

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра радиоэлектроники и защиты информации

Б.И. Авдоченко

Схемотехника аналоговых электронных устройств

Методические указания по самостоятельной работе

Томск - 2016

Оглавление

1 Введение.....	3
2. Содержание разделов дисциплины	5
3. Самостоятельная работа.....	6
4. Методические указания по самостоятельной работе.....	7
Тема 1. Статические и динамические характеристики.	8
Краткие теоретические сведения.....	8
Выбор рабочей точки каскада с ОЭ.....	11
Графоаналитический расчет параметров транзистора с ОЭ.....	13
Задания по теме 1.....	14
Тема 2. Расчет по эквивалентной схеме	15
Краткие теоретические сведения.....	15
Расчет каскада с ОЭ.....	17
Задания по теме 2.....	23
Тема 3. Расчет каскада с эмиттерной коррекцией.....	24
Краткие теоретические сведения.....	24
Задание:	25
Варианты задания.....	26
Тема 4. Активные фильтры.....	26
Задание.....	27
. Варианты задания	27
ЛИТЕРАТУРА	27

1 Введение

Целью учебной дисциплины «Схемотехника аналоговых электронных устройств» является: ознакомление студентов с основами схемотехники указанных устройств и методами их анализа; формирование у студентов знаний и умений, достаточных для схемотехнического проектирования усилителей и других радиоэлектронных устройств аналоговой обработки сигналов.

В последние десятилетия происходит стремительное развитие радиоэлектроники, разработано множество больших интегральных микросхем различного назначения, совершенствуется микрокомпьютерная техника. Постоянно укрупняется элементная база, усложняются схемотехнические решения, традиционная методика изложение материала по схемотехнике без использования достижений в области математического моделирования становится малоэффективной. Необходимо сочетание классического подхода, рассматривающего принципы построения и физические процессы в основных (базовых) устройствах электронных схем со специализированными компьютерными программами, использующими более сложные модели элементов.

Изучение дисциплины проводится в несколько этапов. На первом этапе студенты знакомятся с устройством в виде «черного ящика», при котором описываются свойства устройства без изучения внутреннего состава аналоговых электронных устройств (АЭУ) и овладевают профессиональной терминологией.

На втором этапе изучаются вольт-амперные характеристики (ВАХ) и эквивалентная схема транзистора, различные включения транзисторов и влияние элементов модели транзистора на характеристики линейного усилителя.

В заключении рассматривается использование характеристик транзистора для схемотехнического построения основных аналоговых устройств, используемых в качестве элементов современных систем радиотехники.

Основными задачами изучения дисциплины являются:

- изучение назначения и характеристик пассивных и активных элементов аналоговых устройств;;
- изучение методов анализа усилительных и других аналоговых устройств, основанных на использовании эквивалентных схем;;
- изучение принципов составления эквивалентных схем;;

- изучение способов построения аналоговых устройств с обратными связями и влияния цепей обратной связи на характеристики этих устройств;;
- изучение принципов построения операционных усилителей и других устройств на их основе;;
- развитие навыков анализа и расчета аналоговых электронных устройств с использованием компьютерной техники.;

Изучение дисциплины базируется на основе знаний, полученных при изучении дисциплин «Физика», «Физические основы электроники», «Основы теории цепей» и «Математика» (функции комплексного переменного)

В результате изучения дисциплины студент должен:

– **Знать:**

- основные научно-технические проблемы и перспективы развития радиотехники и областей ее применения;
- элементную базу, основные структуры, схемотехнику, свойства и методы расчета устройств усиления и обработки сигналов;
- математический аппарат и численные методы, физические и математические модели процессов и явлений, лежащих в основе принципов действия приборов и устройств радиоэлектроники;
- основные принципы и методы расчета, проектирования и конструирования радиотехнических устройств включая этапы схемного проектирования.

– **Уметь:**

- применять методы исследования, проектирования и проведения экспериментальных работ;
- применять методы схемотехнического и компьютерного проектирования и исследования аналоговых электронных устройств.

– **Владеть:**

- навыками решения поставленных перед ним задач по построению типовых усилительных звеньев, базовых схемных конфигураций аналоговых интегральных схем, операционных усилителей, устройств линейного и нелинейного функционального преобразования сигналов.

2. Содержание разделов дисциплины

Содержание разделов дисциплины приведено в таблице 1.

Таблица 1. Содержание разделов дисциплины

№	Названия разделов	Содержание разделов дисциплины по лекциям
1	Введение. Качественные характеристики	Классификация и основные параметры АЭУ
2	Статические и динамические характеристики.	Схема каскада. Построение нагрузочных прямых. Входное и выходное, положительное и отрицательное напряжение. Выбор рабочей точки. Графоаналитический расчет характеристик в области СЧ.
3	Эквивалентная схема транзистора, расчет элементов схемы.	расчет элементов схемы. Расчет каскада с ОЭ в области СЧ.
4	Искажения в области верхних частот и малых времен, нижних частот и больших времен	Физика искажений и расчет каскада с ОЭ в области верхних частот и малых времен.. Искажения в области нижних частот и больших времен, физика искажений и расчет. НЧ коррекция. Импульсный усилитель, расчет в области малых времен, больших времен.
5	Схемы каскадов с общим эмиттером, общим коллектором, общей базой	Схемы, физика работы, протекание токов, основные расчетные соотношения, сравнение характеристик. Применение.
6	Температурная стабилизация режимов.	Источники температурной нестабильности, уход рабочей точки. Схемы термостабилизации, физика работы, расчетные соотношения.
7	Обратные связи.	Параллельная и последовательная ООС, влияние на характеристики. Схемы, физика работы, основные расчетные соотношения, сравнение характеристик. Эмиттерный повторитель. Эмиттерная и индуктивная коррекция с помощью частотно-зависимой ОС. Расчет оптимальной АЧХ. Применение ОС.
8	Типовые узлы АЭУ.	Дифференциальный каскад. Токовое зеркало, схемы снижения потенциалов, генераторы тока и напряжения
9	Операционные усилители.	Идеализированные ОУ. Диаграмма Боде. Шумы ОУ. Температурная нестабильность. Типовая схемотехника ОУ. Инвертирующий и неинвертирующий усилители. Расчет характеристик. Компараторы.
10	Применение	Фильтры НЧ, ВЧ, ПФ, РФ. Схемы, работа. Расчет

	операционных усилителей для построения различных устройств.	характеристик.Мост Вина.
11	Типовые узлы аналоговых устройств и их применение	Схемы перемножения. Балансные модуляторы. логарифмические и антилогарифмические усилители...

3. Самостоятельная работа

Виды самостоятельной работы, их трудоемкость и формы контроля представлены в таблице 2.

Таблица 2- Виды самостоятельной работы, трудоемкость и формы контроля

№	Названия разделов	Виды самостоятельной раб	Формы контроля
1	Эквивалентная схема транзистора, расчет элементов схемы.	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	Контрольная работа
2	Активные фильтры первого и второго порядка.	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	Контрольная работа
3	Обратные связи.	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	Контрольная работа
4	Температурная стабилизация режимов.	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	Опрос на занятиях
5	Искажения в области верхних частот и малых времен, нижних частот и больших времен	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	Опрос на занятиях
6	Статические и динамические характеристики.	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	Расчетная работа
7	Введение. Качественные характеристики	Подготовка к практическим занятиям, семинарам	Опрос на занятиях
8	Типовые узлы АЭУ.	Проработка лекционного материала	Опрос на занятиях
9	Обратные связи.	Проработка лекционного материала	Контрольная работа
10	Температурная стабилизация режимов.	Проработка лекционного материала	Опрос на занятиях
11	Искажения в области верхних частот и малых времен, нижних частот и больших времен	Проработка лекционного материала	Контрольная работа
12	Схемы каскадов с общим	Проработка лекционного	Опрос на

	эмиттером, общим коллектором, общей базой	материала	занятиях
13	Эквивалентная схема транзистора, расчет элементов схемы.	Проработка лекционного материала	Опрос на занятиях
14	Статические и динамические характеристики.	Проработка лекционного материала	Расчетная работа
15	Введение. Качественные характеристики	Проработка лекционного материала	Опрос на занятиях
16	Типовые узлы аналоговых устройств и их применение	Проработка лекционного материала	Опрос на занятиях
17	Применение операционных усилителей для построения различных устройств.	Проработка лекционного материала	Опрос на занятиях
18	Операционные усилители.	Проработка лекционного материала	Опрос на занятиях
19	Искажения в области верхних частот и малых времен, нижних частот и больших времен	Оформление отчетов по лабораторным работам	Отчет по лабораторной работе
20	Схемы каскадов с общим эмиттером, общим коллектором, общей базой	Оформление отчетов по лабораторным работам	Отчет по лабораторной работе
21	Операционные усилители.	Оформление отчетов по лабораторным работам	Отчет по лабораторной работе
22	Искажения в области верхних частот и малых времен, нижних частот и больших времен	Оформление отчетов по лабораторным работам	Отчет по лабораторной работе
	Всего (без экзамена)		
23	Подготовка к экзамену		Экзамен

4. Методические указания по самостоятельной работе

Результаты самостоятельной работы контролируются выполнением расчетных и контрольных работ.

Основная тема расчетной работы - статические и динамические характеристики транзистора.

Основные темы контрольных работ: .

- Эквивалентная схема транзистора, расчет элементов схемы и параметров усилителя с ОЭ.

- Обратные связи и их влияние на характеристики.
- Активные фильтры первого и второго порядка.

Тема 1. Статические и динамические характеристики.

Краткие теоретические сведения

Схема каскада с ОЭ приведена на рисунке 1.

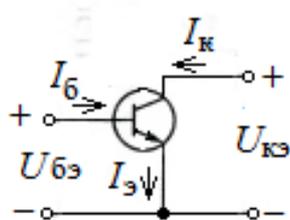


Рисунок 1. Каскад с ОЭ

Связь между токами, протекающими через транзистор и прикладываемыми напряжениями изображается в виде вольт-амперной характеристики (ВАХ). Различают входную ВАХ – зависимость тока базы $I_б$ от напряжения $U_{бэ}$ при постоянном напряжении $U_{кэ}$, приведенную на рисунке 2а, и выходную ВАХ, зависимость тока коллектора $I_к$ от напряжения между коллектором и эмиттером $U_{кэ}$ при фиксированных токах базы, приведенную на рисунке 2б

Эти характеристики позволяют наглядно отразить влияние внешних напряжений на положение рабочей точки транзистора на входной ВАХ $U_{бэ0}$, $I_{б0}$, выходной ВАХ $U_{кэ0}$, $I_{к0}$ и связать их между собой, как показано на рисунках 1а и 1б.

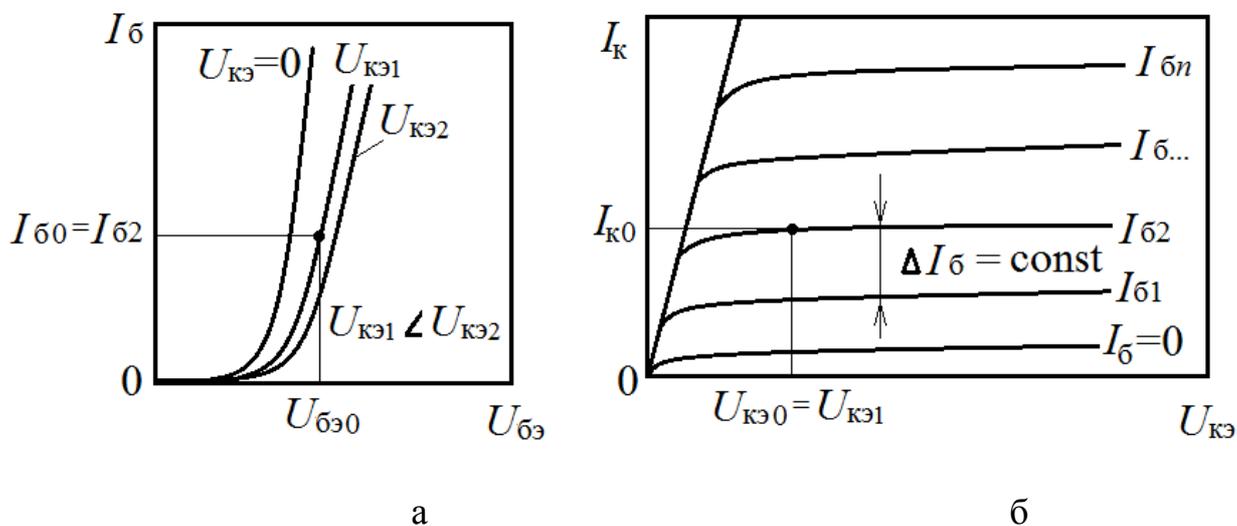


Рисунок 2. ВАХ транзистора с ОЭ: а – входная ВАХ, б – выходная ВАХ

Зона возможного расположения рабочей точки на ВАХ транзистора показана на рисунке 10.

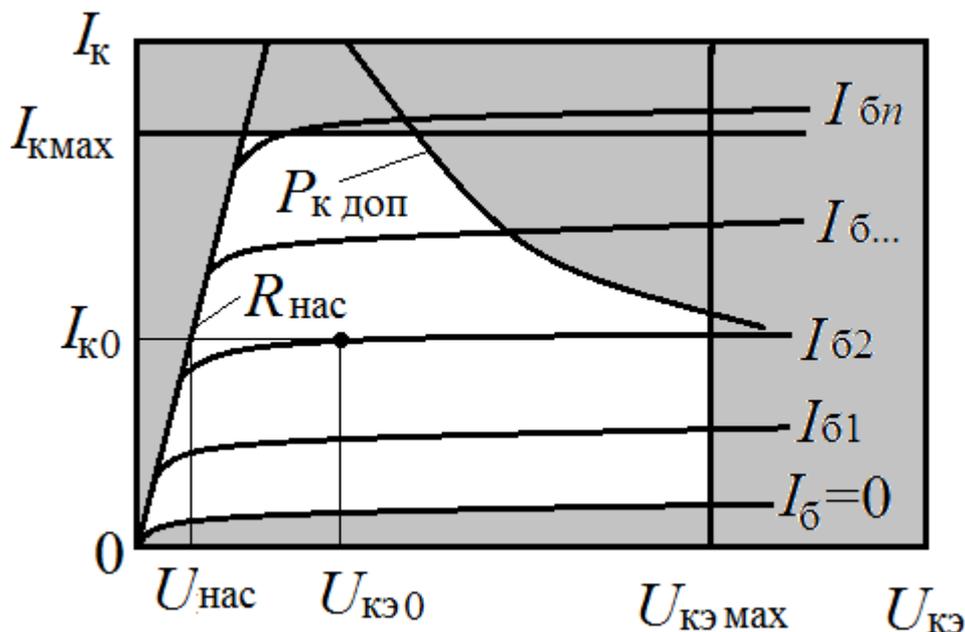


Рисунок 10. Рабочая зона транзистора

Рабочая зона транзистора ограничена предельными справочными характеристиками транзистора: предельным током коллектора $I_{Кмаx}$, предельным напряжением коллектор-эмиттер транзистора $U_{КЭмаx}$, предельно допустимой мощностью $P_{к доп}$. На ВАХ имеются зоны, в которые рабочая точка не может располагаться: зона отсечки, располагаемая ниже $I_{б=0}$, в которой через транзистор протекают неуправляемые токи и зона насыщения, располагаемая левее сопротивления насыщения транзистора $R_{нас}$.

ВАХ используются для определения положения рабочей точки при подаче входного сигнала, для чего строятся динамические характеристики транзистора. Рассмотрим правила построения динамических характеристик усилительного каскада с ОЭ, схема которого изображена на рисунке 3.

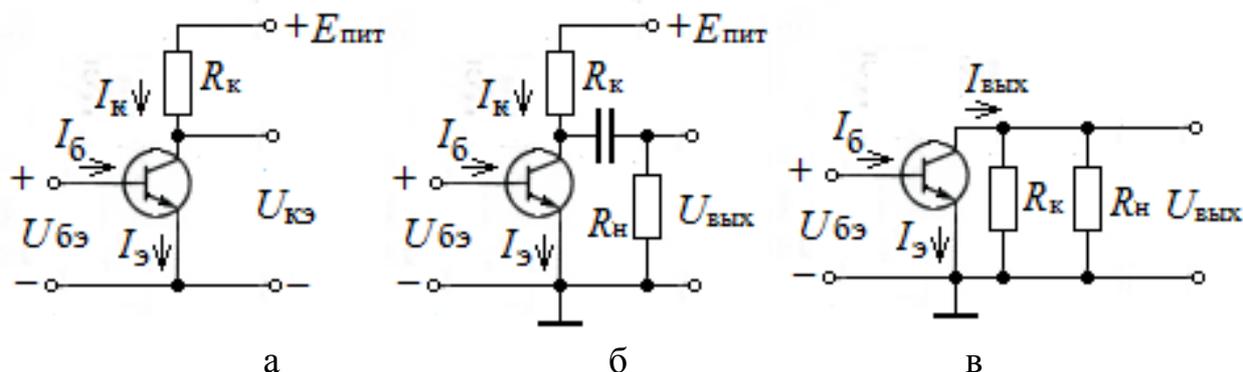


Рисунок 3. Схема усилительного каскада с ОЭ: а – по постоянному току, б – по переменному току, в – эквивалентная схема по переменному току

Из закона Кирхгофа для напряжений по постоянному току (рисунок 3а) следует:

$$E_{пит} = U_{КЭ} + U_{R_K} = U_{КЭ} + I_{К} \cdot R_{К} \quad (1)$$

Это уравнение прямой линии описывает траекторию движения рабочей точки при изменении параметров схемы $E_{пит}$, $U_{КЭ}$, $I_{К}$ и $R_{К}$. Для графического изображения этой

траектории необходимо определить две точки графика. Первая точка, при подстановке в выражение (1) значения $I_k=0$, дает точку $E_{пит}=U_{кэ}$, отображенную на рисунке 4 на оси абсцисс.

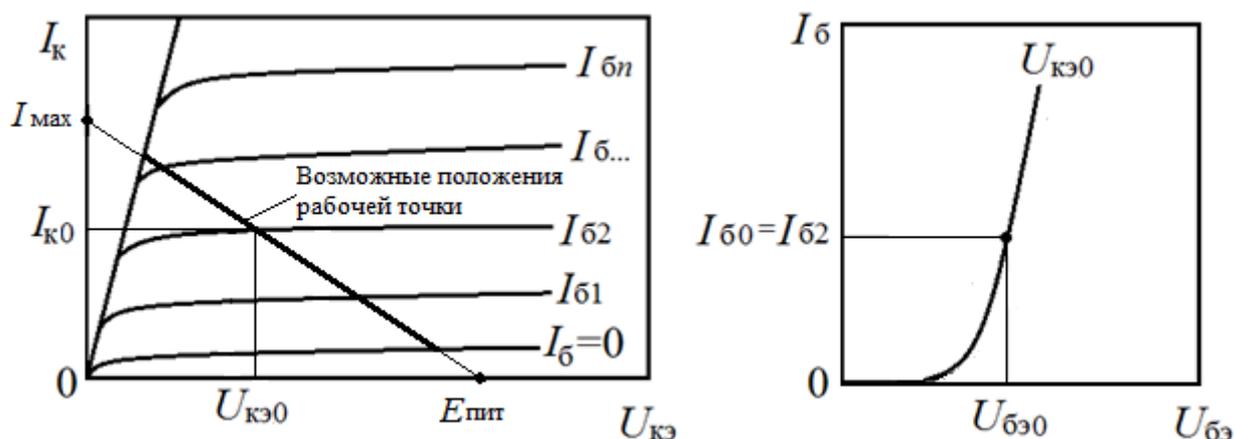


Рисунок 4. ВАХ: а – построение нагрузки по постоянному току, б – положение рабочей точки на входной характеристике.

Вторая точка, на оси ординат (при $U_{кэ}=0$), дает значение

$$I_{кmax} = \frac{E_{пит}}{R_k}.$$

Соединив эти точки прямой линией, получим возможные положения рабочей точки на ВАХ, ограниченные зоной отсечки и зоной насыщения. Нагрузочная прямая, связывающая элементы схемы, токи и напряжения позволяет, задав ток или напряжение транзистора, получить положение рабочей точки транзистора на выходной и входной ВАХ. Пример приведен на рисунке 4: задав ток рабочей точки $I_{к0}$, получаем напряжение рабочей точки $U_{кэ0}$, значение тока базы $I_{б0}=I_{б2}$ и по входной характеристике определить значение напряжения в рабочей точке $U_{бэ0}$ при известном $U_{кэ0}$.

По переменному току при отсутствии сопротивления нагрузки крайние положения рабочей точки определяются аналогично. В случае подключения сопротивления R_n , показанного на рисунке 3б сопротивление по переменному току отличается от сопротивления по постоянному току и траектория движения рабочей точки при подаче входного напряжения на базу транзистора изменяется. Отличие показано на рисунке 5.

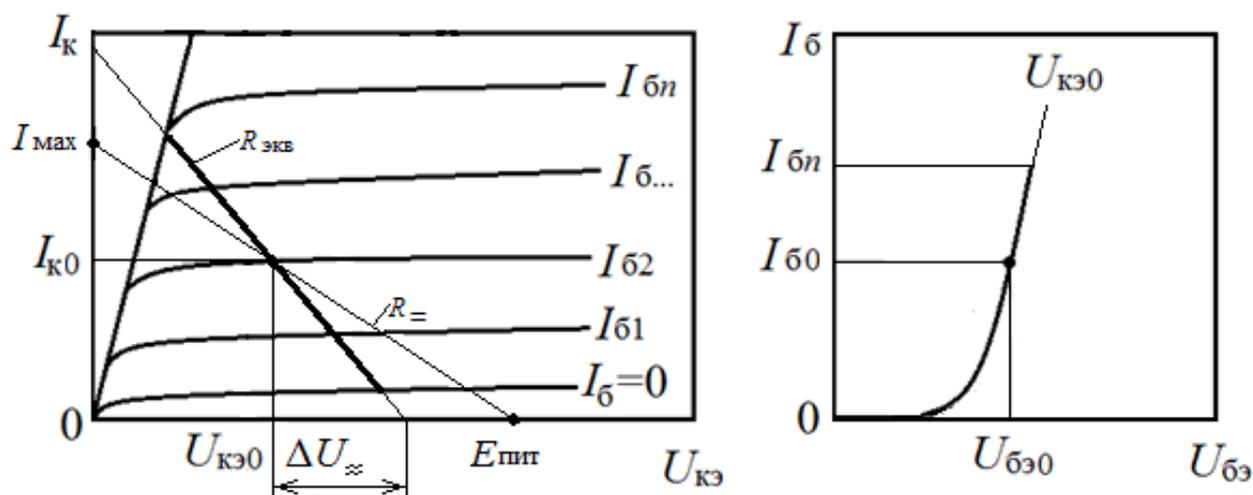


Рисунок 5. Построение нагрузочной прямой по переменному току.

Эквивалентное сопротивление нагрузки по переменному току представляет собой параллельное соединение R_K и R_H (рисунок 3в)

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H}.$$

Нагрузочная прямая по переменному току описывается выражением

$$U_{\text{вых}} = I_{\text{вых}} \cdot R_{\text{экв}} = (I_{K0} + \Delta I_K) \cdot R_{\text{экв}} = U_{KЭ0} - \Delta U_{\approx}, \quad (2)$$

где ΔI_K – изменение тока через транзистор при изменении входного напряжения. При $\Delta I_K=0$ рабочая точка не меняется, $U_{\text{вых}}=U_{KЭ0}$ и для построения нагрузочной прямой $R_{\text{экв}}$ достаточно определить еще одну точку. Приняв в выражении (2) $\Delta I_K=-I_{K0}$, определяем изменение напряжения на эквивалентном сопротивлении и откладываем точку на оси абсцисс

$$\Delta U_{\approx} = I_{\text{вых}} \cdot R_{\text{экв}}$$

На рисунке 5 показана траектория движения рабочей точки транзистора при подаче на вход переменного напряжения с учетом зон отсечки и насыщения транзистора.

Выбор рабочей точки каскада с ОЭ

ВАХ транзистора позволяют наглядно отобразить влияние положения рабочей точки на амплитуду выходного напряжения и правильно выбрать рабочую точку. Рассмотрим выбор рабочей точки, обеспечивающей требуемое выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ на заданной нагрузке R_H для усиления гармонического сигнала, у которого амплитуда положительной полуволны равны $U_{\text{вых}+}$, а отрицательной полуволны равна $U_{\text{вых}-}$, как показано на рисунке 6.

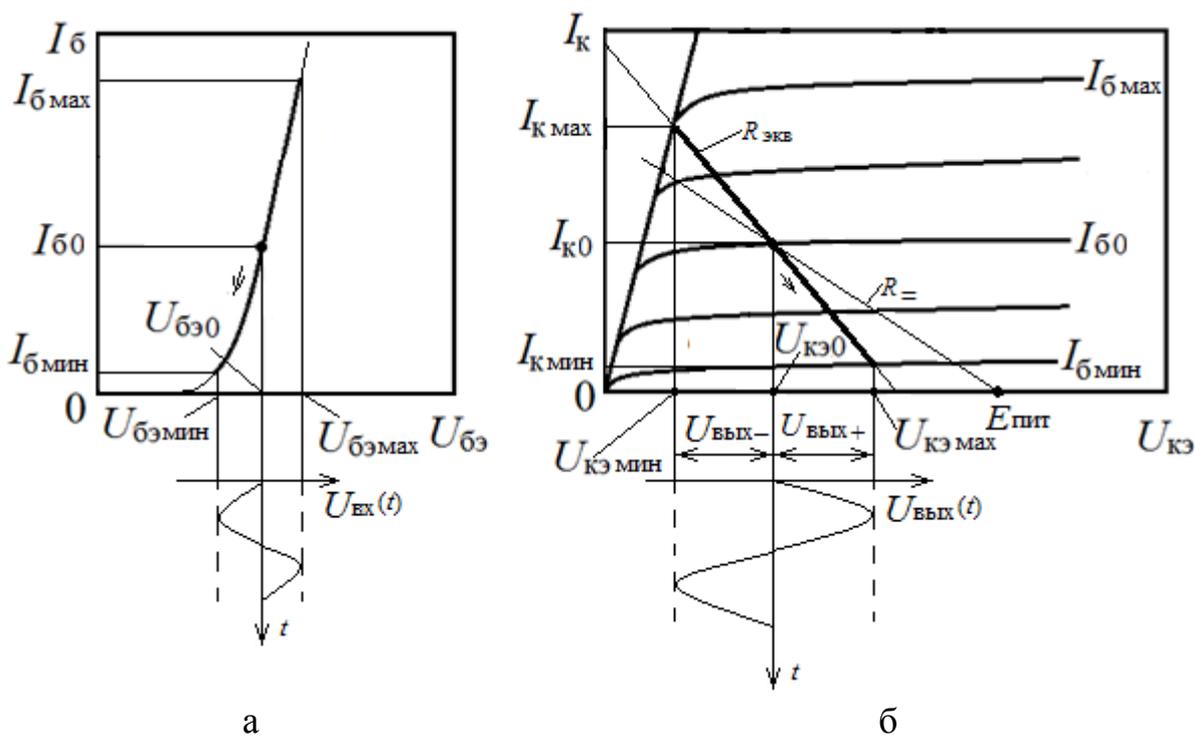


Рисунок 6. Изменение положения рабочей точки при подаче входного напряжения

При подаче на вход каскада отрицательной полуволны гармонического сигнала, показанного на рисунке ба, ток, протекающий через базу уменьшается до значения $I_{\text{бмин}}$. Транзистор закрывается, формируется отрицательная полуволна выходного напряжения, напряжение на коллекторе транзистора увеличивается до значения $U_{\text{кэмах}}$, а ток коллектора уменьшается до величины $I_{\text{кмин}}$. Формируется положительная полуволна выходного напряжения $U_{\text{вых+}}$:

$$U_{\text{вых+}} = U_{\text{кэмах}} - U_{\text{кэ0}} = (I_{\text{к0}} - I_{\text{кмин}}) \cdot R_{\text{экв}} \quad (3)$$

Значение минимального тока через транзистор $I_{\text{кмин}}$ определяется нелинейностью ВАХ и обычно составляет 5-10% от $I_{\text{к0}}$. Значение $U_{\text{вых+}}$ определяет необходимый ток в рабочей точке, из выражения (3) следует:

$$I_{\text{к0}} = 1,1 \cdot U_{\text{вых+}} / R_{\text{экв}}$$

При подаче на вход положительной полуволны напряжения, показанной на рисунке ба, ток, протекающий через базу увеличивается до значения $I_{\text{бмах}}$. Транзистор открывается, формируется положительная полуволна выходного напряжения, напряжение на коллекторе транзистора уменьшается до значения напряжения насыщения, $U_{\text{кэмин}} = U_{\text{нас}}$, а ток коллектора увеличивается до величины $I_{\text{кмах}}$. Формируется отрицательная полуволна выходного напряжения $U_{\text{вых-}}$.

Значение $U_{\text{вых-}}$ определяет напряжение в рабочей точке транзистора. из рисунка бб следует, что

$$U_{\text{к0}} = U_{\text{нас}} + U_{\text{вых-}}$$

В случае подачи гармонического сигнала $U_{\text{вых+}} = U_{\text{вых-}}$ и рабочая точка выбирается на середине линейных участков ВАХ

При подаче на вход **импульсных сигналов** положение рабочей точки зависит от скважности Q :

$$Q = T / \tau,$$

где T – период повторения входного сигнала, показанный на рисунке 7.

Изменение положения рабочей точки связано с появлением постоянной составляющей на выходе каскада при $U_{\text{вых+}} \neq U_{\text{вых-}}$ из-за разной площади полуволн входного сигнала. Постоянная составляющая выравнивает площади полуволн, как показано на рисунке 7.

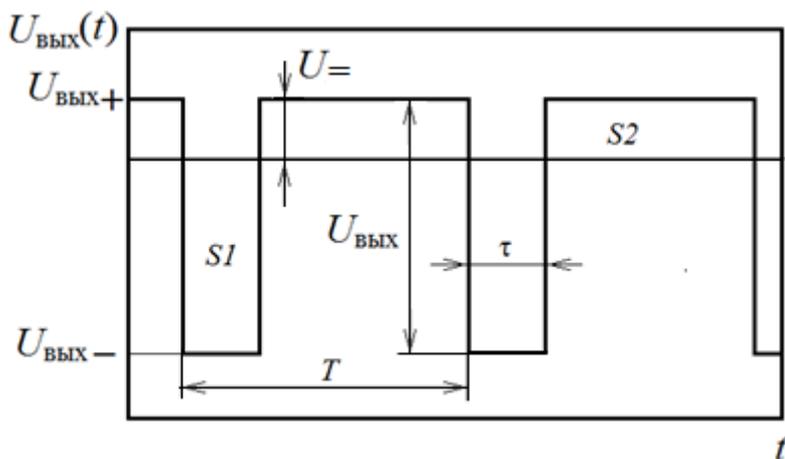


Рисунок 7. Сдвиг рабочей точки при появлении постоянной составляющей: $S1 = S2$

Из равенства площадей вытекает следующее соотношение:

$$U_{\text{вых-}} / U_{\text{вых+}} = T - \tau / \tau = Q - 1$$

На рисунке 8 изображено изменение положения рабочей точки с учетом скважности входного сигнала.

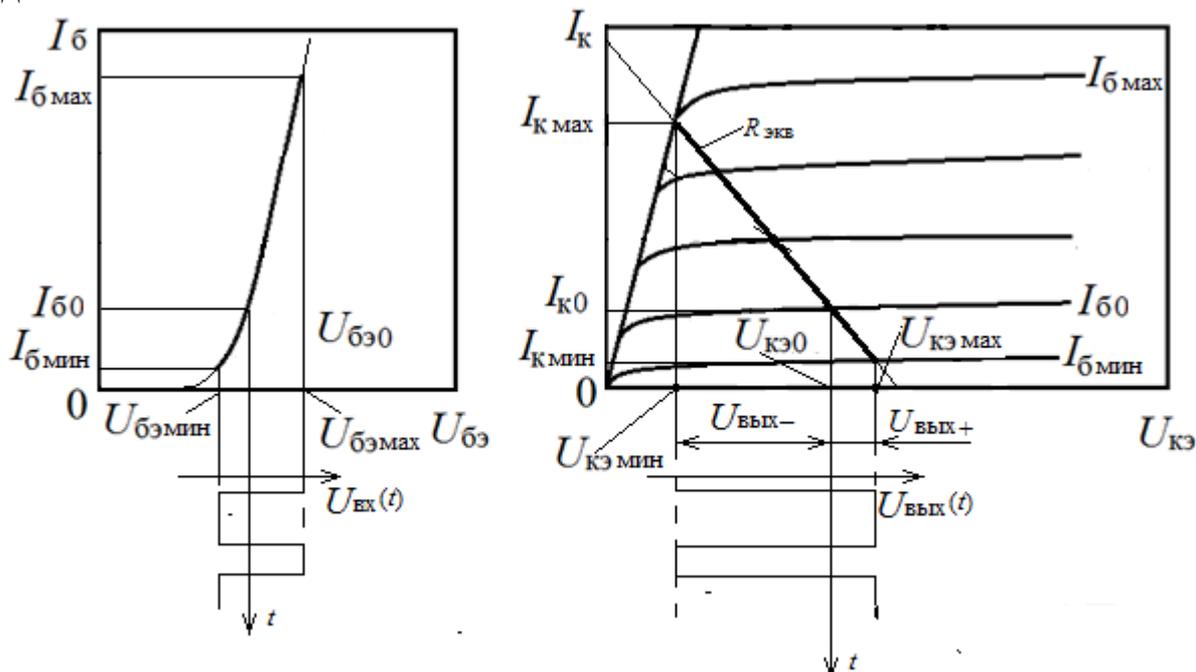


Рисунок 8. Выбор рабочей точки с учетом скважности входного сигнала

При размахе выходного напряжения $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых+}} + U_{\text{вых-}}$ положение рабочей точки, в соответствии с рисунками 7 и 816 выбираются по следующим выражениям:

$$I_{к0} = I_{кмин} + U_{\text{вых}} / R_{\text{экв}} \cdot Q; \quad U_{к0} = U_{\text{нас}} + U_{\text{вых}} \cdot \frac{Q-1}{Q}.$$

Графоаналитический расчет параметров транзистора с ОЭ

По динамическим ВАХ транзистора, показанным на рисунке 5, можно определить усредненные характеристики транзистора в режиме большого сигнала.

Коэффициент усиления

$$K_0 = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = (U_{кэмакс} - U_{кэмин}) / (U_{бэмакс} - U_{бэмин}).$$

Входное сопротивление

Определяется по входной характеристике, рисунок 13а, как отношение изменения напряжения к изменению тока в крайних положениях рабочей точки:

$$R_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{вх}} = (U_{бэмакс} - U_{бэмин}) / (I_{бмакс} - I_{бмин}).$$

Дифференциальное выходное сопротивление

Определяется по выходной характеристике как отношение изменения напряжения $U_{\text{вых}}$ к изменению тока $\delta I_{к}$ в крайних положениях рабочей точки при постоянном токе базы транзистора, показанных на рисунке 9.

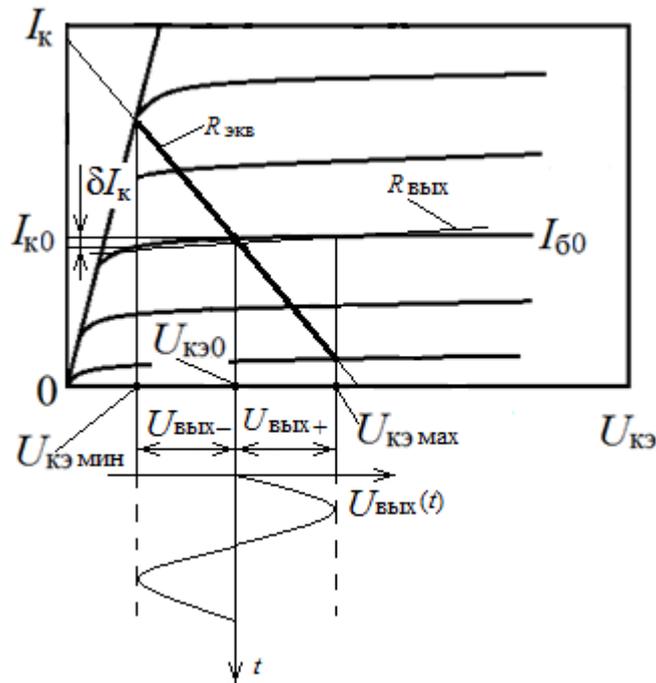


Рисунок 9. Определение выходного сопротивления каскада

$$R_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{к}} = (U_{\text{кэ макс}} - U_{\text{кэ мин}}) / \Delta I_{\text{к}}$$

Коэффициент передачи тока базы

Связывает изменение тока коллектора при изменении тока базы при движении рабочей точки до крайних положений на входной и выходной ВАХ.

$$H_{21} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{б}} = (I_{\text{к макс}} - I_{\text{к мин}}) / (I_{\text{б макс}} - I_{\text{б мин}})$$

Крутизна транзистора

Определяется по приращению тока коллектора транзистора при изменении входного напряжения:

$$S = \Delta I_{\text{к}} / \Delta U_{\text{бэ}} = (I_{\text{к макс}} - I_{\text{к мин}}) / (U_{\text{бэ макс}} - U_{\text{бэ мин}})$$

Задания по теме 1

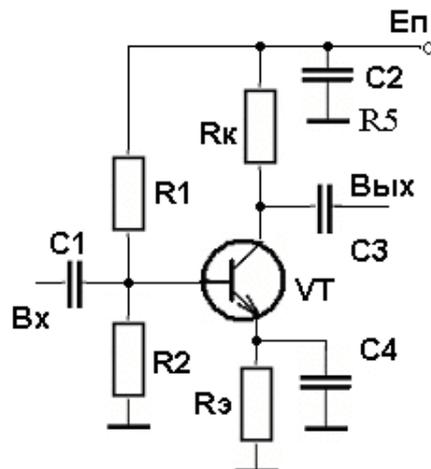


Рисунок 10. Схема усилительного каскада

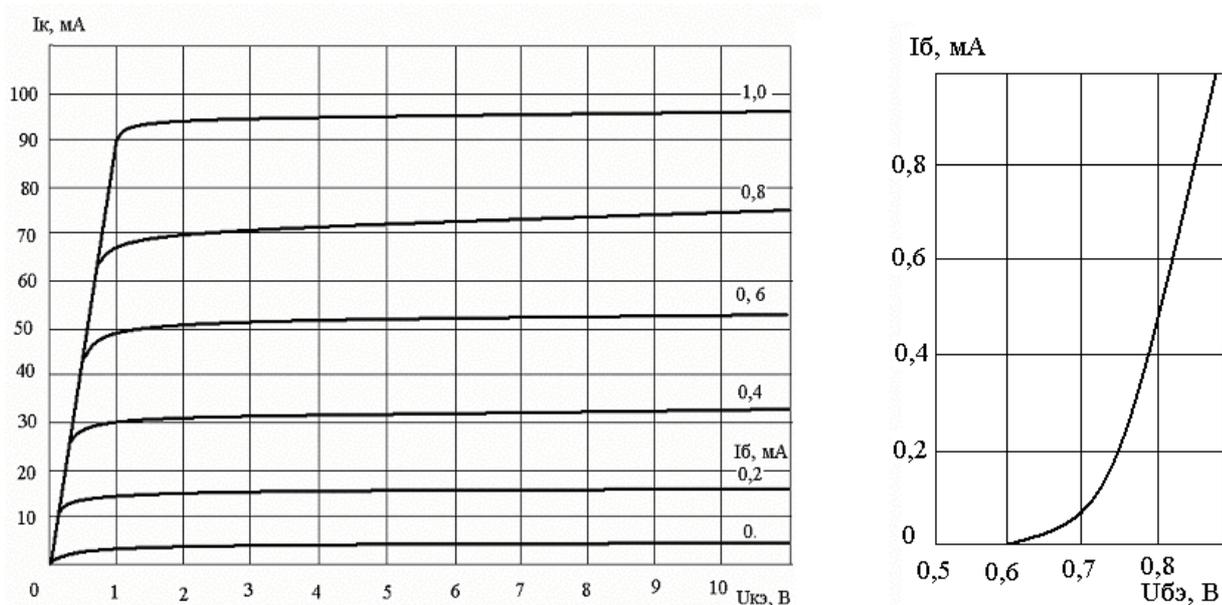


Рисунок 11. Выходные и входные характеристики транзистора

Исходные данные для расчета:

1. Сопротивление нагрузки $R_n = 100 \text{ Ом}$;
2. Сопротивление эмиттера $R_э = 10 \text{ Ом}$;
3. Сопротивление коллектора $R_k = 100 \text{ Ом}$
4. Напряжение питания 10 В;

Провести графический расчет усилителя.

- Построить нагрузочные прямые по постоянному и переменному токам
- Выбрать рабочую точку, обеспечивающую максимальный уровень выходного напряжения. Определить максимальный уровень выходного напряжения.
- Определить крутизну, статический коэффициент передачи тока базы транзистора, коэффициент усиления, входное и выходное сопротивление усилителя.

Варианты задания (выделен - вариант 32)

Задание	1	2	3	4	Вариант
$U_{вых}, \text{В}$	2	2,5	3	4	x
$R_n, \text{Ом}$	60	70	80	100	1
$R_n, \text{Ом}$	80	90	100	120	2
$R_n, \text{Ом}$	100	110	120	140	3
$R_n, \text{Ом}$	120	120	140	150	4

Тема 2. Расчет по эквивалентной схеме

Краткие теоретические сведения

Эквивалентная схема является моделью, описывающей внутренний состав транзистора, и используется для анализа работы каскада в режиме малого сигнала, при малом изменении положения рабочей точки. Наиболее наглядной эквивалентной

схемой, описывающей физические процессы в транзисторе, является Т-образная эквивалентная схема. Эта схема, приведенная на рисунке 18, достаточно точно описывает характеристики каскада до частоты $0,1f_T$. Частота f_T называется частотой единичного усиления или частотой, на которой коэффициент передачи тока базы $H_{21}=1$.

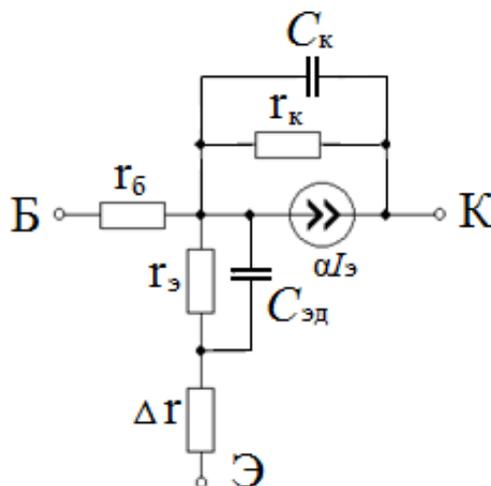


Рисунок 12. Эквивалентная схема биполярного транзистора

Основные элементы эквивалентной схемы:

- объемное сопротивление базы $r_б$;
- активное сопротивление эмиттера $r_э$;
- контактное сопротивление эмиттера Δr ;
- сопротивление коллекторного перехода $r_к$;
- динамическая емкость эмиттера $C_{эд}$;
- емкость коллектора (емкость внутренней обратной связи) $C_к$;
- генератор тока, управляемый током эмиттера $\alpha I_э$.

Эти элементы, за исключением $r_э$, определяются по справочным данным транзистора.

Сопротивление эмиттера $r_э$ зависит от режима работы транзистора, температуры перехода и рассчитывается по выражению:

$$r_э = \frac{\varphi_T}{I_э},$$

где $\varphi_T=25,6$ мВ – температурный потенциал $p-n$ перехода при комнатной температуре.

Коэффициент передачи тока эмиттера связан с коэффициентом тока базы:

$$\alpha = \frac{H_{21} - 1}{H_{21}}.$$

Динамическая емкость транзистора описывает частотную зависимость H_{21} . При открытом транзисторе динамическая емкость транзистора равна диффузионной емкости и определяется по выражению:

$$C_{эд} = \frac{1}{2\pi f_T r_э}.$$

В справочниках часто приводится **постоянная времени** цепи внутренней обратной связи транзистора, $\tau_{oc} = r_б C_k$.

По эквивалентной схеме вычисляются основные характеристики транзистора, необходимые для дальнейших расчетов:

Входное сопротивление:

$$r_{вх} = r_б + (H_{21} + 1) \cdot r_э.$$

Крутизна транзистора:

$$S = \frac{H_{21}}{r_{вх}}$$

По имеющейся эквивалентной схеме рассчитываются частотные и переходные характеристики каскада в различных схемах включения.

Расчет каскада с ОЭ

Полная и эквивалентная схемы каскада с ОЭ для нижних частот (НЧ), средних частот (СЧ) и верхних частот (ВЧ) входного сигнала приведены на рисунке 13.

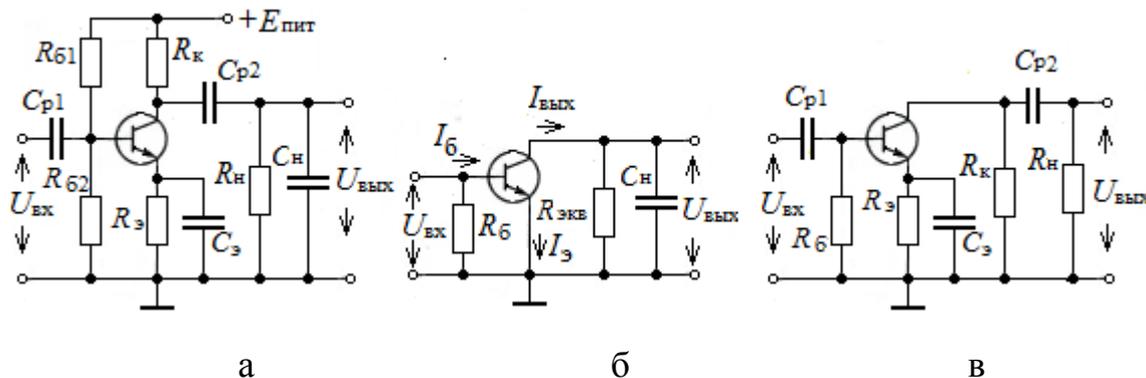


Рисунок 13. Каскад с общим эмиттером: а – полная электрическая схема, б – эквивалентная схема для области средних и верхних частот
в – эквивалентная схема для области нижних частот

В области СЧ влиянием инерционности транзистора, разделительных и нагрузочных емкостей можно пренебречь, сопротивление коллекторного перехода r_k при расчетах

обычно не учитывается из-за значительного превышения значений R_k и R_H или включается в $R_{экв}$.

В области средних частот определяется *коэффициент усиления каскада* K_0

$$K_0 = S R_{экв}, \quad R_{экв} = \frac{R_k \cdot R_H}{R_k + R_H}$$

Входное сопротивление каскада представляет параллельное соединение входного сопротивления транзистора и сопротивлений базового делителя

$$R_{вх} = \frac{r_{б} \cdot R_{б}}{r_{б} + R_{б}},$$

где $R_{б} = \frac{R_{б1} \cdot R_{б2}}{R_{б1} + R_{б2}}$.

Выходное сопротивление каскада $R_{вых} \approx R_k$

В области ВЧ рассчитываются АЧХ и ПХ каскада. Линейные частотные искажения возникают из-за инерционности транзистора, внутренней обратной связи (ОС) транзистора через емкость коллектора C_k и частотной зависимости сопротивления нагрузки из-за наличия C_H , рисунок 13б. Постоянная времени каскада в области ВЧ τ_B определяется этими тремя факторами:

$$\tau_B = \tau + \tau_1 + \tau_2,$$

где $\tau = \frac{S \cdot r_{б}}{2\pi f_T}$ – постоянная времени транзистора;

$\tau_1 = C_k R_{экв} (1 + S \cdot r_{б})$ – постоянная времени внутренней ОС;

$\tau_2 = C_H R_{экв}$ – постоянная времени нагрузки каскада.

АЧХ каскада в области ВЧ для коэффициента передачи устройства первого порядка описывается выражением

$$Y_{в} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau_{э})^2}}$$

Форма АЧХ для области верхних частот, соответствующая этому выражению, показана на рисунке 14а.

ПХ каскада с ОЭ, приведенная на рисунке 14б для первого порядка схемы является монотонной и описывается экспонентой

$$h(t) = 1 - \exp(1 - t/\tau_\epsilon)$$

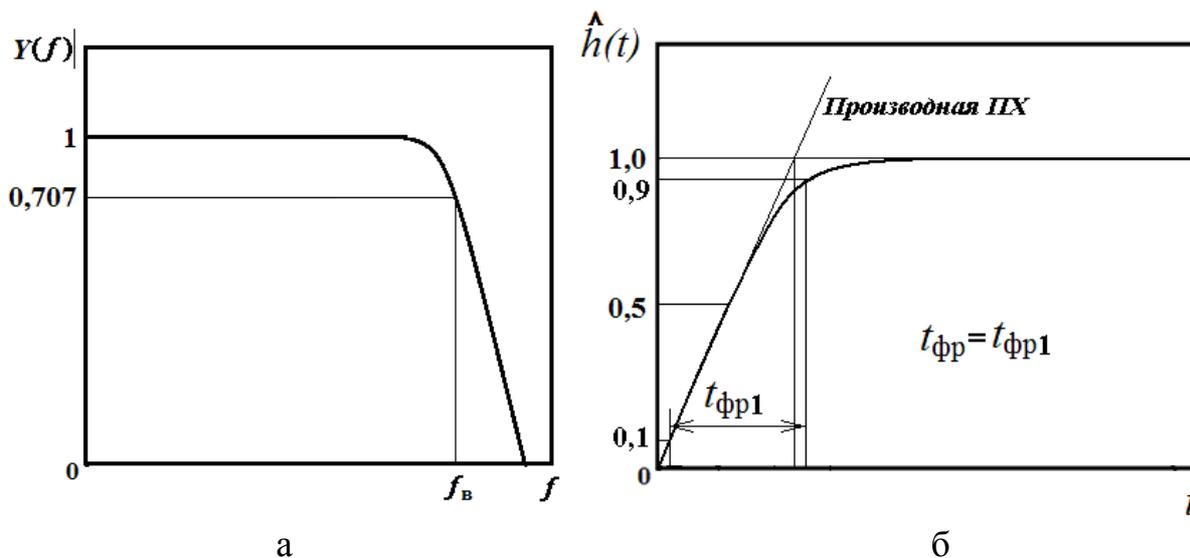


Рисунок 14. Характеристики каскада с ОЭ первого порядка в области верхних частот и малых времен: а – АЧХ, б – ПХ

Время нарастания переднего фронта определяется по постоянной времени каскада τ_B в соответствии с выражением

$$t_{фр} = 2,2\tau_\epsilon.$$

Для устройства первого порядка $t_{фр}$ определяется как промежуток времени между уровнями 0,1 и 0,9 от установившегося значения ПХ. Отметим, что это подобное измерение переднего фронта ПХ справедливо только в случае монотонных характеристик.

При определении f_B на уровне $Y_B=0,707$ получаем связь между временем нарастания и верхней частотой каскада:

$$t_{фр} = 0,35 / f_\epsilon$$

Высокочастотная индуктивная коррекция используется для увеличения верхней частоты или для уменьшения переднего фронта каскада. Действие индуктивной коррекции основано на увеличении сопротивления в цепи коллектора с ростом частоты благодаря включению последовательно с сопротивлением коллектора R_K индуктивности L_K . Принципиальная схема каскада с высокочастотной индуктивной коррекцией приведена на рисунке 15а, эквивалентная схема по переменному току – на рисунке 15б.

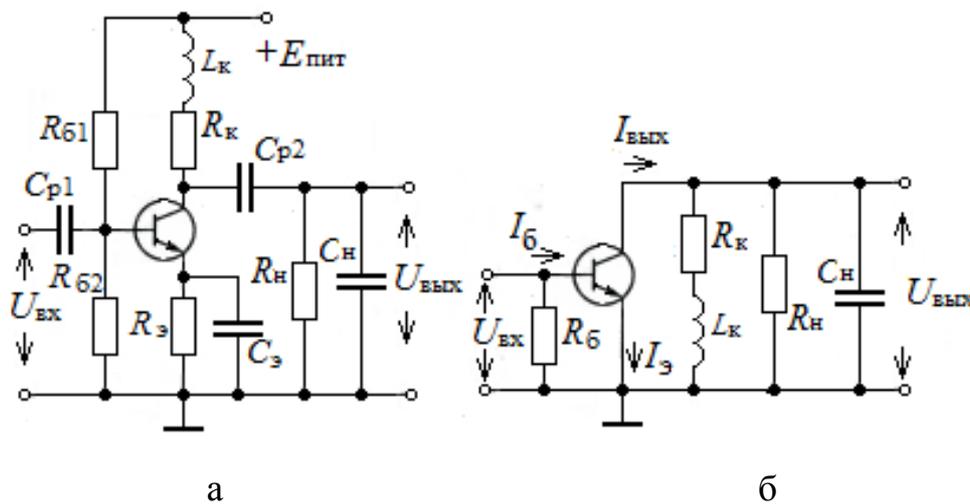


Рисунок 15. Схема каскада с высокочастотной индуктивной коррекцией: а – принципиальная схема, б – эквивалентная схема по переменному току

АЧХ в области верхних частот при оптимальном значении индуктивности, обеспечивающей максимально плоскую характеристику, приближенно определяется выражением:

$$Y_{вк} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau_k)^2}}$$

где $\tau_k = L_{конт} / (R_n + R_k)$ - постоянная времени корректирующей цепи, $L_{конт} = R_k \tau_k$.

В области НЧ возникают линейные искажения, вызванные увеличением на нижних частотах сопротивлений разделительных конденсаторов C_{p1} , C_{p2} и блокировочного конденсатора C_z , рисунок 13в.

Сигнал проходит через эти конденсаторы последовательно, поэтому для получения результирующей АЧХ в области нижних частот необходимо перемножить нормированные АЧХ каждой искажающей цепочки.

АЧХ на нижних частотах описывается выражением:

$$Y_n = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(2\pi f \tau_n)^2}}}$$

где τ_n – постоянная времени разряда конденсатора в соответствующей цепи.

Для разделительной цепи

$$\tau_{нр} = C_p (R_{л} + R_{п}),$$

В этом выражении $R_{л}$ – эквивалентное сопротивление в цепи разряда конденсатора, стоящее слева (сопротивление источника сигнала или выходное сопротивление предыдущего каскада), $R_{п}$ – эквивалентное сопротивление справа от конденсатора (сопротивление нагрузки или входное сопротивление последующего каскада).

Для конденсатора C_3 разряд происходит через параллельное соединение R_3 и внутреннего сопротивления транзистора со стороны эмиттера:

$$\tau_{нэ} = C_3 \cdot R_3 \cdot r_{выхэ} / (R_3 + r_{выхэ})$$

Обычно выполняется условие $R_3 \gg r_{выхэ}$, в этом случае

$$\tau_{нэ} = C_3 \cdot r_{выхэ} \approx C_3 \cdot (r_0 + r_0 / H_{21}) \approx C_3 / S$$

Низкочастотная коррекция коллекторным фильтром используется для уменьшения линейных искажений на нижних частотах. Действие НЧ коррекции основано на увеличении сопротивления в цепи коллектора с уменьшением частоты благодаря включению последовательно с сопротивлением коллектора R_k цепочки $C_\phi R_\phi$, показанной на рисунке 16а.

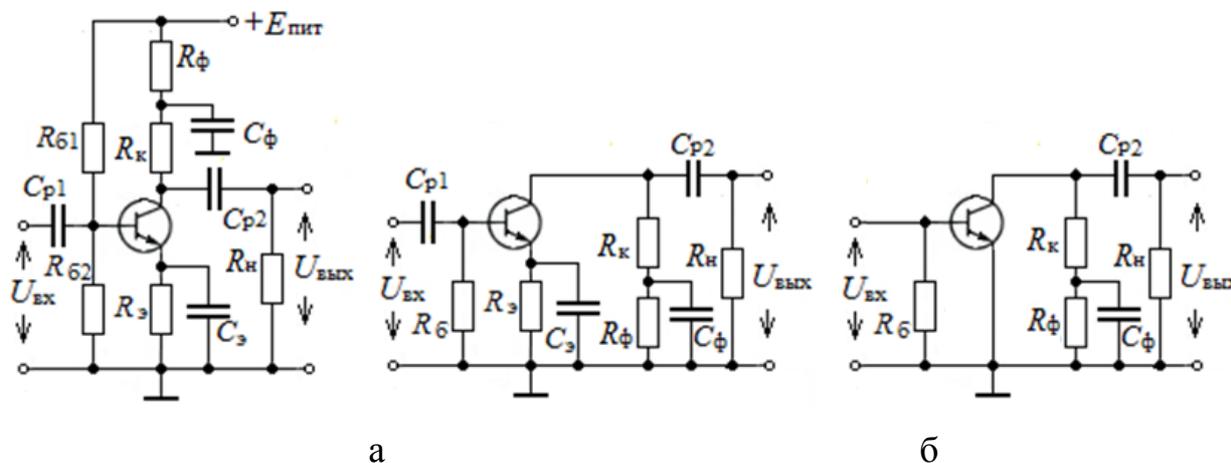


Рисунок 16. Схемы каскада с низкочастотной коррекцией: а – принципиальная схема, б – эквивалентная схема на низкой частоте, в – упрощенная эквивалентная схема

Увеличение эквивалентного сопротивления нагрузки при отсутствии C_ϕ приводит к увеличению коэффициента усиления каскада, при оптимальной емкости C_ϕ происходит компенсация спада АЧХ на низких частотах. Из-за высокого порядка передаточной функции при каскадном соединении низкочастотных цепочек рассмотрим действие корректирующей цепи по упрощенной схеме, приведенной на рисунке 16в,

учитывающей спад АЧХ на НЧ емкостью C_{p2} . В этой схеме выигрыш по уменьшению частоты скорректированным каскадом при оптимальной емкости C_ϕ равен [Войшвилло]

$$\frac{f_n}{f_{нкор}} = 1 + \frac{R_\phi}{R_K}.$$

Величина емкости фильтра для получения АЧХ в области нижних частот, близкой к оптимальной, определяется по выражению

$$C_\phi \approx C_{p2} \cdot R_H \cdot \frac{(R_K + R_\phi)}{R_K \cdot R_\phi}.$$

$$\Delta = T_H / \tau_H.$$

Следует отметить, что получить большой выигрыш в нижней граничной частоте нельзя из-за ограниченного напряжения питания.

Спад вершины импульса связан с изменением потенциалов на выводах транзистора при измерении положения рабочей точки. При изменении напряжения на выводах конденсаторов происходит заряд или разряд разделительных и блокировочных конденсаторах по экспоненциальному закону, который при небольших перепадах напряжения может быть заменен на линейные изменения, вызывающие линейный спад вершины импульса. Спад вершины импульса выходного напряжения может быть значительно уменьшен при использовании коллекторного фильтра. Процесс коррекции вершины импульса поясняет рисунок 17.

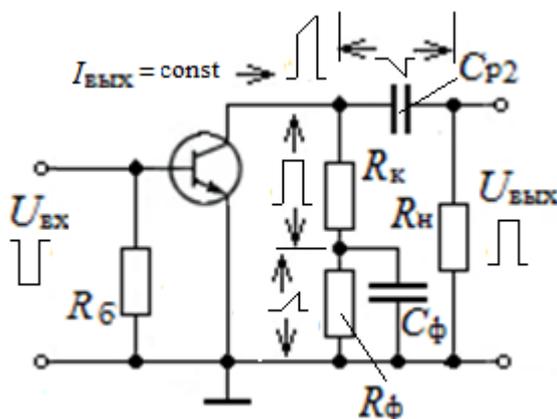


Рисунок 17. Коррекция вершины импульса коллекторным фильтром

На рисунке 9 показано, что ток на выходе транзистора слабо зависит от нагрузки. При протекании части выходного тока через сопротивление R_K , рисунок 17, формируется импульс напряжения, близкий к прямоугольному, на цепочке $C_\phi R_\phi$ по мере заряда конденсатора наблюдается нарастание напряжения. В результате суммирования этих напряжений на коллекторе транзистора формируется импульс с подъемом вершины.

При заряде конденсатора C_{p2} наблюдается увеличение напряжения, которое вычитается из напряжения на коллекторе. При оптимальной коррекции, когда величина подъема вершины импульса компенсирует падение напряжения на разделительном конденсаторе, спад вершины импульса на нагрузке отсутствует.

Задания по теме 2.

Порядок расчета:

1. Выбор рабочей точки
2. Выбор транзистора и расчет его параметров по эквивалентной схеме.
3. Расчет каскада в области СЧ
4. Расчет каскада в области ВЧ
5. Расчет каскада в области НЧ
6. Построение результирующей характеристики

Схема усилительного каскада приведена на рисунке 19. Выбрать режим работы $I_{к0}$, $U_{к0}$, напряжение источника питания, параметры транзистора, необходимые для обеспечения заданного режима. Рассчитать значения элементов усилительного каскада (R_k , $R_э$) и определить значения коэффициента усиления, верхнюю и нижнюю граничные частоты.

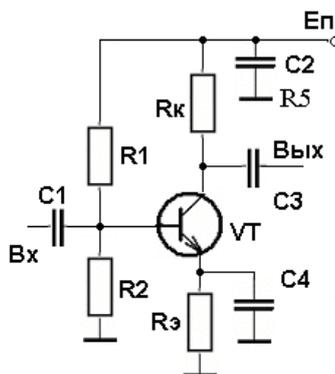


Рисунок 19. Схема усилительного каскада.

. Варианты задания

№ задания		1	2	3	4	5
	Uвых, в	3	4	5	6	7
1	Rн, Ом	100	150	250	350	350
2		150	200	300	400	400
3		200	250	350	450	450
4		250	300	400	500	500
5		300	350	450	550	550
6		350	400	500	600	600

Тема 3. Расчет каскада с эмиттерной коррекцией

Краткие теоретические сведения

Принципиальная схема каскада с эмиттерной коррекцией приведена на рисунке 20а, эквивалентная схема по переменному току - на рисунке 20б, где элементы цепи коррекции R_1, C_1 .

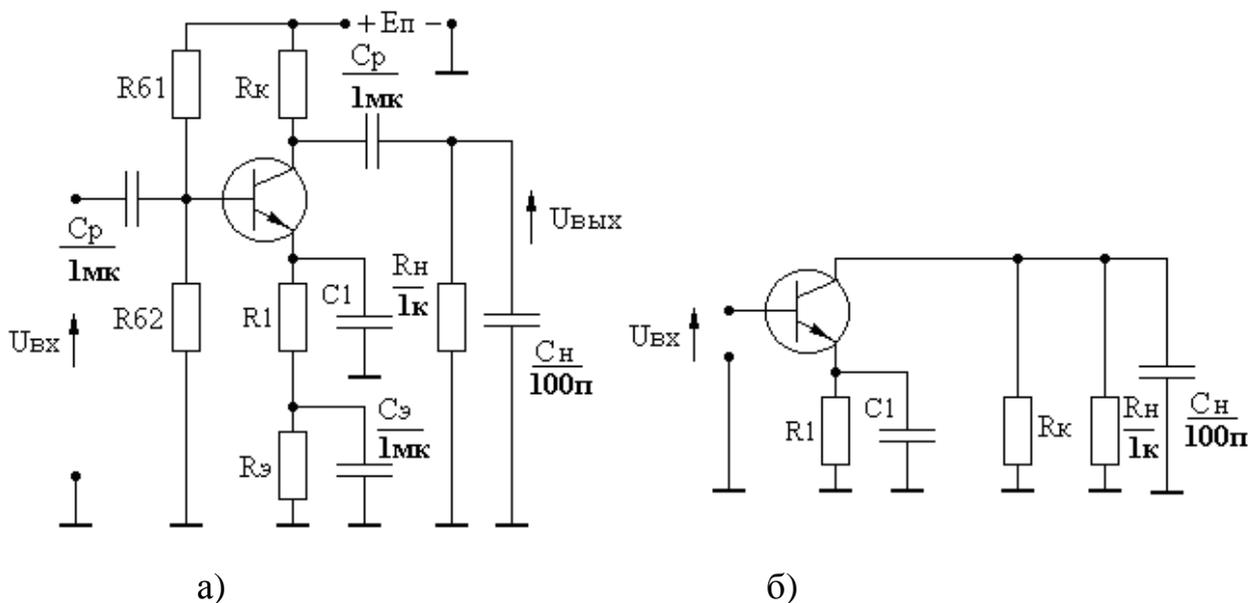


Рисунок 20. Каскад с эмиттерной коррекцией: а – принципиальная схема, б – эквивалентная схема для области верхних частот

Эмиттерная коррекция вводится для уменьшения искажений АЧХ в области верхних частот, увеличивая амплитуду сигнала на переходе база-эмиттер транзистора с ростом частоты усиливаемого сигнала благодаря уменьшению глубины обратной связи с ростом частоты.

Коэффициент усиления с учетом ОС

$$K_{0C} = S_0 R_{\text{ЭКВ}} / F; \quad \text{где } R_{\text{ЭКВ}} = R_K R_H / (R_K + R_H); \quad F = 1 + S_0 R_1$$

глубина ООС;

Оптимальный коэффициент коррекции, обеспечивающий максимально плоскую АЧХ

$$m_{\text{ОПТ}} = \tau_{\text{ОПТ}} / \tau_B;$$

где постоянная времени корректирующей цепи $\tau_{\text{ОПТ}} = R_1 C_{1\text{ОПТ}}$,

постоянная времени некорректированного каскада $\tau_{\hat{a}} = \tau + \tilde{N}_e R_{y\hat{e}\hat{a}} (1 + S_0 r_{\hat{a}}) + \tilde{N}_i R_{y\hat{e}\hat{a}}$,

где $\tau = \frac{S_0 r_{\hat{a}}}{2\pi f_t}$ постоянная времени транзистора

При заданном значении F , значение $m_{\text{опт}}$ определяется выражением:

$$m_{\text{опт}} = \frac{1 - F + \sqrt{2F(F - 1)}}{(F^2 - 1)}.$$

Верхняя граничная частота усилителя с коррекцией

$$f_{\text{в}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{F \left[\frac{m_{\text{опт}} \cdot N \cdot F}{2} + \sqrt{\left(\frac{m_{\text{опт}} N F}{2} \right)^2 + N} \right]}{\tau_{\text{эопт}} \tau_{\text{в}}}},$$

где $N = (1 - Y_{\text{в}}^2) / Y_{\text{в}}^2$, $Y_{\text{в}}$ – заданный уровень искажений на верхних частотах

Входное сопротивление каскада с эмиттерной коррекцией аппроксимируется параллельной RC-цепью

$$r_{\hat{a}\hat{o}} = r_{\text{б}} + (r_{\text{е}} + R_1)(H_{21} + 1), \quad \tilde{N}_{\hat{a}\hat{o}} = \left[\frac{\tau}{r_{\text{б}}} + C_k (K_0 + 1) \right] / F$$

Выходное сопротивление каскада с эмиттерной коррекцией

$$r_{\hat{a}\hat{o}} = \left(\frac{r_{\hat{e}} \cdot R_{\hat{e}}}{r_{\hat{e}} + R_{\hat{e}}} \right) / F \approx \frac{R_{\hat{e}}}{F}$$

Задание:

Рассчитать усилитель с цепью эмиттерной коррекции на транзисторе КТ 315 обеспечивающей оптимальную форму АЧХ на заданной нагрузке ($R_{\text{н}}$ и $C_{\text{н}}$)

1. Рассчитать цепь термостабилизации, обеспечивающие рабочую точку транзистора $U_{\text{ко}}=5\text{В}$, $I_{\text{ко}}=5\text{мА}$.
2. Рассчитать параметры усилителя (K_0 , $f_{\text{в}}$, $f_{\text{н}}$, $r_{\text{вх}}$, $C_{\text{вх}}$) при отсутствии ОС.
3. Рассчитать параметры корректирующей цепи, обеспечивающие оптимальную форму АЧХ при значении глубины ОС $F=10$
4. Рассчитать параметры усилителя (K_0 , $f_{\text{в}}$, $f_{\text{н}}$, $r_{\text{вх}}$, $C_{\text{вх}}$) с корректирующей цепью
5. Сравнить результаты.

Варианты задания

№ задания		1	2	3	4	5
	Сн, пФ	30	40	50	60	70
1	Rн, Ом	100	150	250	350	350
2		150	200	300	400	400
3		200	250	350	450	450
4		250	300	400	500	500
5		300	350	450	550	550
6		350	400	500	600	600

Тема 4. Активные фильтры.

Расчет резонансного усилителя на мосте Вина

Схема резонансного усилителя на мосте Вина приведена на рисунке 21.

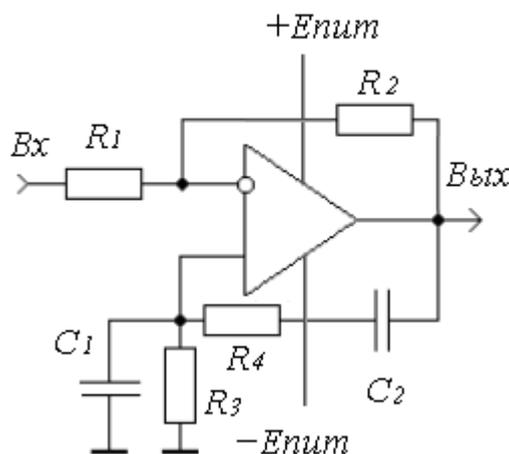


Рисунок 21. Схема резонансного усилителя на мосте Вина

Действие моста Вина основано на компенсации на частоте резонанса отрицательной обратной связи (R_2, R_1) цепью положительной обратной связи R_3, C_1, R_4, C_2 . На частоте резонанса глубина положительной ОС максимальна и предельно может достигать глубины отрицательной ОС, что соответствует бесконечной добротности активного фильтра. Для сохранения устойчивости усилителя глубина отрицательной ОС должна быть больше положительной ОС и реально достижимая добротность может составлять 1000-5000 единиц.

Условие резонанса моста $\tau_{\text{посл}} = \tau_{\text{пар}}$, или $R_4 C_2 = R_3 C_1$.

При условии $R_3=R_4=R$ и $C_1=C_2=C$ резонансная частота $f_0 = 1/2\pi \cdot RC$. Так как коэффициент передачи моста Вина на частоте f_0 равен $1/3$, то для обеспечения устойчивости необходимо выполнить условие $3 \geq (R_1+R_2)/R_1$

Задание

Спроектировать резонансный усилитель на основе моста Вина с добротностью $Q > 100$ на заданную частоту f_0 :

- Выбрать операционный усилитель из базы Multisim;
- Рассчитать элементы фильтра;
- Собрать рассчитанный фильтр в Multisim;
- Результаты моделирования (K_0 , f_n , f_v , и Q в виде текста), АЧХ на плоттере Боде и схему спроектированного усилителя записать в папку Р/Авдоченко/Схемотехника гр.14Х-х под названием ОУ, ФИО

. Варианты задания

№ задания		1	2	3	4	5
1	f ₀ , кГц	3	4	5	6	7
2		10	15	25	35	35
3		150	200	300	400	500
4		600	700	800	900	1000
5		1000	2500	3500	4500	5000
		10 000	20 000	30 000	40 000	50 000

ЛИТЕРАТУРА

1. Красько А.С. Аналоговые электронные устройства: Учебное пособие. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2000. – 196 с
2. Титов А. А. Схемотехника сверхширокополосных и полосовых усилителей мощности: Учебное пособие. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/743>, 2007. – 197 с.
3. Титов А.А. Сборник задач по основам радиотехники: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям для студентов радиотехнических специальностей. Режим доступа: – <http://edu.tusur.ru/training/publications/948>