и приобретение опыта применения стандартов в практической деятельности;
- усвоение правил составления и оформления технической документации.

Исходные данные к курсовой работе включают:

- тип транзистора;
- номинальное напряжение источника питания;
- сопротивление резистора в цепи коллектора;
- сопротивление нагрузки каскада.

Варианты задания выдаются преподавателем. ***Вариант задания выбирается по двум последним цифрам студенческого билета.***

В результате выполнения курсовой работы студент должен представить:

- пояснительную записку;
- чертеж принципиальной схемы усилительного каскада;
- перечень элементов.

Выполнение данной курсовой работы призвано активизировать самостоятельную работу студентов и является важным этапом в формировании профессиональных компетенций.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Каскад с эмиттерной стабилизацией тока коллектора

В электронике ***усилителем*** называют устройство, предназначенное для увеличения мощности электрических сигналов. Увеличение мощности сигнала в усилителях происходит за счет энергии источника питания.

Поскольку усилитель является четырехполюсником, а биполярный транзистор – трехполюсником, то неизбежно один из выводов транзистора должен быть общим для входной и выходной цепи усилителя. В зависимости от того, какой вывод биполярного транзистора является общим для входной и выходной цепи усилителя, различают схемы ***с общей базой***, ***с общим эмиттером*** и ***с общим коллектором***. Чаще используется схема с общим эмиттером, имеющая наибольший коэффициент усиления по мощности и ряд других достоинств. Практическая схема каскада с общим эмиттером (так называемая ***схема с эмиттерной стабилизацией тока коллектора***) приведена на рис. 1.

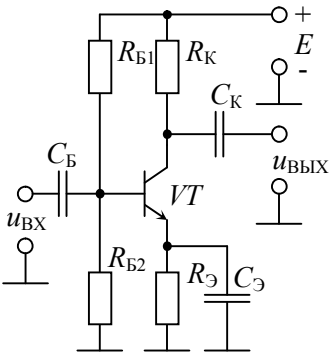

Рис. 1

Входной сигнал $u_{ВХ}$ подается на базу транзистора через конденсатор $C_Б$. Усиленный сигнал $u_{ВЫХ}$ снимается с резистора $R_К$ и через конденсатор $C_К$ подается в нагрузку. Конденсатор $C_Б$ исключает влияние источника сигнала на режим работы транзистора по постоянному току. Емкость конденсатора $C_Б$ выбирают такой, чтобы его сопротивление в полосе пропускания усилителя было пренебрежимо мало по сравнению с входным сопротивлением каскада. Конденсатор $C_К$ исключает влияние нагрузки на режим работы транзистора по постоянному току. Емкость конденсатора $C_К$ выбирают такой, чтобы его сопротивление в полосе пропускания усилителя было пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением нагрузки.

Конденсаторы $C_Б$ и $C_К$ называют ***переходными*** или ***разделительными***. В первом случае подчеркивается их роль по переменному току, а во втором случае – по постоянному току.

Режим работы транзистора по постоянному току задается делителем напряжения в цепи базы $R_{Б1}$, $R_{Б2}$ и сопротивлением $R_Э$ в цепи эмиттера. Делитель напряжения должен быть достаточно низкоомным, чтобы возможные в процессе эксплуатации изменения тока базы транзистора (например, при изменении температуры окружающей среды, смене транзистора и т. п.) не приводили к заметному изменению напряжения на базе транзистора. На практике ток делителя $I_Д = E/(R_{Б1} + R_{Б2})$ выбирают в 3÷10 раз больше тока базы. Чем больше ток делителя, тем стабильнее будет режим работы транзистора по постоянному току, но тем меньше будет входное сопротивление каскада и больше потребляемый ток.

Резистор $R_Э$ служит для стабилизации режима работы транзистора. Стабилизирующее действие резистора $R_Э$ объясняется тем, что падение напряжения на нем является напряжением отрицательной обратной связи. Покажем это. Пусть ток коллектора по какой-либо причине возрос. Поскольку токи коллектора $I_К$ и эмиттера $I_Э$ пропорциональны ($I_К \approx \alpha I_Э$, где α – статический коэффициент передачи тока эмиттера), то ток эмиттера также возрастет. Согласно закону Ома возрастет падение напряжения на резисторе в цепи эмиттера $U_{RЭ} = I_Э R_Э$. Поскольку напряжение на базе транзистора зафиксировано низкоомным делителем, а напряжение на эмиттере $U_{RЭ}$ возросло, то напряжение база-эмиттер, равное разности напряжений на базе и эмиттере, уменьшится. Но это приведет к уменьшению тока базы $I_Б$ и уменьшению тока коллектора ($I_К \approx \beta I_Б$, где β – статический коэффициент передачи тока базы). Таким образом, начав с того, что ток коллектора возрос, мы выяснили, что ток коллектора должен уменьшиться, то есть в цепи имеет место отрицательная обратная связь, противодействующая изменению режима работы транзистора. Чем больше сопротивление резистора $R_Э$, тем стабильнее будет режим работы транзистора по постоянному току.

Конденсатор в цепи эмиттера $C_Э$ устраняет обратную связь по переменному току, что предотвращает снижение коэффициента усиления. Емкость конденсатора $C_Э$ выбирают такой, чтобы его сопротивление в полосе пропускания усилителя было пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением резистора $R_Э$, поэтому переменная составляющая напряжения на сопротивлении $R_Э$ в полосе пропускания усилителя будет практически равна нулю.

1.2. Методика выбора режима работы транзистора

Режим работы транзистора по постоянному току характеризуется напряжением коллектор-эмиттер $U_{КЭ\,рт}$ и током коллектора $I_{К\,рт}$ в рабочей точке, которые задаются током базы $I_{Б\,рт}$ или напряжением база-эмиттер $U_{БЭ\,рт}$. При выборе рабочей точки транзистора руководствуются следующими соображениями:

- ток коллектора ни при каких условиях не должен превышать максимально допустимое значение $I_{К\,max}$ (рис. 2);
- напряжение коллектор-эмиттер не должно превышать максимально допустимое значение $U_{КЭ\,max}$ (рис. 2);
- мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора, не должна превышать максимально допустимое значение $P_{К\,max}$ (рис. 2). В координатах $U_{КЭ}$, $I_К$ график $P_{К\,max}$ = const имеет вид гиперболы:

$$I_К = \frac{P_{К\,макс}}{U_{КЭ} - U_{БЭ}};$$

- рабочая точка транзистора не должна находиться в режиме отсечки. На выходных характеристиках границей активного режима и режима отсечки является выходная характеристика транзистора при $I_Б = 0$. Для кремниевого транзистора эта граница практически совпадает с осью абсцисс;
- рабочая точка транзистора не должна находиться в режиме насыщения. Границу активного режима и режима насыщения можно построить, соединив линией точки на выходных характеристиках транзистора, в которых $U_{БЭ} = U_{КЭ}$ или $U_{КБ} = 0$ (рис. 2).

Таким образом, рабочая точка должна находиться внутри фигуры, ограниченной замкнутой пунктирной линией (рис. 2). Далее при выборе рабочей точки необходимо учесть, что при заданных напряжении питания E и сопротивлении $R_К$ параметры рабочей точки $I_{К\,рт}$ и $U_{КЭ\,рт}$ не могут назначаться произвольно, так как они взаимосвязаны.

Согласно второму закону Кирхгофа

$$U_{Rэ} + U_{КЭ} + U_{Rк} = E,$$

где $U_{Rэ}$ – напряжение на резисторе $R_Э$ ($U_{Rэ} = I_Э R_Э \approx I_К R_Э$);

$U_{Rк}$ – напряжение на резисторе $R_К$ ($U_{Rк} = I_К R_К$).

Разрешим уравнение относительно напряжения коллектор-эмиттер:

$$U_{КЭ} = E - U_{Rэ} - U_{Rк} = E - I_Э R_Э - I_К R_К \approx E - I_К(R_К + R_Э). \qquad (1)$$

Отсюда следует, что напряжение $U_{КЭ}$ является функцией тока коллектора $I_К$. График этой функции представляет собой прямую линию, проходящую через точки (0, E / ($R_К$ + $R_Э$)) и (E, 0). Эту линию называют ***нагрузочной прямой по постоянному току*** (рис. 2). Нагрузочная прямая по постоянному току образует с осью абсцисс угол

$$\alpha = \mathrm{arctg}\frac{1}{R_К + R_Э}.$$

Чем больше ($R_К$ + $R_Э$), тем положе будет проходить нагрузочная прямая по постоянному току.

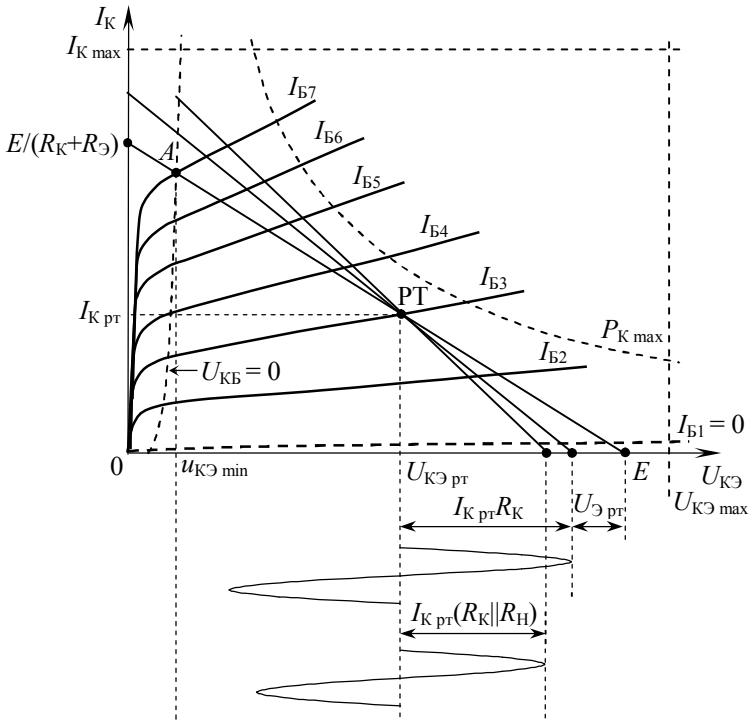

Рис. 2

Таким образом, рабочая точка, характеризующая режим работы, должна находится на нагрузочной прямой по постоянному току. В литературе широко распространена рекомендация, согласно которой для получения наибольшего неискаженного выходного напряжения рабочую точку следует выбирать посредине отрезка AE нагрузоч-

ной прямой по постоянному току [1-4]. Покажем ошибочность этой рекомендации.

Пусть рабочая точка в соответствие с этой рекомендацией выбрана посредине отрезка *AE* нагрузочной прямой по постоянному току (рис. 2). В отсутствии сигнала ток в цепи коллектора $I_К = I_{К\,рт}$, а напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭ} = U_{КЭ\,рт}$. Если под воздействием входного сигнала ток коллектора получит приращение $\Delta i_К$, то напряжение коллектор-эмиттер также получит некоторое приращение $\Delta u_{КЭ}$. Установим связь между $\Delta i_К$ и $\Delta u_{КЭ}$, для чего продифференцируем уравнение (1) по току коллектора, предварительно раскрыв скобки. Получим

$$\frac{du_{КЭ}}{di_К} = -R_К\,, \qquad (2)$$

поскольку E= const и $U_{Rэ} = I_Э R_Э \approx I_К R_Э$= const, т. к. резистор $R_Э$ зашунтирован конденсатором большой емкости. Переходя в (2) от дифференциалов к конечным приращениям, находим

$$\Delta u_{КЭ} = -\,R_К \Delta i_К.$$

Пусть ток коллектора скачком станет равным нулю, т. е $\Delta i_К = -\,I_{К\,рт}$. Тогда напряжение коллектор-эмиттер скачком увеличится на $\Delta u_{КЭ} = R_К\ I_{К\,рт}$. Таким образом, если на вход каскада подать переменное напряжение, то в любой момент времени мгновенные значения тока коллектора $i_К$ и напряжения коллектор-эмиттер $u_{КЭ}$ будут лежать на прямой, проходящей через рабочую точку и точку с координатами (($U_{КЭ\,рт}$+ $R_К I_{К\,рт}$), 0). Эту прямую называют ***нагрузочной прямой по переменному току*** (рис. 2). Нагрузочная прямая по переменному току образует с осью абсцисс угол

$$\beta_{XX} = \mathrm{arctg}\frac{1}{R_К}.$$

До сих пор мы полагали, что усилитель работает в режиме холостого хода. На практике усилитель всегда нагружен на некоторое сопротивление $R_Н$. Учтем сопротивление нагрузки $R_Н$. По переменному току сопротивление нагрузки $R_Н$ подключено параллельно сопротивлению $R_К$. В этом случае, если ток коллектора скачком станет равным нулю ($\Delta i_К = -\,I_{К\,рт}$), то напряжение коллектор-эмиттер скачком увеличится на $\Delta u_{КЭ} = I_{К\,рт}(R_К \| R_Н)$. Таким образом, нагрузочная прямая по переменному току с учетом сопротивления нагрузки $R_Н$ проходит через рабочую точку и точку с координатами (($U_{КЭ\,рт}$+$I_{К\,рт}(R_К \| R_Н)$), 0)

(рис. 2). Нагрузочная прямая по переменному току, построенная с учетом сопротивления нагрузки $R_Н$, образует с осью абсцисс угол

$$\beta_Н = \mathrm{arctg}\frac{1}{R_К \| R_Н}.$$

Из рис. 2 следует, что для получения наибольшего неискаженного выходного напряжения ***рабочую точку следует выбирать посредине нагрузочной прямой по переменному току***.

Получим формулу для расчета напряжения $U_{КЭ\ рт}$, при котором рабочая точка будет расположена посредине нагрузочной прямой по переменному току (рис. 3), полагая, что минимальное напряжение коллектор-эмиттер $u_{КЭ\ min} = 0$ (на практике $u_{КЭ\ min} < 1$ В). При этом допущении напряжение коллектор-эмиттер в рабочей точке

$$U_{КЭ\ рт} = I_{К\ рт}(R_К \| R_Н), \qquad (3)$$

причем рабочая точка должна лежать на нагрузочной прямой по постоянному току

$$U_{КЭ\ рт} = E - I_{К\ рт}(R_К + R_Э). \qquad (4)$$

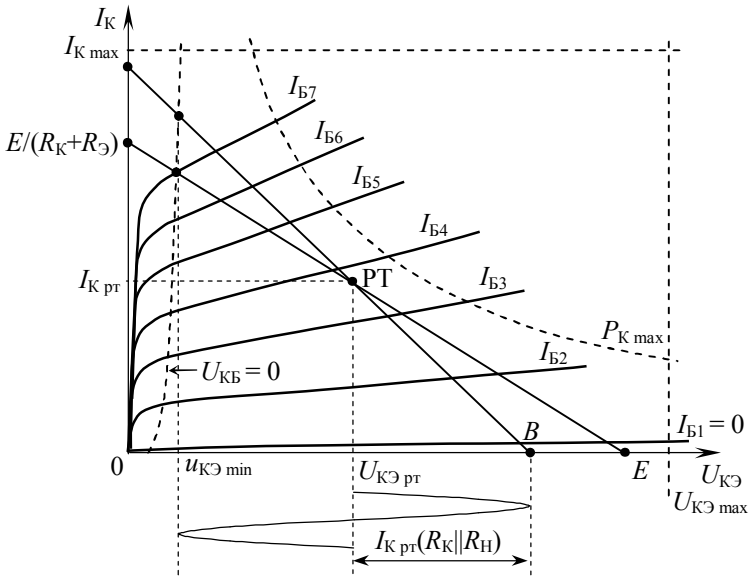

Рис. 3

Решая уравнения (3) и (4) как систему, находим

$$U_{\text{КЭ рт}} = E\frac{1}{2+\frac{R_{\text{К}}}{R_{\text{Н}}}+\frac{R_{\text{Э}}}{R_{\text{Н}}}+\frac{R_{\text{Э}}}{R_{\text{К}}}}. \qquad (5)$$

Из формулы (5) следует, что напряжение $U_{\text{КЭ рт}}$ в общем случае будет меньше $E/2$, причем, чем больше $R_{\text{Э}}$ и меньше $R_{\text{Н}}$, тем меньше будет напряжение $U_{\text{КЭ рт}}$. В частном случае, если усилитель работает в режиме холостого хода на выходе ($R_{\text{Н}} = \infty$), то

$$U_{\text{КЭ рт}} = E\frac{1}{2+R_{\text{Э}}/R_{\text{К}}}.$$

Если усилитель нагружен на сопротивление $R_{\text{Н}} = R_{\text{К}}$, то

$$U_{\text{КЭ рт}} = E\frac{1}{3+2\frac{R_{\text{Э}}}{R_{\text{К}}}},$$

то есть в этом случае напряжение $U_{\text{КЭ рт}}$ будет меньше $E/3$.

В каскадах предварительного усиления, когда от усилителя не требуется максимально возможная амплитуда выходного сигнала, напряжение, $U_{\text{КЭ рт}}$ выбирают несколько меньше, чем это следует из соотношения (5). В этом случае нелинейные искажения, обусловленные нижним загибом входной характеристики транзистора, будут меньше.

При сделанном допущении ($u_{\text{КЭ min}} = 0$) максимальная амплитуда выходного напряжения каскада

$$U_{\text{ВЫХ}\,m} = E\frac{1}{2+\frac{R_{\text{К}}}{R_{\text{Н}}}+\frac{R_{\text{Э}}}{R_{\text{Н}}}+\frac{R_{\text{Э}}}{R_{\text{К}}}}. \qquad (6)$$

Отсюда можно найти коэффициент использования напряжения источника питания, равный отношению максимальной амплитуды выходного напряжения каскада $U_{\text{ВЫХ m}}$ к напряжению источника питания E:

$$k_E = \frac{1}{2+\frac{R_{\text{К}}}{R_{\text{Н}}}+\frac{R_{\text{Э}}}{R_{\text{Н}}}+\frac{R_{\text{Э}}}{R_{\text{К}}}}. \qquad (7)$$

Здесь следует иметь в виду, что любые смещения рабочей точки, вызванные разбросом параметров элементов каскада, изменением температуры и т. п., приведут к уменьшению $U_{\text{ВЫХ m}}$ и k_E относительно рассчитанных по формулам (6) и (7).

Из формул (6) и (7) следует, что увеличение сопротивления $R_Э$, желательное для повышения стабильности рабочей точки, приведет к уменьшению коэффициента использования напряжения источника питания, что нежелательно. На практике сопротивление резистора $R_Э$ выбирают из компромиссных соображений.

1.3. Расчет емкости конденсаторов

Анализ амплитудно-частотной характеристики усилителя в области низких частот показывает [5], что при равных постоянных времени переходных цепей $\tau_н$, нижняя граничная частота полосы пропускания усилителя

$$f_н = \frac{1}{2\pi\tau_н\sqrt{\sqrt[n]{2}-1}},$$

где n – количество переходных цепей в усилителе.

Отсюда можно получить формулу для расчета постоянной времени переходных цепей по заданной нижней граничной частоте полосы пропускания усилителя $f_н$:

$$\tau_н = \frac{1}{2\pi f_н\sqrt{\sqrt[n]{2}-1}}. \qquad (8)$$

Каскад с эмиттерной стабилизацией тока коллектора (рис. 1) содержит две переходных цепи: входную ($C_Б$) и выходную ($C_К$). Постоянная времени переходной цепи равна произведению емкости переходного конденсатора на сумму сопротивлений, включенных (по переменному току) последовательно с ним. Постоянная времени входной цепи

$$\tau_{нб} = (R_С + R_{Б1}\|R_{Б2}\|r_{ВХ\,т})C_Б, \qquad (9)$$

где $R_С$ – сопротивление источника сигнала;

$r_{ВХ\,т}$ – входное сопротивление транзистора.

Постоянная времени выходной цепи

$$\tau_{нк} = (r_{ВЫХ} + R_Н)C_Б,$$

где $r_{ВЫХ}$ – выходное сопротивление усилителя.

В схеме рис. 1 выходное сопротивление $r_{ВЫХ} = R_К$. Тогда

$$\tau_{нк} = (R_К + R_Н)C_К. \qquad (10)$$

Конденсатор $C_Э$ в цепи эмиттера (рис. 1), так же как и переходные конденсаторы $C_Б$ и $C_К$, приводит к завалу амплитудно-частотной характеристики усилителя в области низких частот, однако его влияние отличается от влияния конденсаторов $C_Б$ и $C_К$. Если переходные

конденсаторы $C_Б$ и $C_К$ приводят к тому, что при $f \to 0$ коэффициент усиления по напряжению стремится к нулю, то конденсатор $C_Э$ также приводит к уменьшению коэффициента усиления, но не до нуля, а до некоторого минимального значения, равного коэффициенту усиления при $C_Э = 0$. В работе [6] показано, что если это уменьшение превышает два раза, то вблизи нижней граничной частоты полосы пропускания различиями во влиянии на амплитудно-частотную характеристику переходных конденсаторов и конденсатора $C_Э$ можно пренебречь. Это позволяет считать, что вблизи нижней граничной частоты полосы пропускания влияние конденсатора $C_Э$ на амплитудно-частотную характеристику будет эквивалентно влиянию еще одного переходного конденсатора.

Постоянная времени эмиттерной цепи [7]

$$\tau_{нэ} = \left(r_Э + \frac{R_С + r_Б}{h_{21Э} + 1} \right) C_Э , \qquad (11)$$

где $r_Э$ – дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода;

$r_Б$ – сопротивление базы транзистора [8];

$h_{21Э}$ – статический коэффициент передачи тока базы транзистора [8].

Таким образом, при равных постоянных времени $\tau_{нб} = \tau_{нк} = \tau_{нэ} = \tau_н$ и $n = 3$ из соотношений (8)–(11) можно получить следующие формулы для расчета емкостей конденсаторов:

$$C_Б = \frac{0{,}3121}{\left(R_С + R_{Б1} \| R_{Б2} \| r_{ВХ\,т} \right) f_н} ; \qquad (12)$$

$$C_К = \frac{0{,}3121}{\left(R_К + R_Н \right) f_н} ; \qquad (13)$$

$$C_Э = \frac{0{,}3121}{\left(r_Э + \frac{R_С + r_Б}{h_{21Э} + 1} \right) f_н} . \qquad (14)$$

2. СОДЕРЖАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Выпишите справочные данные транзистора в объеме справочника [9]: общие сведения, электрические параметры, максимально допустимые параметры, семейства входных и выходных характеристик.

2. Выберите режим работы транзистора из условия обеспечения максимальной амплитуды выходного напряжения.
3. Рассчитайте параметры делителя в цепи базы.
4. Определите *h*-параметры транзистора в рабочей точке.
5. Найдите параметры элементов схемы замещения транзистора.
6. Рассчитайте основные параметры каскада: коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности; входное сопротивление; выходное сопротивление.
7. Постройте сквозную характеристику и оцените нелинейные искажения при максимальной амплитуде входного напряжения.
8. Рассчитайте емкости конденсаторов.
9. Выберите тип и параметры резисторов и конденсаторов.
10. Оформите пояснительную записку, начертите принципиальную схему каскада, составьте перечень элементов.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ

3.1. Выбор режима работы транзистора

На семействе выходных характеристик транзистора постройте нагрузочную прямую по постоянному току. Сопротивление в цепи эмиттера возьмите из соотношения:

$$R_Э = 0{,}2\ R_К. \qquad (15)$$

Такое сопротивление обеспечит достаточно высокую стабильность рабочей точки и не сильно уменьшит коэффициент использования напряжения источника питания.

После расчета сопротивления $R_Э$ сразу же выберите ближайшее стандартное значение по ряду Е24 [10] (см. приложение). В последующих вычислениях используйте стандартное значение сопротивления $R_Э$.

Далее по формуле (5) рассчитайте напряжение коллектор-эмиттер в рабочей точке $U_{КЭ\ рт}$. Будет удобнее, если рабочая точка совпадет с одной из выходных характеристик семейства, поэтому в качестве рабочей точки выберите ближайшую к рассчитанному значению $U_{КЭ\ рт}$ точку пересечения нагрузочной прямой по постоянному току с одной из характеристик семейства. Если шаг выходных характеристик транзистора велик, то «подтягивание» рабочей точки к ближайшей выходной характеристике может привести к существенному отклонению рабочей точки от оптимального значения. В этом случае можно построить дополнительную выходную характеристику и выбрать

рабочую точку на ней. Отметьте выбранную рабочую точку на выходных характеристиках транзистора. Определите ток коллектора в рабочей точке $I_{К\ рт}$.

Отметьте выбранную рабочую точку на входной характеристике транзистора. В справочниках обычно приводятся две характеристики: при напряжении коллектор-эмиттер $U_{КЭ} = 0$ и при напряжении $U_{КЭ} \neq 0$ (у транзисторов поздних разработок $U_{КЭ} = 5$ В). Первая характеристика соответствует режиму насыщения, а вторая – нормальному активному режиму. Поскольку в усилителях транзисторы работают в нормальном активном режиме, то рабочую точку следует построить на входной характеристике при напряжении $U_{КЭ} \neq 0$ (рис. 4), при этом не имеет никакого значения соотношение напряжения, для которого приведена входная характеристика в справочнике, и напряжения в рабочей точке $U_{КЭ\ рт}$. На входной характеристике рабочая точка строится по току базы $I_{Б\ рт}$, соответствующему выходной характеристике, проходящей через рабочую точку. Проекция рабочей точки на ось напряжения база-эмиттер даст значение напряжения база-эмиттер в рабочей точке $U_{БЭ\ рт}$. Выпишите параметры рабочей точки: $U_{КЭ\ рт}$, $I_{К\ рт}$, $U_{БЭ\ рт}$, $I_{Б\ рт}$.

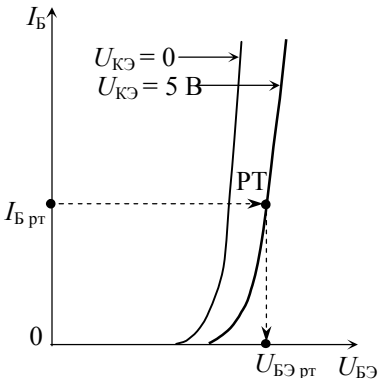

Рис. 4

3.2. Расчет делителя в цепи базы

Рассчитайте сопротивления делителя $R_{Б1}$,$R_{Б2}$ в цепи базы. Чем больше будет сквозной ток делителя $I_Д = E/(R_{Б1} + R_{Б2})$, тем стабильнее будет режим работы при замене транзистора и изменении температуры окружающей среды, но тем больше будет ток, потребляемый каскадом от источника питания, поэтому сквозной ток делителя выбирают из компромиссных соображений. На практике сквозной ток делителя выбирают из условия $I_Д = (3 \div 10)\ I_{Б\ рт}$.

Согласно закону Ома, сопротивление резистора

$$R_{Б2} = \frac{U_{Rэ} + U_{БЭрт}}{I_Д}. \qquad (16)$$

Рассчитайте сопротивление резистора $R_{Б2}$ по формуле (16), полагая

$$U_{R\text{э}} = I_{\text{Э рт}} R_{\text{Э}} = (I_{\text{К рт}} + I_{\text{Б рт}}) R_{\text{Э}}. \quad (17)$$

Выберите стандартное значение сопротивления $R_{\text{Б2}}$ по ряду Е24 и пересчитайте ток делителя:

$$I_{Д}^{*} = \frac{U_{R\text{э}} + U_{\text{БЭрт}}}{R_{\text{Б2}}}. \quad (18)$$

Рассчитайте сопротивление резистора $R_{\text{Б1}}$:

$$R_{\text{Б1}} = \frac{E - \left(U_{R\text{э}} + U_{\text{БЭрт}}\right)}{I_{\text{Д}}^{*} + I_{\text{Б рт}}}. \quad (19)$$

Выберите ближайшее стандартное значение сопротивления $R_{\text{Б1}}$ по ряду Е24.

3.3. Определение *h*-параметров транзистора по статическим характеристикам

По статическим характеристикам транзистора можно определить три из четырех *h*-параметров: входное сопротивление $h_{11\text{Э}}$, статический коэффициент передачи тока базы транзистора $h_{21\text{Э}}$ и выходную проводимость $h_{22\text{Э}}$.

Входное сопротивление $h_{11\text{Э}} = \Delta U_{\text{БЭ}} / \Delta I_{\text{Б}}$ при коротком замыкании по переменному току на выходе транзистора ($U_{\text{КЭ}} = \text{const}$) [8] определяют по входным характеристикам транзистора. Для этого задайте приращение напряжения база-эмиттер $\Delta U_{\text{БЭ}}$ симметрично относительно рабочей точки и определите соответствующее приращение тока базы $\Delta I_{\text{Б}}$ (рис. 5).

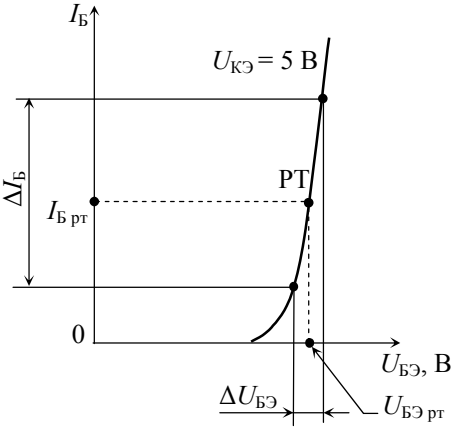

Рис. 5

Приращение $\Delta U_{БЭ}$ следует брать как можно больше, но не заходя на явно нелинейные участки входной характеристики.

Статический коэффициент передачи тока базы транзистора $h_{21Э} = \Delta I_К / \Delta I_Б$ при коротком замыкании по переменному току на выходе транзистора ($U_{КЭ} = \text{const}$) [8] определяют по выходным характеристикам транзистора. Для нахождения параметра $h_{21Э}$ необходимо задать приращение тока базы $\Delta I_Б$ и определить соответствующее приращение тока коллектора $\Delta I_К$ (рис. 6).

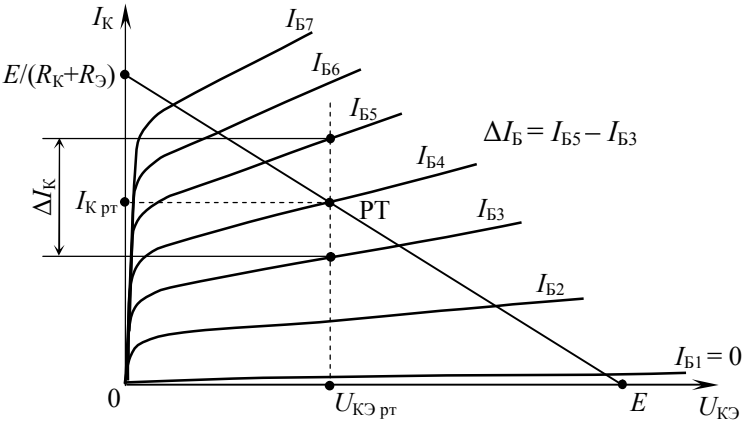

Рис. 6

Поскольку параметр $h_{21Э}$ определяется при коротком замыкании по переменному току на выходе транзистора, то приращение тока базы надо задать так, чтобы токи базы отвечали условию $U_{КЭ} = U_{КЭ\,рт} = \text{const}$, а для этого они должны лежать на вертикальной прямой, проходящей через рабочую точку (токи $I_{Б5}$ и $I_{Б3}$ на рис. 6).

Выходную проводимость $h_{22Э} = \Delta I_К / \Delta U_{КЭ}$ в режиме холостого хода на входе транзистора ($I_Б = \text{const}$) [8] определяют также как и параметр $h_{21Э}$ по выходным характеристикам транзистора. Для нахождения параметра $h_{22Э}$ необходимо задать приращение напряжения коллектор-эмиттер $\Delta U_{КЭ}$ и определить соответствующее приращение тока коллектора $\Delta I_К$ (рис. 7). Условию $I_Б = \text{const}$ будут отвечать точки, лежащие на выходной характеристике, проходящей через рабочую точку транзистора. Поскольку выходные характеристики линейны в широком диапазоне напряжений, то приращение $\Delta U_{КЭ}$ может быть достаточно большим, при этом его симметричность относительно рабочей точки не имеет значения.

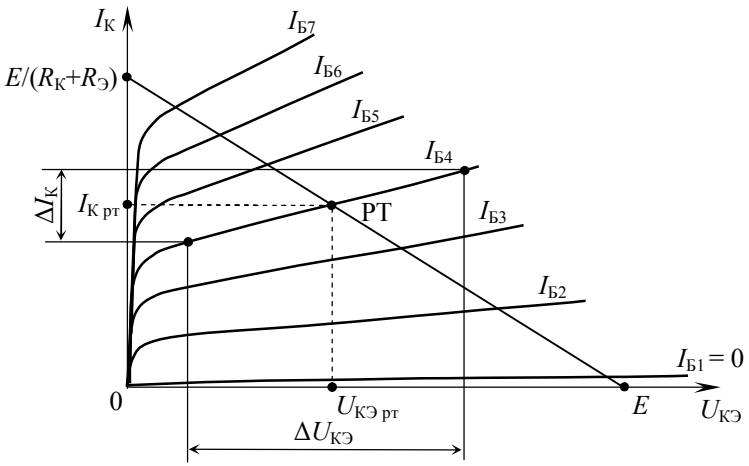

Рис. 7

Четвертый параметр – коэффициент обратной связи по напряжению $h_{12Э}$ по приводимым в справочниках статическим характеристикам определить невозможно. У маломощных транзисторов коэффициент обратной связи по напряжению $h_{12Э} = (1 \div 10)\ 10^{-4}$.

3.4. Расчет параметров элементов схемы замещения транзистора

Рассчитайте физические малосигнальные параметры П-образной схемы замещения биполярного транзистора (рис. 8). Эта схема известна также в литературе под названиями «гибридная схема замещения» [11] и «схема замещения Джиаколетто» [12].

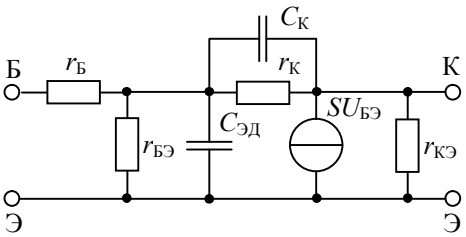

Рис. 8

Емкость коллекторного перехода при напряжении коллектор-база $U_{КБ} = U_{КБ\,рт}$:

$$C_К = C_К^* \sqrt{\frac{U_{КБ}^*}{U_{КБ\,рт}}}, \qquad (20)$$

где $C_К^*$ – емкость коллекторного перехода при напряжении коллектор-база $U_{КБ} = U_{КБ}^*$. Значения $C_К^*$ и $U_{КБ}^*$ возьмите из справочника [9], причем значение $U_{КБ}^*$ – из той же строки справочника, что и $C_К^*$ (колонка «Режимы измерения»).

Напряжение коллектор-база в рабочей точке $U_{КБ\,рт}$ рассчитайте по формуле:

$$U_{КБ\,рт} = E - I_{К\,рт}R_К - (I_{К\,рт} + I_{Б\,рт})R_Э - U_{БЭ\,рт}. \qquad (21)$$

Выходное сопротивление транзистора

$$r_{КЭ} = \frac{1}{h_{22Э}}. \qquad (22)$$

Сопротивление коллекторного перехода транзистора

$$r_К = r_{КЭ}\left(h_{21Э} + 1\right). \qquad (23)$$

Сопротивление эмиттерного перехода транзистора для тока эмиттера

$$r_Э = \frac{25\left[\text{мВ}\right]}{I_{Э\,рт}\left[\text{мА}\right]}\,[\text{Ом}]. \qquad (24)$$

Сопротивление эмиттерного перехода транзистора для тока базы

$$r_{БЭ} = r_Э\left(h_{21Э} + 1\right). \qquad (25)$$

Сопротивление базы транзистора

$$r_Б = 1{,}5\frac{\tau_К}{C_К}, \qquad (26)$$

где $\tau_К$ – постоянная времени цепи обратной связи на высокой частоте.

Значение $\tau_К$ возьмите из справочника [9]. У транзисторов малой мощности средней частоты значение $\tau_К$ не нормируется, поэтому для этих транзисторов примите $r_Б = 100 \div 200$ Ом.

Диффузионная емкость эмиттерного перехода

$$C_{ЭД} = \frac{1}{2\pi f_{гр} r_Э}, \qquad (27)$$

где $f_{гр}$ – граничная частота коэффициента передачи тока [8] – частота, на которой модуль коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером $|h_{21Э}| = 1$ (для граничной частоты часто используется международное обозначение $f_т$).

Граничная частота $f_{гр}$ или приводится в справочнике или рассчитывается по формуле

$$f_{гр} = |h_{21Э}| f_{изм}, \qquad (28)$$

где $f_{изм}$ – частота, на которой измерен модуль коэффициента передачи тока базы $|h_{21Э}|$.

Значения $|h_{21Э}|$ и $f_{изм}$ возьмите из справочника [9], причем значение $f_{изм}$ – из той же строки справочника, что и $|h_{21Э}|$ (колонка «Режимы измерения»).

Крутизна транзистора

$$S = \frac{h_{21Э}}{h_{11Э}}. \qquad (29)$$

Следует иметь в виду, что формулы (20) – (29) являются приближенными, и реальные значения параметров могут заметно отличаться от рассчитанных по этим формулам.

3.5. Расчет основных параметров каскада

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = S \frac{R_К R_Н}{R_К + R_Н}.$$

Коэффициент усиления по току

$$K_I = h_{21Э} \frac{1}{1 + h_{11Э} \dfrac{R_{Б1} + R_{Б2}}{R_{Б1} R_{Б2}}} \frac{R_К}{R_К + R_Н}.$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P = K_U K_I.$$

Входное сопротивление каскада

$$r_{ВХ} = \frac{h_{11Э}}{1 + h_{11Э} \dfrac{R_{Б1} + R_{Б2}}{R_{Б1} R_{Б2}}}.$$

Выходное сопротивление каскада

$$r_{ВЫХ} = \frac{R_К r_{КЭ}}{R_К + r_{КЭ}}.$$

3.6. Оценка нелинейных искажений каскада

Постройте нагрузочную прямую по переменному току, которая будет проходить через рабочую точку и точку *B* (рис. 9) с напряжением

$$U_B = U_{КЭ\ рт} + I_{К\ рт}\,(R_К \| R_Н).$$

Оцените максимальную амплитуду выходного напряжения каскада $U_{ВЫХ\ m}$ с учетом «подтягивания» рабочей точки к ближайшей выходной характеристике. Максимальная амплитуда $U_{ВЫХ\ m}$ будет равна меньшему из двух напряжений: напряжения в рабочей точке $U_{КЭ\ рт}$ и разности напряжений $U_B - U_{КЭ\ рт}$ (рис. 9).

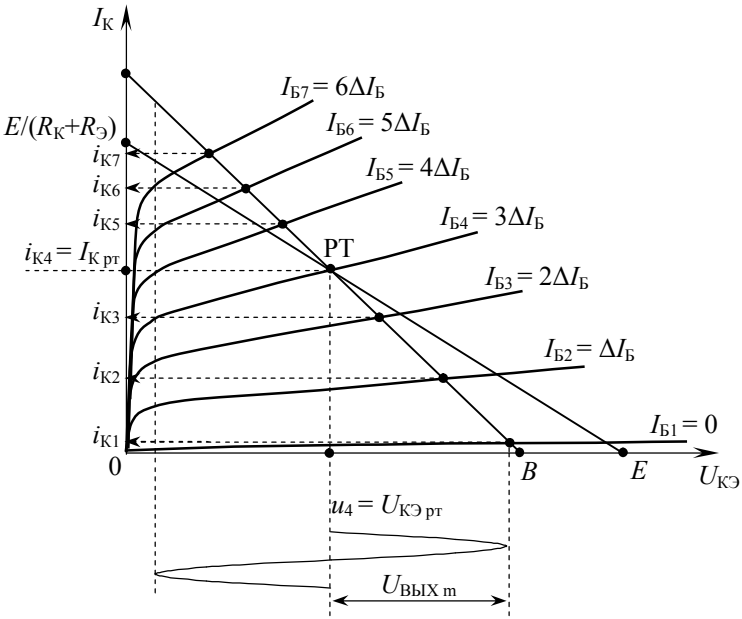

Рис. 9

Постройте сквозную характеристику каскада – зависимость тока коллектора $i_К$ от напряжения база-эмиттер $u_{БЭ}$, для чего предварительно заготовьте следующую таблицу:

$I_Б$, мкА	0	$\Delta I_Б$	$2\Delta I_Б$	$3\Delta I_Б$	$4\Delta I_Б$	$5\Delta I_Б$	$6\Delta I_Б$
$U_{БЭ}$, В	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7
$I_К$, мА	$i_{К1}$	$i_{К2}$	$i_{К3}$	$i_{К4}$	$i_{К5}$	$i_{К6}$	$i_{К7}$

Сквозную характеристику строят по нагрузочной прямой по переменному току. Количество столбцов в таблице будет равно количеству точек пересечения нагрузочной прямой по переменному току с выходными характеристиками транзистора (7 столбцов для примера на рис. 9, не считая боковика таблицы). В таблице $\Delta I_Б$ – шаг по току базы, с которым приведены выходные характеристики в справочнике.

Каждую точку пересечения нагрузочной прямой по переменному току с выходными характеристиками транзистора спроецируйте на ось токов (рис. 9). Полученные значения тока коллектора $i_{К1} – i_{К7}$ занесите в таблицу.

Напряжения база-эмиттер, соответствующие токам $i_{К1} – i_{К7}$, можно найти по входной характеристике транзистора (рис. 10), для чего на оси токов надо отложить значения токов базы из таблицы, спроецировать их на входную характеристику, а затем – на ось напряжений база-эмиттер. Если воспользоваться входными характеристиками транзистора, приводимыми в справочнике (как это показано на рис. 10), то точность отсчета напряжений база-эмиттер будет крайне низкой.

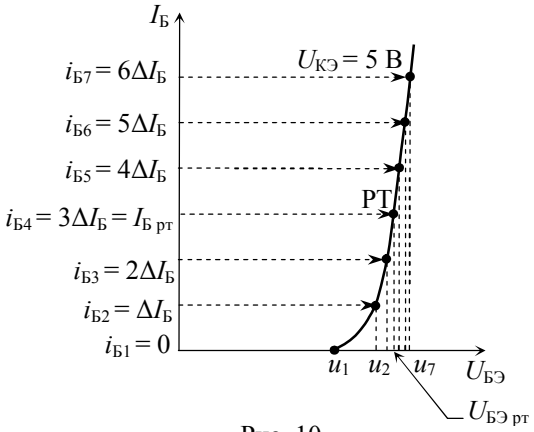

Рис. 10

Как видно из рис. 10, до напряжения u_1 он не содержит никакой информации, поэтому для повышения точности графических построений начальный участок графика входной характеристика следует исключить, сместив начало отсчета по оси напряжений база-эмиттер и изменив масштаб по оси напряжений база-эмиттер, как показано на рис. 11.

Полученные значения напряжений база-эмиттер $u_1 - u_7$ (рис. 11) занесите в таблицу.

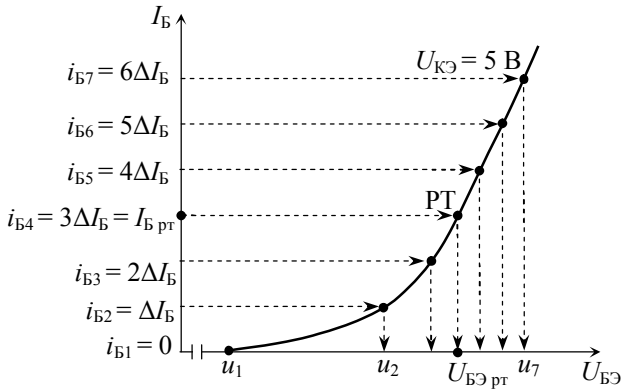

Рис. 11

Используя пары значений $U_{БЭ}$, $I_К$ из таблицы, постройте сквозную характеристику каскада, как показано на рис. 12, и определите наибольшую амплитуду входного сигнала $U_{БЭm}$.

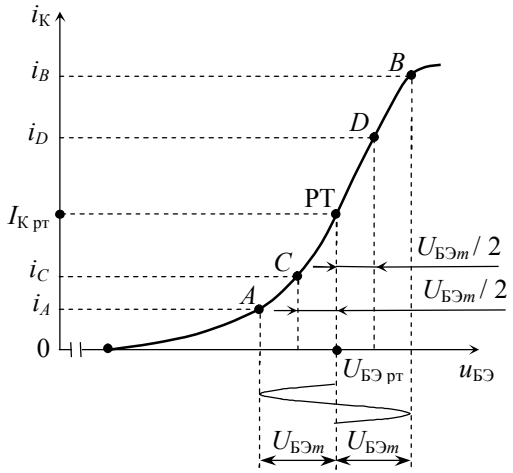

Рис. 12

При подаче на вход каскада гармонического колебания с амплитудой $U_{БЭm}$ напряжение база-эмиттер будет изменяться в пределах от $U_{БЭ\ рт} - U_{БЭm}$ (точка *A* на рис.12) до $U_{БЭ\ рт} + U_{БЭm}$ (точка *B* на рис.12).

При увеличении амплитуды входного напряжения $U_{БЭm}$ точки A и B будут удаляться от рабочей точки симметрично по оси напряжений. Найдите такое положение точек A и B, при котором они будут максимально удалены от рабочей точки, но не будут заходить на явно нелинейные участки сквозной характеристики. Нанесите точки A и B на график сквозной характеристики и запишите полученное значение максимальной амплитуды входного сигнала $U_{БЭm}$.

Оцените нелинейные искажения, вносимые каскадом, при максимальной амплитуде входного напряжения. Для оценки нелинейных искажений воспользуйтесь методом пяти ординат [13,14], который называют также методом Клина. Метод пяти ординат позволяет приближенно найти амплитуды первых четырех гармоник выходного колебания каскада и соответствующие коэффициенты гармоник.

Для использования метода пяти ординат постройте на сквозной характеристике точки C и D, которые должны быть удалены от рабочей точки на половину амплитуды напряжения входного сигнала. В результате на сквозной характеристике получите пять равноудаленных по оси напряжений точек A, B, РТ, C и D, ординаты которых i_A, i_B, $I_{К\,рт}$, i_C, i_D, используются при расчете коэффициентов гармоник.

Коэффициент второй гармоники

$$k_{Г2} = \frac{3}{4} \cdot \frac{i_B + i_A - 2I_{Крт}}{i_B - i_A + i_D - i_C}. \qquad (30)$$

Коэффициент третьей гармоники

$$k_{Г3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{i_B - i_A - 2(i_D - i_C)}{i_B - i_A + i_D - i_C}. \qquad (31)$$

Коэффициент четвертой гармоники

$$k_{Г4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{i_B + i_A - 4(i_D + i_C) + 6I_{Крт}}{i_B - i_A + i_D - i_C}. \qquad (32)$$

Интегральный коэффициент гармоник

$$k_{Г} = \sqrt{k_{Г2}^2 + k_{Г3}^2 + k_{Г4}^2}. \qquad (33)$$

3.7. Выбор резисторов и конденсаторов

Для правильного выбора резисторов необходимо рассчитать рассеиваемую ими мощность.

Мощность, рассеиваемая резистором в цепи коллектора $R_К$,

$$P_{Rк} = I_{Крт}^2 R_К. \qquad (34)$$

Мощность, рассеиваемая резистором в цепи эмиттера $R_Э$,

$$P_{R_Э} = \left(I_{Крт} + I_{Брт}\right)^2 R_Э . \qquad (35)$$

Мощность, рассеиваемая резистором $R_{Б1}$ в цепи базы транзистора,

$$P_{R_{Б1}} = \frac{\left[E - U_{БЭрт} - \left(I_{Крт} + I_{Брт}\right)R_Э\right]^2}{R_{Б1}} . \qquad (36)$$

Мощность, рассеиваемая резистором $R_{Б2}$ в цепи базы транзистора,

$$P_{R_{Б2}} = \frac{\left[U_{БЭрт} + \left(I_{Крт} + I_{Брт}\right)R_Э\right]^2}{R_{Б2}} . \qquad (37)$$

При выборе номинальной мощности резисторов необходимо исходить из того, что рассеиваемая ими мощность должна быть меньше номинальной. Более того, для надежной работы резисторов рекомендуется, чтобы рассеиваемая мощность не превышала 0,7 от номинальной [15]. Значения номинальной мощности рассеяния резисторов стандартизованы [16].

Допускаемое отклонение сопротивления резистора от номинального значения следует выбирать с учетом его влияния на значимые параметры каскада. Поскольку от сопротивления резисторов $R_{Б1}$, $R_{Б2}$, $R_Э$ существенно зависит режим работы каскада, а от сопротивления резистора $R_К$ – коэффициент усиления каскада по напряжению, то требования к допуску на сопротивление этих резисторов должны быть достаточно жесткими. Рекомендуется допуск ± 5%. Допускаемые отклонения от номинального значения сопротивления резисторов стандартизованы [17].

Большое количество типов резисторов, приводимых в справочниках [15,18–20], не означает, что все они могут быть использованы при проектировании. Многие из них уже не выпускаются или выпускаются, но их применение в новых разработках запрещено. Тип резисторов следует выбирать из числа перспективных резисторов общего применения, рекомендованных преподавателем.

Для выбора конденсаторов прежде всего необходимо знать их емкость. Рассчитайте емкость конденсаторов $C_Б$,$C_К$,$C_Э$ по формулам (12) – (14), полагая нижнюю граничную частоту полосы пропускания каскада $f_н = 50$ Гц, а сопротивление источника сигнала $R_С = 60$ Ом. Поскольку минусовой допуск у конденсаторов с оксидным диэлектриком обычно составляет 20 %, то номинальная емкость конденсатора должна быть не менее чем на 20 % больше рассчитанного значения. Таким образом, емкости конденсаторов $C_Б$,$C_К$,$C_Э$, рассчи-

танные по формулам (12) – (14), следует увеличить на 20 % и взять ближайшее большее значение по ряду Е6 [9] (см. приложение).

Для выбора конденсаторов необходимо также рассчитать рабочие напряжения, при которых они будут работать в усилителе. Постоянное напряжение на конденсаторе в цепи базы $C_Б$

$$U_{C_Б} = U_{БЭрт} + \left(I_{Крт} + I_{Брт}\right)R_Э . \qquad (38)$$

Постоянное напряжение на конденсаторе в цепи коллектора $C_К$

$$U_{C_К} = E - I_{Крт}\, R_К . \qquad (39)$$

Постоянное напряжение на конденсаторе в цепи эмиттера $C_Э$

$$U_{C_Э} = \left(I_{Крт} + I_{Брт}\right)R_Э . \qquad (40)$$

Номинальное напряжение соответствующего конденсатора должно с некоторым запасом превышать рабочее напряжение, рассчитанное по формулам (38) – (40). Номинальные постоянные напряжения конденсаторов стандартизованы [10]. Не следует применять конденсаторы с номинальным напряжением, значительно превышающем рабочее, так как при этом необоснованно увеличатся масса, габариты и стоимость усилителя.

Тип конденсатора следует выбирать по номинальной емкости и номинальному напряжению из числа перспективных конденсаторов с оксидным диэлектриком [18–22], рекомендованных преподавателем.

4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа должна быть оформлены в виде пояснительной записки объемом 15 ÷ 20 листов, аккуратно выполненной на стандартных листах белой писчей бумаги формата А4 (210 × 297мм). Текст работы следует располагать на одной стороне листа. Вторая сторона листа впоследствии может быть использована для внесения исправлений. ***Все страницы пояснительной записки должны быть пронумерованы*** (за исключением титульного листа, который входит в нумерацию, но номер на нем не проставляется).

Пояснительная записка может быть выполнена компьютерным (предпочтительно), машинописным или рукописным способом. В последнем случае почерк должен быть разборчивым, а чернила должны быть одного цвета: синего, фиолетового или черного.

По всем четырем сторонам листа должны оставаться поля. Минимальные размеры полей: слева – 30 мм, справа – 10 мм, сверху – 15 мм и снизу – 20 мм.

Оформление текста должно соответствовать требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 2105–95 [23].

Принимаемые решения должны сопровождаться необходимыми пояснениями со ссылками на соответствующие законы, правила и рекомендации.

Все буквенные обозначения физических величин должны быть указаны на рисунке или пояснены в тексте.

Расчет рекомендуется выполнять на вычислительных машинах, указав использованное программное обеспечение. ***Точность приближенных вычислений должна, как правило, обеспечивать в результате три значащие цифры***.

Расчет численных значений физических величин должен быть оформлен следующим образом: после расчетной формулы, записанной в буквенных обозначениях, в нее подставляют численные значения величин, а затем приводят результат вычислений и обозначение единицы физической величины без скобок.

Чертеж принципиальной схемы рекомендуется выполнять компьютерным способом на листе белой писчей бумаги формата А4 (допускается вычерчивание схемы вручную) с соблюдением всех требований соответствующих стандартов. На листе должны быть нанесены рамка и основная надпись по ГОСТ 2.104–68 [24]. Схема должна быть выполнена с соблюдением правил по ГОСТ 2.701–84 [25] и ГОСТ 2.702–75 [26]. Условные графические обозначения элементов усилителя должны соответствовать стандартам [27 – 29]. ***Для полярных конденсаторов на схеме следует указать полярность их включения***. Всем элементам схемы должны быть присвоены позиционные буквенно-цифровые обозначения по ГОСТ 2.710–81 [30]. ***Принципиальную схему следует поместить за последним листом пояснительной записки***.

Перечень элементов рекомендуется выполнять на отдельном листе белой писчей бумаги формата А4. Правила составления перечня элементов изложены в ГОСТ 2.701–84 [25]. ***Перечень элементов следует поместить за принципиальной схемой***.

Листы пояснительной записки, схема и перечень элементов должны быть помещены в папку-скоросшиватель или скреплены скобками в двух-трех точках на расстоянии 10 мм от левого края

листа. ***Использование скрепок и пластиковых конвертов (файлов) не допускается***.

Если работа возвращена для исправлений, то после исправления ошибок ее следует сдать на повторную проверку. ***При сдаче работы на повторную проверку замена титульного листа не допускается***.

Исправления следует вносить путем зачеркивания неправильного результата и вписывания правильного результата выше или правее неправильного. ***Не допускается закрашивание неправильного результата и замечаний преподавателя***. Для внесения исправлений большого объема можно использовать обратную сторону предыдущего листа.

Если для внесения исправлений необходимо заменить лист полностью, то ***изъятый лист с замечаниями преподавателя следует вложить в работу (не вшивая) перед исправленным листом***.

Если работа переоформлена полностью, то предыдущий вариант работы с замечаниями преподавателя должен быть вложен в исправленный текст (за исключением титульного листа, который должен быть перенесен на исправленный текст).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств : учеб. пособие для студ. вузов / В.Н. Павлов. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 288 с.
2. Павлов В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств : учебник для вузов. – 2-е изд., исправ. / В.Н. Павлов, В.Н. Ногин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2001. – 320 с.
3. Гусев В.Г. Электроника и микропроцессорная техника : учебник для вузов. – В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – 5-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2008. – 798 с.
4. Скаржепа В.А. Электроника и микросхемотехника. Ч. 1. Электронные устройства информационной автоматики : Учебник / В.А. Скаржепа, А.Н. Луценко; Под общ. ред. А.А. Краснопрошиной. – Киев : Вища шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.
5. Амплитудно-частотная характеристика многокаскадного усилителя в области низких частот / В.А. Матвиенко // Научные труды международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2007» в рамках 4го Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2007». – Екатеринбург : ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2007. – С. 97-99.
6. Агаханян Т.М. Линейные импульсные усилители / Т.М. Агаханян. – М. : Связь, 1970. – 472 с.
7. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И.П. Степаненко. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1977. – 672 с.
8. ГОСТ 20003–74. Транзисторы биполярные. Термины, определения и буквенные обозначения параметров. – М. : Издательство стандартов, 1983. – 28 с.
9. Транзисторы для аппаратуры широкого применения : Справочник / К.М. Брежнева, Е.И. Гантман, Т.И. Давыдова и др. Под ред. Б.Л. Перельмана. – М. : Радио и связь, 1981. – 656 с.
10. ГОСТ 28884–90. Ряды предпочтительных значений для резисторов и конденсаторов. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 12 с.
11. Булычев А.Л. Электронные приборы / А.Л. Булычев,П.М. Лямин, Е.С. Тулинов. – М. : Лайт Лтд, 2000. – 416 с.
12. Прянишников В.А. Электроника. Полный курс лекций : учебник / В.А. Прянишников. – СПб. : Корона-Век, 2010. – 416 с.

13. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей / В.С. Андреев. – М. : Связь, 1972. – 328 с.
14. Радиотехника : Энциклопедия / Под ред. Ю.Л. Мазора, Е.А. Манчусского, В.И. Правды. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 944 с.
15. Резисторы : Справочник / В.В. Дубровский, Д.М. Иванов, Н.Я. Пратусевич и др.; Под ред. И.И. Четверткова и В.М. Терехова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1991. – 528 с.
16. ГОСТ 9663–75. Резисторы. Ряд номинальных мощностей рассеяния. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 2 с.
17. ГОСТ 9664–74. Резисторы. Допускаемые отклонения от номинального значения сопротивления. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 2 с.
18. Аксенов А.И. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры. Конденсаторы. Резисторы : Справочник / А.И. Аксенов, А.В. Нефедов. – М. : Радио и связь, 1995. – 272 с. – (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1203).
19. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА : Справочник / Н.Н. Акимов, Е.П. Ващуков, В.А. Прохоренко, Ю.П. Ходоренок. – Минск : Беларусь, 1994. – 591 с.
20. Партала О.Н. Радиокомпоненты и материалы : Справочник / О.Н. Партала. – Киев : Радіоаматор, М. : КУбК-а, 1998. –720 с.
21. Справочник по электрическим конденсаторам / М.Н. Дьяконов, В.И. Карабанов, В.И. Присняков и др.; Под общ. ред. И.И. Четверткова и В.Ф. Смирнова. – М. : Радио и связь, 1983. – 576 с.
22. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки : Справочник / В.П. Берзан, Б.Ю. Геликман, М.Н. Гураевский и др.; Под ред. Г.С. Кучинского. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 656 с.
23. ГОСТ 2.105–95. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. – М. : Издательство стандартов, 2001. – 26 с.
24. ГОСТ 2.104–68. ЕСКД. Основные надписи. – М. : Издательство стандартов, 2001. – 10 с.
25. ГОСТ 2.701–84. ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 21 с.
26. ГОСТ 2.702–75. ЕСКД. Правила выполнения электрических схем. – М. : Издательство стандартов, 2000. – 23 с.

27. ГОСТ 2.728–74. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы. – М. : Издательство стандартов, 1995. – 24 с.
28. ГОСТ 2.730–73. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые. – М. : Издательство стандартов, 1995. – 39 с.
29. ГОСТ 2.747–68. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Размеры условных графических обозначений. – М. : Издательство стандартов, 1992. – 6 с.
30. ГОСТ 2.710–81. ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 17 с.
31. Матвиенко В.А. Изделия электронной техники : библиографический указатель справочной литературы : методические указания по курсовому и дипломному проектированию / В.А. Матвиенко. – Екатеринбург : УГТУ, 1995. – 16 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

РЯДЫ НОМИНАЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ РЕЗИСТОРОВ И ЕМКОСТЕЙ КОНДЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ ПО ГОСТ 28884–90 (МЭК 63–63)

Номинальные сопротивления резисторов и емкостей конденсаторов постоянной емкости с допускаемыми отклонениями ±5% и более должны соответствовать числам, приведенным в таблице, и числам, полученным путем умножения этих чисел на 10^n, где n – целое положительное или отрицательное число.

<table>
<tr><th colspan="4">Обозначение рядов</th></tr>
<tr><th>E24</th><th>E12</th><th>E6</th><th>E3</th></tr>
<tr><th>Допуск ±5%</th><th>Допуск ±10%</th><th>Допуск ±20%</th><th>Допуск > ±20%</th></tr>
<tr><td>1,0</td><td rowspan="2">1,0</td><td rowspan="4">1,0</td><td rowspan="8">1,0</td></tr>
<tr><td>1,1</td></tr>
<tr><td>1,2</td><td rowspan="2">1,2</td></tr>
<tr><td>1,3</td></tr>
<tr><td>1,5</td><td rowspan="2">1,5</td><td rowspan="4">1,5</td></tr>
<tr><td>1,6</td></tr>
<tr><td>1,8</td><td rowspan="2">1,8</td></tr>
<tr><td>2,0</td></tr>
<tr><td>2,2</td><td rowspan="2">2,2</td><td rowspan="4">2,2</td><td rowspan="8">2,2</td></tr>
<tr><td>2,4</td></tr>
<tr><td>2,7</td><td rowspan="2">2,7</td></tr>
<tr><td>3,0</td></tr>
<tr><td>3,3</td><td rowspan="2">3,3</td><td rowspan="4">3,3</td></tr>
<tr><td>3,6</td></tr>
<tr><td>3,9</td><td rowspan="2">3,9</td></tr>
<tr><td>4,3</td></tr>
<tr><td>4,7</td><td rowspan="2">4,7</td><td rowspan="4">4,7</td><td rowspan="8">4,7</td></tr>
<tr><td>5,1</td></tr>
<tr><td>5,6</td><td rowspan="2">5,6</td></tr>
<tr><td>6,2</td></tr>
<tr><td>6,8</td><td rowspan="2">6,8</td><td rowspan="4">6,8</td></tr>
<tr><td>7,5</td></tr>
<tr><td>8,2</td><td rowspan="2">8,2</td></tr>
<tr><td>9,1</td></tr>
</table>