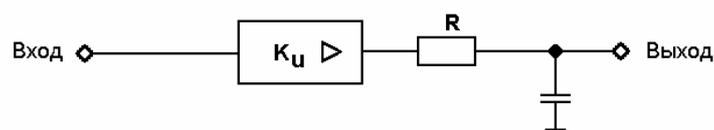


РАСЧЕТ И АНАЛИЗ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ТРАНЗИСТОРАХ



◆ Издательство ТГТУ ◆

УДК 621.375.4
ББК 3846
С 291

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Рецензент
Доктор технических наук, профессор
В. Н. Чернышов

С291 Расчет и анализ усилительных устройств на транзисторах: Метод. указ. / Сост. З.М. Селиванова, Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 24 с.

Представлены методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «Общая электротехника и электроника», в которых приводится методика расчета и анализа характеристик многокаскадных усилителей переменного тока на биполярных транзисторах.

Методические указания по курсовому проектированию предназначены для студентов дневного и заочного отделений специальности 2008.

УДК 621.375.4
ББК 3846

© Тамбовский государственный
2003

технический университет, (ТГТУ),

Министерство образования Российской Федерации
Тамбовский государственный технический университет

**РАСЧЕТ И АНАЛИЗ
УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
НА ТРАНЗИСТОРАХ**

Методические указания по курсовому
проектированию для студентов 2, 3 курсов
дневной и заочной форм обучения
специальности 2008

Тамбов
Издательство ТГТУ

2003

Учебное издание

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ
УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
НА ТРАНЗИСТОРАХ

Методические указания

Составитель СЕЛИВАНОВА Зоя Михайловна

Редактор Т. М. Федченко
Компьютерное макетирование М. А. Филатовой

Подписано в печать 05.02.2003
Формат 60 × 84 / 16. Бумага газетная. Печать офсетная.
Гарнитура Times New Roman. Объем: 1,39 усл. печ. л.; 1,41 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. С. 80

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета,
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей курсового проекта по дисциплине "Общая электротехника и электроника" является приобретение навыков самостоятельного инженерного расчета современных усилителей.

При проектировании усилительных устройств значительное внимание уделяется расчету и анализу электрических многокаскадных усилителей.

При расчете усилителей первоочередной задачей является проведение сравнительного анализа схемотехники усилителей аналогичного назначения. Кроме того, необходимо учитывать новейшие достижения усилительной техники и современной элементной базы.

1 Цель и задачи курсового проектирования

Целью курсового проекта является:

- обобщение и закрепление знаний, полученных по дисциплине "Общая электротехника и электроника";
- расширение знаний студентов о процессах, протекающих в электронных средствах и методах их анализа;
- развитие навыков практического применения теоретических знаний и принятия инженерных решений;
- освоение методов расчета усилительных устройств с использованием средств вычислительной техники.

2 Содержание и объем курсового проекта

Проект выполняется в соответствии с индивидуальным заданием, разработанным руководителем. Вариант задания определяется двумя последними цифрами номера зачетной книжки.

Курсовой проект включает пояснительную записку и графическую часть. Объем пояснительной записки 25 – 30 страниц. Пояснительная записка и графическая часть проекта оформляются согласно стандарту предприятия "Проекты (работы) дипломные и курсовые". Правила оформления СТП ТГТУ 07-97, изданного в 2002 году.

В соответствии с утвержденным заданием на курсовой проект пояснительная записка включает следующие основные разделы:

- 1 схема усилительного каскада с RC-связями;
- 2 составление схемы замещения усилительного каскада с RC-связями;
- 3 определение передаточных функций усилительного каскада с RC-связями;
- 4 построение частотных характеристик многокаскадного усилителя
 - 4.1 АЧХ и ФЧХ интегрирующей RC-цепи
 - 4.2 АЧХ и ФЧХ многокаскадного усилителя
- 5 расчет трехкаскадного усилителя переменного тока.

Графическая часть проекта выполняется на двух листах ватмана формата А1. На одном листе выполняется принципиальная электрическая и эквивалентная схемы усилительного устройства, а на другом – частотные характеристики усилителя.

Обозначение элементов на электрических схемах выполняется согласно ГОСТ-2.701-2.759–68(71). Перечень элементов к электрической схеме оформляется по ГОСТ-2.701–84 (Прил. А).

3 МЕТОДИКА РАСЧЕТА И АНАЛИЗА МНОГОКАСКАДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Многокаскадные усилители применяются в тех случаях, когда простейшие однокаскадные усилители не удовлетворяют по тем или иным параметрам:

- недостаток и нестабильность усиления;
- большие нелинейные искажения;
- низкая нагрузочная способность;
- минимум выходного напряжения шумов.

Кроме того, многокаскадные усилители предназначены для получения больших значений коэффициента усиления. Принцип построения многокаскадных усилителей заключается в последовательном соединении нескольких одиночных каскадов. При этом решается задача согласования входных и выходных сигналов различных каскадов как по постоянному, так и по переменному току.

По виду межкаскадных связей усилители классифицируются на две группы: усилители переменного тока; усилители постоянного тока. К первой группе относятся усилители с трансформаторными и RC-связями, а ко второй – усилители с гальваническими связями.

Особенностью усилителей первой группы является отсутствие между отдельными каскадами связи по постоянному току. Ввиду этого в каждом отдельном каскаде можно установить наиболее оптимальный режим работы по постоянному току, например, с точки зрения коэффициента усиления или вносимых искажений. Однако, если в этих усилителях входной сигнал кроме переменной содержит и постоянную составляющую, то после усилителя информация о постоянной составляющей будет потеряна.

В усилителях с гальваническими связями необходимо согласование сигналов как по постоянному, так и по переменному току. Это накладывает определенные ограничения на выбор режимов работы транзисторов и в большинстве случаев существенно затрудняет проектирование усилителя. Курсовое проектирование посвящено усилителям с RC-связями, как наиболее совместимым с методами современной технологии.

3.1 Схема усилительного каскада с RC-связями

При проектировании усилителей переменного тока необходимо правильно выбирать элементы межкаскадной связи, поскольку именно эти элементы в большей степени определяют полосу пропускания усилителя. Основным критерием выбора элементов межкаскадной связи является уровень вносимых частотных искажений. Задачей расчета является обеспечение уровня вносимых искажений не больше заданного, т.е. обеспечение требуемой полосы пропускания усилителя.

Принцип расчета цепей межкаскадных связей одинаков для усилителей как на биполярных транзисторах, так и на полевых транзисторах. Поэтому методику их расчета рассмотрим на примере усилителя на биполярных транзисторах, выполненного по схеме с общим эмиттером.

Схема транзисторного каскада с элементами RC-связи приведена на рис. 1. Конденсаторы C_{p1} и C_{p2} предназначены для разделения режимов отдельных каскадов по постоянному току и называются разделительными. Очевидно, что для последующего каскада выходной разделительный конденсатор C_{p2} выполняет роль входного.

Конденсатор C_{p2} выполняет роль входного. Поэтому для одиночного каскада расчет сводится к выбору разделительного конденсатора C_{p1} .

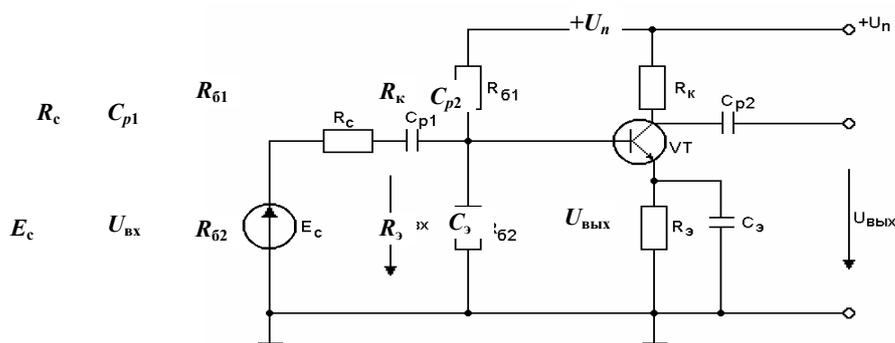


Рис. 1 Усилительный каскад с RC-связями

Конденсатор $C_э$ предназначен для формирования частотной характеристики, поэтому его расчет проводится совместно с расчетом цепей межкаскадной связи.

3.2 Составление схемы замещения усилительного каскада с RC-связями

Входная цепь каскада (рис. 1), в области средних частот может быть представлена схемой замещения, показанной на рис. 2.

Очевидно, что для последующего каскада сопротивление R_c определяется выходным сопротивлением предыдущего каскада

$$R_c = R_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_k R_{\text{ВЫХ}/T}}{(R_k + R_{\text{ВЫХ}/T})} = R_k.$$

Приведение R_3 к базовой цепи выполнено из условия $R'_3 = R_3 = R_3 h_{213}$, а C'_3 – из условия постоянства вносимой этими двумя элементами постоянной времени $\tau = R_3 C_3 = R'_3 C'_3$.

Рассматриваемая схема содержит две реактивности, следовательно, она описывается дифференциальным уравнением второго порядка, и ее передаточная функция имеет второй порядок.

Если выполнять условия о соблюдении свойства однонаправленности передачи сигнала и разнесении постоянных времени, характеризующих воздействие отдельных реактивностей на суммарную частотную характеристику, то схему, приведенную на рис. 2, можно разделить на две независимые цепи первого порядка. Это существенно упрощает расчет усилителя.

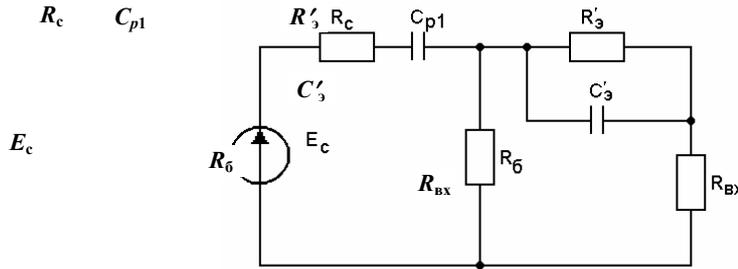


Рис. 2 Схема замещения усилительного каскада с RC-связями:

$$R_6 = \frac{R_{61} R_{62}}{R_{61} + R_{62}} \text{ — эквивалентное сопротивление входного делителя по}$$

переменному току; $R'_3 = h_{213} R_3$ — приведенное к базовой цепи сопротивление резистора R_3 ; $C'_3 = C_3 / h_{213}$ — приведенное к базовой цепи значение емкости C_3 ;

R_c — выходное сопротивление источника входного сигнала;

$R_{ВХ} = h_{113}$ — собственное входное сопротивление транзистора

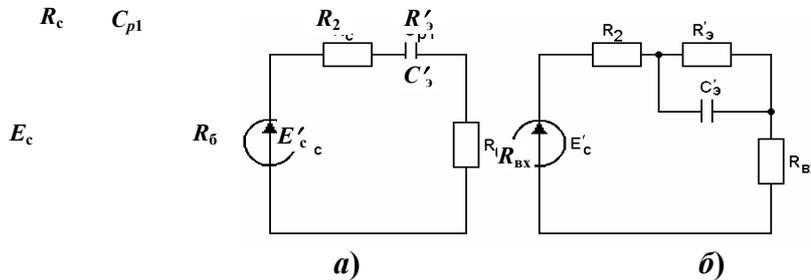


Рис. 3 Представление схемы замещения рисунка 2 элементарными звеньями

Предположим, что указанные выше условия выполняются путем разнесения постоянных времени. Тогда схему на рис. 2 можно разделить на две самостоятельные цепи, показанные на рисунке 3, а, б.

Сопротивление R_2 на рисунке 3, б представляет выходное сопротивление схемы на рисунке 3, а.

При выполнении условия разнесения постоянных времени для сопротивления R_c справедливо выражение $R_2 = \frac{R_c R_6}{(R_c + R_6)}$.

3.3 Определение передаточных функций схем замещения усилительного каскада с RC-связями

Передаточные функции для полученных схем замещения имеют соответственно вид

$$W_1(p) = \frac{T_{11} p}{(T_{12} + 1)};$$

$$W_2(p) = \frac{K(T_{21}p + 1)}{(T_{22}p + 1)},$$

где $T_{11} = R_6 C_{p1}$, $T_{12} = (R_c + R_6)C_{p1}$, $T_{21} = R'_3 C'_3$; $T_{22} = \frac{(R_2 + R_{\text{вх}})C'_3 R'_3}{(R_2 + R_{\text{вх}} + R'_3)}$, $K = \frac{R_{\text{вх}}}{(R_2 + R_{\text{вх}} + R'_3)}$.

Справедливость такого разбиения будет соблюдаться при $T_{12} > T_{21}$. Вышесказанное представлено логарифмической амплитудно-частотной характеристикой (ЛАЧХ) рассматриваемого каскада (рис. 4).

Передаточная функция $W_1(p)$ в числителе содержит идеальное дифференцирующее звено, асимптотическая частотная характеристика которого имеет наклон $+20$ дБ/дек. Этот наклон будет сохраняться от очень низкой (практически нулевой) частоты до частоты, определяемой постоянной времени знаменателя, $\omega_{12} = 1/T_{12}$.

Передаточная функция $W_2(p)$ обеспечивает на низких частотах нулевой наклон частотной характеристики, а далее для частоты $\omega > \omega_{21}$ наклон $+20$ дБ/дек. Так как $T_{22} < T_{21}$, этот наклон будет продолжаться до частоты $\omega_{22} = 1/T_{22}$, после которой знаменатель $W_2(p)$ позволяет получить асимптоту с наклоном -20 дБ/дек. Следовательно, после $\omega = \omega_{22}$ суммарный наклон частотной характеристики второго звена будет равен нулю.

Если $\omega_{12} < \omega_{21}$, а это необходимо для достоверности приведенных выражений, то суммарную частотную характеристику каскада можно построить простым суммированием обеих полученных характеристик.

Таким образом, разделительные и эмиттерные цепи усилительного каскада формируют низкочастотную часть частотной характеристики усилительного каскада и легко могут быть рассчитаны либо по заданной низкочастотной границе полосы пропускания, либо по требуемой величине частотных искажений.

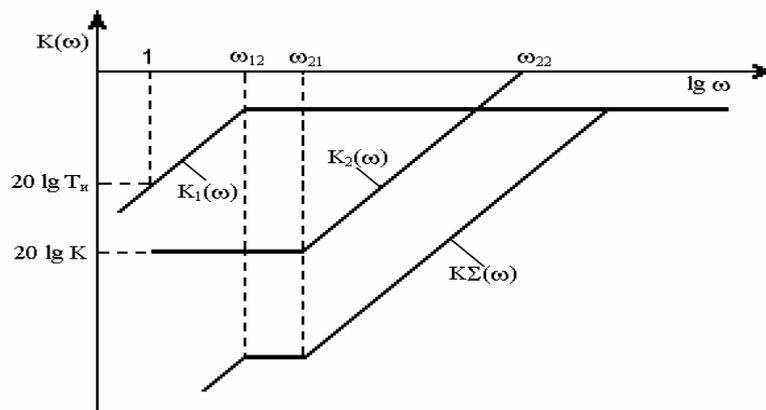


Рис. 4 ЛАЧХ схемы замещения усилительного каскада

При расчете реальных частотонезависимых цепей необходимо помнить, что ЛАЧХ усилителя строится в масштабе круговой частоты ω поэтому, если частота пропускания усилителя задана в герцах, ее необходимо перевести в круговую частоту с учетом соотношения $\omega = 2\pi f$. Кроме того, если в усилителе не предусмотрено формирование высокочастотной части его характеристики, то верхняя граница полосы пропускания будет определяться собственными частотными свойствами используемых полупроводниковых приборов.

3.4 Построение амплитудных и фазовых частотных характеристик многокаскадного усилителя

На рис. 5 представлена структурная схема транзисторного многокаскадного усилителя с n -каскадами усиления.

В многокаскадном усилителе каждый каскад представлен в виде последовательного соединения идеального без инерционного усилительного звена с коэффициентом усиления K_i , нелинейного элемента НЭ и фильтра нижних частот (ФНЧ) с частотой среза f_i (где $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – номер каскада). Отдель-

ные каскады охвачены ООС различной глубины $F_i = 1 + \beta_i K_i$, где β_i – коэффициент передачи сигнала цепью ООС. Коэффициент усиления отдельного каскада с учетом местной ООС равен

$$A_i = K_i / (1 + K_i \beta_i).$$

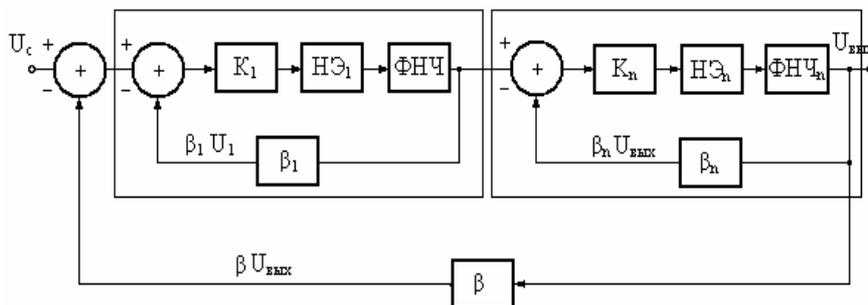


Рис. 5 Структурная схема транзисторного усилителя с цепями ООС

Коэффициент усиления всего усилителя с учетом общей ООС, имеющей коэффициент передачи β , равен

$$K = A_0 / (1 + A_0 \beta),$$

где $A_0 = A_1 A_2 A_3 \dots A_n$ – коэффициент всего усилителя без влияния общей ООС.

ФНЧ в схеме на рис. 5 приближенно можно считать интегрирующей RC -цепью (рис. 6, а). Их число, как правило, соответствует количеству независимых каскадов усиления, определяющих форму спада АЧХ в области высоких частот (ВЧ). Частота среза определяется постоянной времени $f_c = \frac{1}{2\pi t_b} = \frac{1}{2\pi RC}$.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная характеристика (ФЧХ) RC -цепи соответственно описывается уравнениями:

$$K_u = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}}, \quad \varphi = \arctg(-f/f_c).$$

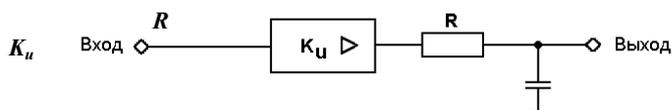
На частоте среза $f = f_c$ коэффициент передачи падает до уровня 0,7 (–3 дБ), а набег фазы составляет 45° ($\pi/4$). На рис. 6, б, в показаны логарифмические АЧХ и ФЧХ. При этом считается, что $K_u = f_c/f$, что дает ошибку на частоте f_c , равную –3дБ. Изменение текущей частоты в десять раз (на декаду) приводит к уменьшению коэффициента передачи также в десять раз (–20дБ), то есть скорость высокочастотного спада за частотой среза f_c составляет –20дБ/дек (или –6 дБ/октава при изменении частоты в два раза).

ФЧХ RC -цепи описывается тангенсоидой. При логарифмическом масштабе по оси частот отсчет не может начинаться с нуля, поэтому ФЧХ RC -цепи в одинарном логарифмическом масштабе удобно аппроксимировать ломаной линией, имеющей скачок –90 на частоте f_c . Иногда применяется другая аппроксимация:

$$\varphi(f) = \begin{cases} 0 & \text{при } f < f_c/10; \\ 45(1 + \lg 2\pi ft) & \text{при } f_c/10 < f < 10f_c; \\ 90 & \text{при } f > 10f_c. \end{cases}$$

В этом случае ФЧХ можно представить тремя отрезками прямых. Изломы асимптотической ФЧХ соответствуют частотам $f_c/10$ и $10f_c$ (рис. 6, з).

В МНОГОКАСКАДНОМ УСИЛИТЕЛЕ СУММАРНАЯ АЧХ ИМЕЕТ НЕСКОЛЬКО ИЗЛОМОВ В СООТВЕТСТВИИ С ПОСТОЯННЫМИ ВРЕМЕНИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ RC -ЦЕПЕЙ, КАЖДАЯ ИЗ КОТОРЫХ УВЕЛИЧИВАЕТ СКОРОСТЬ СПАДА НА 20ДБ (РИС. 7). ДЛЯ ПОВЫ-



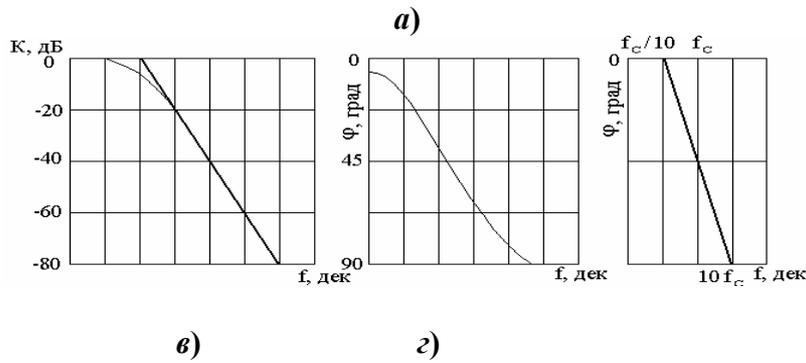


Рис. 6 Эквивалентная схема усилительного каскада (а), его логарифмические АЧХ (б) и ФЧХ (в, г)

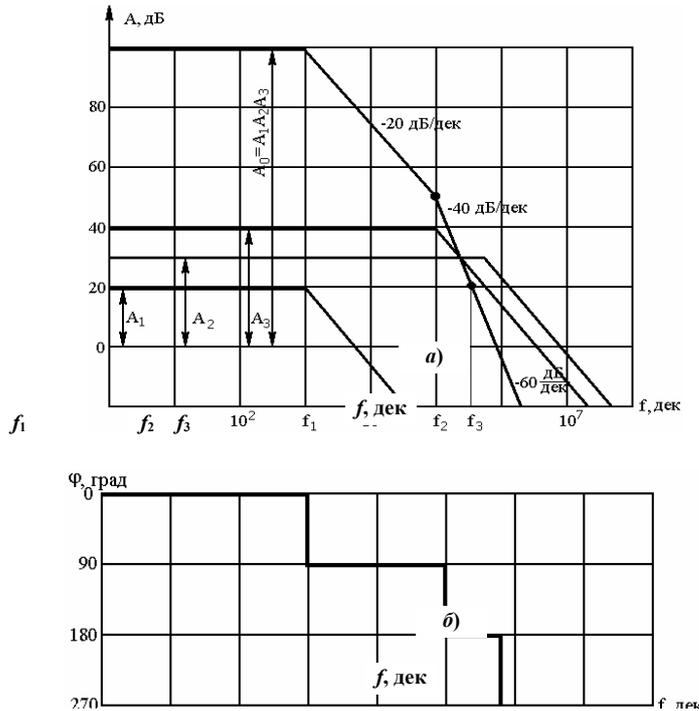


Рис. 7 Формирование ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) трехкаскадного усилителя ШЕННИНГА СТАБИЛЬНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКАСКАДНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ОХВАТЫВАЕТСЯ ОБЩЕЙ ООС, КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ ЦЕПИ КОТОРОЙ РАВЕН β (СМ. РИС. 5).

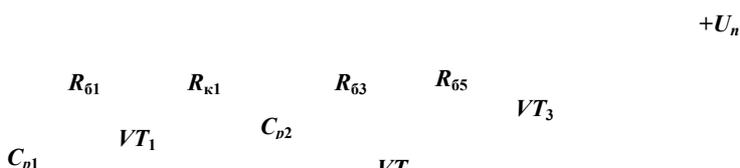
4 Задание на курсовое проектирование

8. Рассчитать схему трехкаскадного усилителя переменного тока с RC -связями, приведенную на рис.

В приведенной на рис. 8 схеме многокаскадного усилителя переменного тока первый и второй каскады усиления выполнены по схеме с общим эмиттером, при этом в каждом из них использована последовательная ООС по току нагрузки для обеспечения температурной стабилизации режима покоя.

Третий каскад усиления выполнен по схеме эмиттерного повторителя, что позволяет уменьшить выходное сопротивление усилителя.

Для формирования высокочастотной части характеристики усилителя использована цепь общей последовательной ООС по выходному напряжению, которая увеличивает входное и уменьшает выходное сопротивление



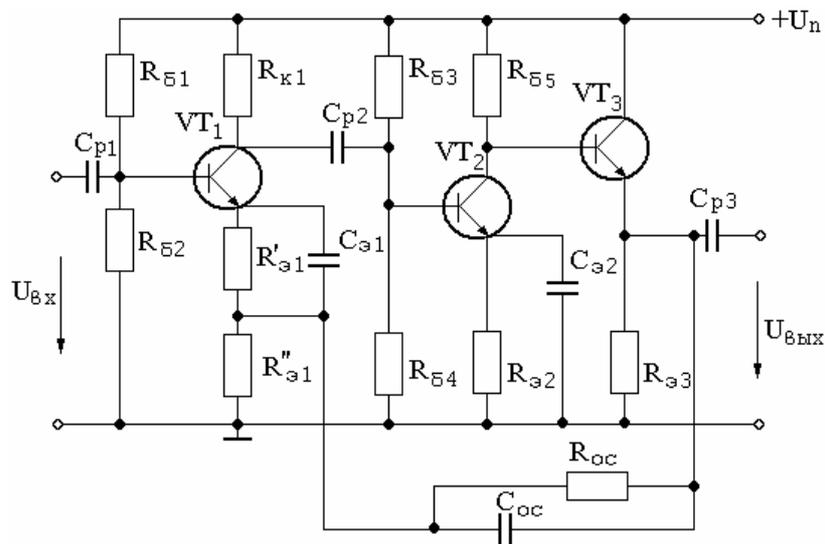


Рис. 8 Схема трехкаскадного усилителя переменного тока с *RC*-связями усилителя. Для введения этой связи эмиттерный резистор транзистора *VT1* разбит на два последовательно включенных. Это позволяет в первом каскаде усиления сохранить достаточный коэффициент усиления по переменному току при требуемой стабильности режима покоя.

Исходные данные для расчета усилителя приведены в табл. 1.

1 Исходные данные для расчета усилителя

Номер варианта	U_n , В	R_n , Ом	f_n , Гц	f_b , Гц	$K_u \Sigma$	U_m , В
1	20	45	19	$8 \cdot 10^4$	94	4
2	20	49	16	$9 \cdot 10^4$	96	8
3	20	46	17	$7 \cdot 10^4$	97	5
4	20	47	18	$5 \cdot 10^4$	95	7
5	20	47	18	$3 \cdot 10^4$	99	6
6	20	50	20	$4 \cdot 10^4$	94	8
7	20	47	21	$2 \cdot 10^4$	96	4
8	20	45	15	$7 \cdot 10^4$	97	7
9	20	49	17	$9 \cdot 10^4$	95	5
10	20	46	16	$8 \cdot 10^4$	99	8
11	20	48	19	$5 \cdot 10^4$	98	6
12	20	47	17	$3 \cdot 10^4$	97	5
13	20	45	20	$2 \cdot 10^4$	94	7
14	20	49	18	$7 \cdot 10^4$	95	6
15	20	50	15	$8 \cdot 10^4$	96	8
16	20	48	17	$9 \cdot 10^4$	99	4
17	20	46	16	$5 \cdot 10^4$	97	5
18	20	49	19	$6 \cdot 10^4$	94	8
19	20	45	21	$4 \cdot 10^4$	98	6
20	20	49	15	$2 \cdot 10^4$	99	7

21	20	47	18	$3 \cdot 10^4$	97	4
----	----	----	----	----------------	----	---

Продолжение табл. 1

Номер варианта	U_n , В	R_n , Ом	f_n , Гц	f_b , Гц	$K_u \Sigma$	U_m , В
22	20	48	22	$7 \cdot 10^4$	96	6
23	20	46	17	$9 \cdot 10^4$	95	5
24	20	49	16	$6 \cdot 10^4$	98	8
25	20	45	20	$4 \cdot 10^4$	99	6
26	20	50	18	$8 \cdot 10^4$	95	7
27	20	48	19	$2 \cdot 10^4$	94	5
28	20	46	15	$3 \cdot 10^4$	96	4
29	20	47	17	$7 \cdot 10^4$	97	8
30	20	49	20	$5 \cdot 10^4$	98	6

5 МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

1 В соответствии со своим вариантом, который определяется двумя последними цифрами номера зачетной книжки, выписывают исходные данные для расчета из таблицы 1:

$$U_n = 20 \text{ В}; R_n = 51 \text{ Ом}; f_n = 20 \text{ Гц}; f_b = 2 \cdot 10^4 \text{ Гц}; K_u \Sigma = 100; U_m = 7 \text{ В}.$$

2 Рассчитывают каскад на транзисторе VT_3 . При этом определяют максимальный эмиттерный ток транзистора VT_3 из условия, что на рабочей частоте резисторы $R_{э3}$ и R_n включены параллельно:

$$I_{э3\max} = 2U_{m\text{вых}}(R_{э3} + R_n)/(R_{э3} \cdot R_n).$$

Минимальное падение напряжения на резисторе $R_{к2}$

$$U_{R_{к2}} \min = U_n - 2 \cdot U_{mн} - U_{бэ3} - U_{кэ2}.$$

Сопротивление резистора $R_{к2}$

$$R_{к2} = U_{R_{к2}} \min (h_{21э3} + 1) / I_{э3\max}.$$

Для обеспечения термостабильности каскада воспользуемся известным соотношением

$$R_б = R_э(S_i - 1),$$

где $S_i = 2 \dots 5$ – коэффициент неустойчивости.

Так как для каскада на транзисторе VT_3 $R_б = R_{к2}$, получаем

$$U_{R_{к2}} \min (h_{21э3} + 1) / I_{э3\max} = R_{э3}(S_i - 1).$$

Для выбора типа выходного транзистора допустим, что $R_n = R_{э3}$. Тогда транзистор должен отвечать следующим требованиям:

$$I_{к\max} \text{ доп} > 2U_{m\text{вых}}(2/R_n) = 0,55 \text{ А};$$

$$U_{кэ} \text{ доп} > U_n = 20 \text{ В};$$

$$f_p > f_b = 2 \cdot 10^4 \text{ Гц};$$

$$I_k > (U_n - U_m)^2 / R_n = (20 - 7)^2 / 51 = 3,31 \text{ Вт}.$$

По полученным данным, по справочнику выбирают транзистор КТ 815А со следующими параметрами: $U_{кэ} = 40 \text{ В}; I_{к\max} = 1,5 \text{ А}; P_k = 10 \text{ Вт}; h_{21э} = 40; f_{гр} = 5 \text{ МГц}.$

Полагая $U_{R_{э2}} = 2 \text{ В}, S_i = 5, U_{бэ3} = 0,8 \text{ В}$, с учетом выражения для минимального напряжения на резисторе $R_{к2}$, находят

$$R_{\beta 3} = \left[\frac{U_{R_3} \min(h_{21} + 1)}{2U_m (S_i - 1)} - 1 \right] R_H = 51 \left[\frac{3,2(40+1)}{2 \cdot 7(3-1)} - 1 \right] = 188 \text{ Ом.}$$

Принимают $R_{\beta 3} = 180 \text{ Ом.}$

3 Рассчитывают каскад на транзисторе VT_2 :

$$R_{\kappa 2} = \frac{3,2(40+1)51 \cdot 180}{2 \cdot 7(180+51)} = 372 \text{ Ом.}$$

Принимают $R_{\kappa 2} = 360 \text{ Ом.}$

Определяют ток покоя транзистора VT_2

$$I_{\kappa 2\pi} = \frac{U_{\pi} - U_{r\beta 2} - U_m - U_{\beta 3}}{R_{\kappa 2}} = \frac{20 - 2 - 7 - 0,8}{360} = 28 \text{ мА.}$$

$$R_{\beta 2} = U_{r\beta 2} / I_{\kappa 2\pi} = 2 / 28 = 71 \text{ Ом.}$$

Принимают $R_{\beta 2} = 68 \text{ Ом.}$

Транзистор VT_2 должен отвечать следующим требованиям:

$$I_{\kappa \text{ max доп}} > U_{\pi} / R_{\kappa 2} = 55 \text{ мА;}$$

$$U_{\kappa 3 \text{ max доп}} > U_{\pi} = 20 \text{ В;}$$

$$f_p > 2 \cdot 10^4 \text{ Гц;}$$

$$I_{\kappa \text{ max доп}} > I_{\kappa \pi} U_{\kappa \pi} = 28 \cdot 7 = 196 \text{ мВт.}$$

По полученным данным по справочнику выбирают транзистор КТ 503Б со следующими параметрами:

$$U_{\kappa 3 \text{ max доп}} = 25 \text{ В;}$$

$$I_{\kappa \text{ max доп}} = 150 \text{ мА;}$$

$$I_{\kappa \text{ max доп}} = 350 \text{ мВт;}$$

$$h_{21} = 80 - 120;$$

$$f_{\text{гр}} = 5 \text{ МГц.}$$

На основе известного расчетного соотношения: $R_{\beta} = R_{\beta}(S_i - 1)$ получают $R_{\beta 2} = R_{\beta 2}(S_i - 1) = 68(5 - 1) = 272 \text{ Ом.}$

Тогда $(R_{\beta 3} \cdot R_{\beta 4}) / (R_{\beta 3} + R_{\beta 4}) = R_{\beta 2}$;

$$U_{\pi} \cdot R_{\beta 4} (R_{\beta 3} + R_{\beta 4}) = U_{r\beta 2} + U_{\beta 3} = U_{\beta 2}.$$

Из приведенных выражений при условии $U_{\beta 3} = 0,75 \text{ В}$ находят:

$$R_{\beta 4} = \frac{R_{\beta 2} U_{\pi}}{U_{\pi} - U_{\beta 2}} = \frac{272 \cdot 20}{20 - 2,75} = 315 \text{ Ом} = 330 \text{ Ом;}$$

$$R_{\beta 3} = \frac{U_{\pi} - U_{\beta 2}}{U_{\beta 2}} R_{\beta 4} = \frac{20 - 2,75}{2,75} 330 = 2070 \text{ Ом} = 2 \text{ кОм.}$$

Ток покоя базы транзистора VT_2

$$I_{\beta 2\pi} = I_{\kappa 2\pi} / h_{21\beta} = 28 / 80 = 0,35 \text{ мА.}$$

Ток делителя на резисторах $R_{\beta 3}, R_{\beta 4}$

$$I_{\text{дел}} = U_{\pi} / (R_{\beta 3} + R_{\beta 4}) = 20 / (2,0 + 0,33) = 8,58 \text{ мА;}$$

$I_{\text{дел}} \gg I_{\beta 2\pi}$ — отвечает условию независимости выходного напряжения делителя $U_{\beta 2}$ от тока базы VT_2 .

Сопротивление нагрузки каскада на транзисторе VT_2

$$R_H = R_{\kappa 2} \parallel (R_{\beta 3} \parallel R_H) h_{21\beta 3} = 293 \text{ Ом.}$$

Коэффициент усиления каскада на транзисторе VT_2 без учета действия цепи местной ООС ($R_{\text{вх}} = 230 \text{ Ом}$)

$$K_{\text{иК}} = R_H h_{21\beta} / R_{\text{вх}} = 293 \cdot 80 / 230 = 101,9 = 102.$$

Сопротивление нагрузки для каскада на транзисторе VT_1 по переменному току

$$1/R_{H2} = 1/R_{\beta 3} + 1/R_{\beta 4} + 1/R_{\text{вх}} = 1/2 + 1/0,33 + 1/0,23;$$

$$R_{H2} = 127 \text{ Ом.}$$

4 Рассчитывают каскад на транзисторе VT_1 .

Резистор $R_{\kappa 1}$ определяют из условия

$$R_{\kappa 1} \gg R_{H2}.$$

Принимают $R_{к1} = 1$ кОм.

Ток покоя транзистора VT_1 в предположении, что $U_{к1} = U_{п}/2$, равен

$$I_{к1п} = (U_{п} - U_{к1})/R_{к1} = 10 \text{ мА.}$$

Транзистор VT_1 выбирают из условий:

$$I_{к} \text{ max доп} > U_{п}/R_{к1} = 20 \text{ мА};$$

$$U_{кз} \text{ max доп} > U_{п} = 20 \text{ В};$$

$$f_p > 2 \cdot 10^4;$$

$$I_{к} \text{ max доп} > I_{к1п} U_{кэп} = 100 \text{ мВт.}$$

Этим требованиям удовлетворяет транзистор КТ 315 Б:

$$U_{кз} = 20 \text{ В}, I_{к} = 100 \text{ мА}, I_{к} = 150 \text{ мВт},$$

$$h_{21э} = 50 \dots 350, f_{гр} = 250 \text{ МГц.}$$

Ток покоя базы транзистора VT_1

$$I_{б1п} = I_{кп}/h_{21э} \text{ min} = 10/50 = 0,2 \text{ мА.}$$

Принимают ток делителя на резисторах $R_{б1}, R_{б2}$ равным

$$I_{дел1} = 10 I_{б1п}.$$

Тогда

$$R_{б1} + R_{б2} = U_{п}/I_{д1} = 20(10 \cdot 0,2) = 10 \text{ кОм.}$$

Значение $R_{э1} = R'_{э1} + R''_{э1}$ находят из условия

$$R_{б} = R_{э}(S_i - 1) \text{ в предположении } S_i = 5,5 \text{ и } U_{бэ1} = 0,75 \text{ В}$$

$$R_{б1} \cdot R_{б2}/(R_{б1} + R_{б2}) = R_{э1}(S_i - 1);$$

$$U_{п} R_{б2}/(R_{б1} + R_{б2}) = U_{бэ1} + I_{к} R_{э1}.$$

Решая приведенные уравнения и округляя полученные значения до ближайших из стандартного ряда величин, находят $R_{э1} = 390 \text{ Ом};$

$$R_{б2} = \frac{(U_{бэ} + I_{к} R_{э1})(R_{б1} + R_{б2})}{U_{п}} = \frac{(0,7 + 10 \cdot 0,39)10}{20} = 2,3 \text{ кОм}$$

Принимают $R_{б2} = 2,4 \text{ кОм}; R_{б1} = 10 - R_{б2} = 10 - 2,4 = 7,6 \text{ кОм.}$ Принимают $R_{б1} = 7,5 \text{ кОм.}$

Для введения общей цепи ООС резистор $R_{э1}$ разделяют в соотношении

$$R'_{э1} = 360 \text{ Ом}; R''_{э1} = 30 \text{ Ом.}$$

Тогда коэффициент усиления каскада транзистора VT_1 по переменному току

$$K_{u1} = R_{н2} \parallel R_{к1}/R''_{э1} = 112/30 = 3,7.$$

Входное сопротивление усилителя для переменной составляющей находят из условия

$$1/R_{вх} = 1/R_{б1} + 1/R_{б2} + 1/(h_{21э1} R''_{э1}), \text{ откуда } R_{вх} = 0,82 \text{ кОм.}$$

5 Рассчитывают цепи связи и конденсаторы цепи местной ООС.

Расчет конденсаторов схемы выполняют, полагая, что разделительные и эмиттерные конденсаторы формируют значение $f_{н}$, а конденсатор $C_{ос}$ – значение $f_{в}$ усилителя. Так как усилитель трехкаскадный, то для получения требуемого значения $\omega_{н}$ необходимо, чтобы частота среза каждого каскада была равна $\omega_{срн} < \omega_{п}/2$. Тогда суммарный коэффициент усиления на частоте $\omega_{н}$ достигнет 3 дБ.

Используя выражения для усилителя с RC -связями, получим

$$1/\omega_{срн} = \frac{(R_2 + R_{вх})C_э R_э}{R_2} + R_{вх} + R_э;$$

$$R_2 = (R_б R_с)/(R_б + R_с);$$

$$(R_с + R_б)C_п = R_э C_э.$$

Тогда соответственно получим для каскада на транзисторе VT_1 :

$$R_2 = R_{б1} R_{б2}/(R_{б1} + R_{б2}) + h_{21э1} R''_{э1} = 3,32 \text{ кОм};$$

$$C_{\text{э1}} = \frac{(R_2 + R'_{\text{э1}})h_{21\text{э}}}{\omega_{\text{ср}}} R_2 \cdot R'_{\text{э1}} = \frac{(3,32 + 0,360 \cdot 50) \cdot 10^{-3}}{20\pi} \cdot 3,32 \cdot 0,36 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 284 \text{ мкФ};$$

$$\omega_{\text{ср}} = \pi \cdot f_{\text{н}} = 20\pi.$$

Принимаем $C_{\text{э1}} = 330 \text{ мкФ}$;

$$C_{\text{р1}} = 360 \cdot 330 \cdot 10^{-6} / 3320 = 36 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Принимают $C_{\text{р}} = 33 \text{ мкФ}$;

Для каскада на транзисторе VT_2 :

$$1/R_2 = 1/R_{\text{б3}} + 1/R_{\text{б4}} + 1/R_{\text{к1}},$$

откуда $R_2 = 220 \text{ Ом}$.

$$C_{\text{э2}} = \frac{220 + 68 \cdot 80}{20\pi} \cdot 220 \cdot 68 = 6020 \text{ мкФ}.$$

Принимают $C_{\text{э2}} = 6600 \text{ мкФ}$;

$$C_{\text{р2}} = 6600 \cdot 68 / 220 = 2 \cdot 10^3 = 2000 \text{ мкФ}.$$

Конденсатор $C_{\text{р3}}$ выбирают в предположении, что выходное сопротивление эмиттерного повторителя равно нулю. Тогда для выходной цепи справедлива передаточная функция $W(p) = T_1 p / (T_1 p + 1)$, где $T_1 = R_{\text{н}} C_{\text{р3}}$.

Отсюда $C_{\text{р3}} = 1/\omega_{\text{ср}} R_{\text{н}} = 1/20\pi \cdot 51 = 312 \text{ мкФ}$.

Принимают $C_{\text{р3}} = 330 \text{ мкФ}$

6 Рассчитывают цепи общей ООС.

Цепь общей ООС имеет передаточную функцию

$$W(p)_{\text{оос}} = K(T_1 p + 1) / (T_2 p + 1),$$

где:

$$K = R''_{\text{э1}} / (R''_{\text{э1}} + R_{\text{оос}});$$

$$T_1 = R_{\text{оос}} \cdot C_{\text{оос}};$$

$$T_2 = R_{\text{оос}} \cdot R''_{\text{э1}} \cdot C_{\text{оос}} / (R_{\text{оос}} + R''_{\text{э1}}).$$

Для расчета цепи ООС определяют частоты среза для каждого каскада характеризующихся собственными частотными свойствами транзисторов.

Для каскада на VT_1 : $f_{\text{ср1}} = 250 \cdot 10^6 / 350 = 714 \text{ кГц}$.

Для каскада на VT_2 : $f_{\text{ср2}} = 5 \cdot 10^6 / 120 = 41,6 \text{ кГц}$.

Для каскада на VT_3 : $f_{\text{ср3}} = 5 \cdot 10^6 / 40 = 125 \text{ кГц}$.

Следовательно, цепь ООС должна обеспечить спад частотной характеристики в диапазоне частот $f_{\text{н}} < f < f_{\text{ср2}}$.

Суммарный коэффициент усиления усилителя без цепи ООС

$$K_{\Sigma} = K_{u1} \cdot K_{u2} = 101,9 \cdot 3,7 = 377$$

Требуемый коэффициент усиления $K_u \Sigma = 100$.

Тогда коэффициент передачи цепи по постоянному току

$$b_{\text{оос}} = K = \frac{K_{\Sigma} - K_u \Sigma}{K_{\Sigma} \cdot K_u \Sigma} = \frac{377 - 100}{377 \cdot 100} = 7,35 \cdot 10^{-3}.$$

Отсюда $R_{\text{оос}} = R''_{\text{э1}} / K = 4083 \text{ Ом}$. Принимают $R_{\text{оос}} = 3,9 \text{ кОм}$

$$C_{\text{оос}} = \frac{1}{(\omega_{\text{в}} R_{\text{оос}})} = \frac{1}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 3,9 \cdot 10^3} = 2,0 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Принимают $C_{\text{оос}} = 2,2 \text{ нФ}$.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 Опадчий Ю.Ф., Глудкин О. П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника. М.: Радио и связь, 1996. 768 с.
- 2 Ежов Ю.А. Справочник по схемотехнике усилителей. М.: Радио Софт, 2002. 272 с.
- 3 Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. М.: Радио и связь, 1990. 512 с.
- 4 Зайцев А.А. Полупроводниковые приборы. Транзисторы малой мощности: Справочник. 2-е изд. / Под ред. А.В. Голомедова. М.: Радио и связь, КУБК-а, 1995. 384 с.
- 5 Зайцев А.А. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности: Справочник 3-е изд. / Под ред. А.В. Голомедова. М.: КУБК-а, 1995. 640 с.
- 6 Полупроводниковые приборы: Справочник / Под ред. Н.Н. Горюнова. М.: Энергоатомиздат, 1984.

ПРИЛОЖЕНИЕ А (СПРАВОЧНОЕ)

ПЕРЕЧЕНЬ ЭЛЕМЕНТОВ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
.....	
..	
1 Цель и задачи курсового проектирования	3
.....	
2 Содержание и объем курсового проектирования	3
.....	
3 Методика расчета и анализа многокаскадных усилителей переменного тока	4
.....	
4 Контрольное задание на курсовое проектирование	12
.....	
5 Методика выполнения задания на курсовое проектирование	14
.....	
Рекомендуемая литература	20
.....	
Приложение А "Перечень элементов"	21
.....	