

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Зав. каф. промышленной и
медицинской электроники
проф., д-р техн. наук

 Г.С. Евтушенко

« 4 » марта 2012 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ
НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по дисциплинам «Схемотехника», «Электроника»
для студентов III курса, обучающихся по направлениям
210100 «Электроника и микроэлектроника»,
201000 «Биотехнические системы и технологии»

Составитель Е.В. Ярославцев

Издательство
Томского политехнического университета
2012

УКД 621.374(075)

Исследование усилительных каскадов на биполярных транзисторах: методические указания к выполнению лабораторной работы по курсам «Схемотехника», «Электроника» для студентов III курса, обучающихся по направлениям 210100 «Электроника и наноэлектроника», 201000 «Биотехнические системы и технологии». Сост. Е.В. Ярославцев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во. Томского политехнического университета, 2012. – 32 с.

УКД 621.374(075)
ББК 00000

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
промышленной и медицинской электроники ИНК
« 04 » марта 2012 г.

Зав. кафедрой ПМЭ
доктор техн. наук,
профессор

_____ *Г.С. Евтушенко*

Председатель
учебно-методической комиссии

_____ *А.Н. Гормаков*

Рецензент

Кандидат технических наук, с.н.с.,
заместитель директора по науке обособленного
подразделения ТУСУР
И.В. Целебровский

© Составление. ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2012
© Ярославцев Е.В., составление, 2012

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с принципом действия, основными параметрами и характеристиками электронных усилителей; приобрести практические навыки расчета, монтажа, настройки и экспериментального исследования основных резистивно-емкостных усилительных каскадов на биполярных транзисторах.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. В рамках часов, отводимых на самостоятельную работу, изучить разделы курса, посвященные общим сведениям об усилителях электрических сигналов и резистивно-емкостным усилителям.
2. Ознакомиться с программой лабораторной работы и методическими указаниями к её выполнению.
3. Выписать из справочника основные параметры транзисторов МП 25 (МП 26).
4. Подготовить заготовку отчета и ответы на контрольные вопросы.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Подготовка к работе:
 - а) подготовить необходимую аппаратуру (лабораторный блок питания, цифровой вольтметр В7-22А (ЦВ), генератор синусоидальных сигналов ГЗ-109 (ГСС), осциллограф С1-83) к включению, установив органы управления приборов в исходное состояние;
 - б) включить аппаратуру для предварительного прогрева;
 - в) по истечении 3-х минут после включения проверить калибровку осциллографа и цифрового вольтметра и, при необходимости, откалибровать их.
2. Снять и построить статические вольтамперные характеристики биполярного транзистора, выбранного в качестве усилительного элемента: **входную** – зависимость $i_{\text{б}} = f(u_{\text{эб}})$ при $U_{\text{кэ}} = E_{\text{к}} = 12 \text{ В} = \text{const}$, и **выходную** – зависимости $i_{\text{к}} = f(u_{\text{кэ}})$ при $I_{\text{б}} = \text{const} = 50, 100, 150, 200 \text{ мкА}$ (схема включения – с общим эмиттером – ОЭ).

3. Исследование усилительного каскада по схеме с ОЭ:

а) используя построенные характеристики и рекомендации, изложенные в методических указаниях, рассчитать графо-аналитическим методом типовой резистивно-емкостной усилительный каскад на биполярном транзисторе (рис. 1), работающий в режиме класса А, при $E_k = 12$ В, $R_k = 3$ кОм, $R_3 = 330$ Ом, $R_H = 10$ кОм, $f_{н гр} = 500$ Гц, $f_{в гр} = 50$ кГц.

В результате расчета должны быть определены:

- максимально возможная выходная мощность $P_{\max \text{ вых}}$, которую обеспечивает каскад на заданной нагрузке без заметных искажений сигнала;
- амплитуда тока $I_{m \text{ вых}}$ и напряжения $U_{m \text{ вых}}$ на нагрузке;
- координаты положения рабочей точки транзистора на выходных ($I_{0к}$, $U_{0кэ}$) и входных ($I_{0б}$, $U_{0бэ}$) статических характеристиках;
- максимальный $I_{к \max}$ и минимальный $I_{к \min}$ токи транзистора;
- сопротивления резисторов базового делителя $R_{б1}$ и $R_{б2}$;
- емкости конденсаторов $C_{п1}$, $C_{п2}$, $C_э$;
- входное сопротивление каскада $R_{вх}$;
- коэффициенты усиления каскада по току K_I , напряжению K_U и мощности K_P .

Используя экспериментально полученные характеристики транзистора и результаты расчетов, построить на выходных статических характеристиках нагрузочные прямые исследуемого каскада по постоянному и переменному току.

Результаты расчета показать преподавателю;

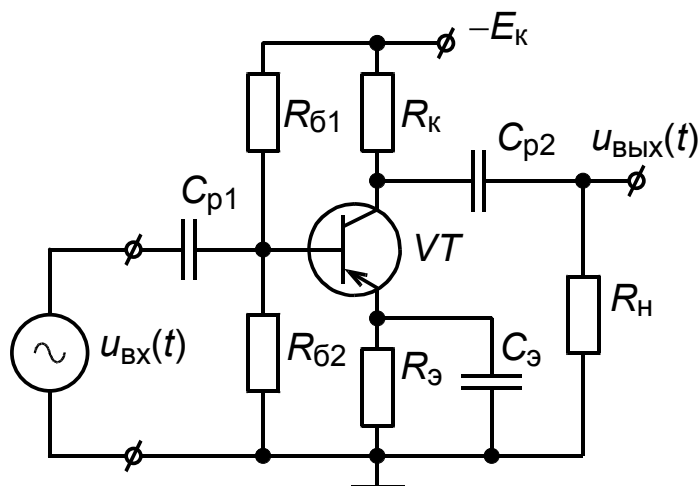


Рис. 1. Схема усилительного каскада по схеме с ОЭ

б) собрать на монтажной панели усилительный каскад с ОЭ, используя компоненты с заданными и рассчитанными параметрами. После проверки монтажа схемы преподавателем подать на каскад питающее напряжение (источник входного напряжения не подключать!);

с) исследовать усилитель в исходном состоянии (по постоянному току):

- входную клемму усилителя соединить проводником с «земляной» шиной;
- измерить с помощью осциллографа (цифрового вольтметра), фиксируя результат, ток базы покоя транзистора $I_{0б}$ и напряжения $E_{к}$, $U_{0кэ}$, $U_{0бэ}$, $U_{0Rэ}$, $U_{0Rк}$, $U_{0Rн}$, на резисторах базового делителя $R_{б1}$, $R_{б2}$ и на конденсаторах $C_{п1}$, $C_{п2}$, $C_э$;
- рассчитать реальный ток покоя коллектора $I_{0к}$ и статический коэффициент усиления транзистора β_0 ;
- сравнить результаты проведенных измерений и предварительных расчетов: полученные значения параметров не должны отличаться от данных графо-аналитического расчета более чем на 10%. Если это условие выполняется, можно приступать к выполнению следующего пункта, если нет – следует проверить монтаж каскада, результаты графо-аналитического расчета и результаты измерений;

д) исследовать усилительный каскад ОЭ, работающий в режиме класса А, на переменном токе:

- убрать закоротку на входе каскада;
- ориентируясь по показаниям встроенного вольтметра, установить на выходе I генератора ГЗ-109 напряжение 10 мВ частотой 1000 Гц;
- подключить к входу каскада сигнальные кабели цифрового вольтметра, первого канала осциллографа и генератора синусоидальных сигналов. Второй канал осциллографа подключить к коллектору транзистора. Анализируя изображение на экране осциллографа, убедиться в нормальной (без искажений) работе усилителя. Откорректировать величину входного напряжения каскада, пользуясь показаниями ЦВ. Переключить ЦВ на выход каскада;
- используя два канала осциллографа, снять попарно, фазировав, следующие осциллограммы: $u_{вх}(t)$; $u_{вых}(t)$; $u_{Rб1}(t)$; $u_{Rб2}(t)$; $u_{бэ}(t)$; $u_{кэ}(t)$; $u_{Rк}(t)$; $u_{Rэ}(t)$; $u_{Cп1}(t)$; $u_{Cп2}(t)$; $u_{Cэ}(t)$ (при работе с двумя каналами учесть, что **“земли”** **обоих каналов присоединяются к одной точке схемы!!!**);

- измерить с помощью ЦВ необходимые параметры для расчета входного сопротивления каскада и коэффициентов усиления по току, напряжению и мощности, рассчитать $R_{вх}$, K_U , K_I , K_P ; сравнить полученные значения с рассчитанными в предварительном задании, сделать выводы;
- повторить предыдущий пункт, исключив из схемы конденсатор C_3 . Оценить влияние последовательной отрицательной обратной связи по току на основные параметры усилительного каскада;
- вернуть конденсатор на место. Повторить измерения коэффициентов усиления, изменив на 20 % (в большую и меньшую стороны) сопротивление коллекторного резистора. Оценить влияние R_k на коэффициенты усиления каскада;
- вернуть в схему прежний резистор R_k . Последовательно меняя сопротивление нагрузки каскада ($R_n = \infty$; 51 к; 33 к, 15 к; 10 к; 4,7 к; 2 к; 1 к; 560 Ом), измерять соответствующее выходное напряжение, фиксируя результат. Сделав необходимые расчеты, построить нагрузочную характеристику $U_{вых} = f(I_{вых})$, определить выходное сопротивление каскада;
- восстановить первоначальное значение сопротивления нагрузки $R_n = 10$ к. Проверить и при необходимости откорректировать входное напряжение каскада ($U_{вх} = 10$ мВ). Снять амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики каскада (15÷20 точек), меняя частоту входного сигнала в диапазоне от 20 Гц до 200 кГц (особое внимание уделить низким и высоким частотам). Определить коэффициенты частотных искажений на граничных частотах, сравнить полученные результаты с расчетными, сделать выводы.
- восстановить первоначальное значение частоты входного напряжения $f = 1$ кГц. Отключить от входа усилителя источник сигнала. Закоротив входные зажимы каскада, измерить с помощью ЦВ напряжение шумов на выходе, зафиксировав результат.
- восстановить первоначальное состояние схемы. Меняя входной сигнал в диапазоне от 0 до 3 В (10÷15 точек) и отслеживая изображение выходного сигнала на экране осциллографа, снять с помощью ЦВ амплитудную характеристику $U_{ввых} = f(U_{вх})$ каскада. Отметить, при каких входном и выходном напряжениях начинают заметно проявляться нелинейные искажения выходного сигнала. Определить динамический диапазон усилителя.

е) исследовать усилительный каскад ОЭ, работающий в режиме класса В, на постоянном и переменном токе:

- отключить от исследуемого каскада питающее напряжение и входной сигнал. Исключить из схемы цепь эмиттерной термостабилизации R_3, C_3 . Эмиттер транзистора присоединить к «земляной» шине. Заменить нижний по схеме резистор базового делителя $R_{б2}$ переменным резистором с сопротивлением $R_{\sim} = 3,3 \text{ к}$. Подключить напряжение питания. Используя ЦВ, установить на эмиттерном переходе прямое смещение, соответствующее напряжению отсечки e_0 («пятке») прямой ветви входной ВАХ используемого транзистора;
- входную клемму усилителя соединить проводником с «земляной» шиной;
- измерить с помощью осциллографа (цифрового вольтметра), фиксируя результат, ток базы покоя транзистора $I_{0б}$ и напряжения $U_{0кэ}, U_{0бэ}, U_{0Rк}, U_{0Rн}$, на резисторах базового делителя $R_{б1}, R_{б2}$ и на конденсаторах C_{p1}, C_{p2} ;
- рассчитать реальный ток покоя коллектора $I_{0к}$ и статический коэффициент усиления транзистора β_0 ;
- отключить вход усилителя от «земляной» шины. Установить на первом выходе ГСС напряжение 1 В частотой 1 кГц. Подать на каскад входной сигнал. Снять, сфазировав, осциллограммы: $u_{вх}(t), u_{бэ}(t), u_{кэ}(t), u_{вых}(t)$. Определить реальное значение угла отсечки коллекторного тока Θ транзистора;
- отслеживая $u_{кэ}(t)$, повторить последний эксперимент, установив такую величину входного напряжения, при котором модуль минимального напряжения на коллекторе транзистора составит $\approx 0,5 \text{ В}$. Сделать выводы.

4. Исследование усилительного каскада по схеме с ОК:

а) используя построенные характеристики и рекомендации, изложенные в методических указаниях, рассчитать графо-аналитическим методом типовой резистивно-емкостной усилительный каскад с ОК на биполярном транзисторе (рис. 2), работающий в режиме класса А, при $E_k = 12 \text{ В}$, $R_3 = 3 \text{ кОм}$, $R_n = 10 \text{ кОм}$, $f_{н гр} = 100 \text{ Гц}$, $f_{в гр} = 50 \text{ кГц}$.

В результате расчета должны быть определены:

- максимально возможная выходная мощность $P_{\text{max вых}}$, которую обеспечивает каскад на заданной нагрузке без заметных искажений сигнала;
- амплитуда тока $I_{m \text{ вых}}$ и напряжения $U_{m \text{ вых}}$ на нагрузке;
- координаты положения рабочей точки транзистора на выходных ($I_{0к}, U_{0кэ}$) и входных ($I_{0б}, U_{0бэ}$) статических характеристиках;

- максимальный $I_{к\max}$ и минимальный $I_{к\min}$ токи транзистора;
- сопротивления резисторов базового делителя $R_{б1}$ и $R_{б2}$;
- емкости конденсаторов $C_{п1}$, $C_{п2}$;
- входное сопротивление каскада $R_{вх}$;
- выходное сопротивление каскада $R_{вых}$;
- коэффициенты усиления каскада по току K_I , напряжению K_U и мощности K_P .

Используя экспериментально полученные характеристики транзистора и результаты расчетов, построить на выходных статических характеристиках нагрузочные прямые исследуемого каскада по постоянному и переменному току.

Результаты расчета показать преподавателю;

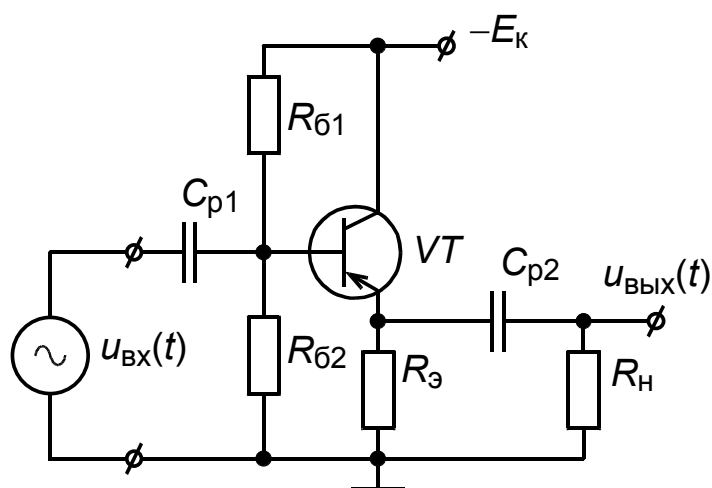


Рис. 2. Схема усилительного каскада по схеме с ОК

б) собрать на монтажной панели усилительный каскад с ОК, используя компоненты с заданными и рассчитанными параметрами. После проверки монтажа схемы преподавателем подать на каскад питающее напряжение (источник входного напряжения не подключать!);

с) исследовать усилитель в исходном состоянии (по постоянному току):

- входную клемму усилителя соединить проводником с «земляной» шиной;
- измерить с помощью осциллографа (цифрового вольтметра), фиксируя результат, ток базы покоя транзистора $I_{0б}$ и напряжения E_k , $U_{0кэ}$, $U_{0бэ}$, $U_{0Rэ}$, $U_{0Rн}$, на резисторах базового делителя $R_{б1}$, $R_{б2}$ и на конденсаторах $C_{п1}$, $C_{п2}$;

- рассчитать реальный ток покоя коллектора $I_{0к}$ и статический коэффициент усиления транзистора β_0 ;
- сравнить результаты проведенных измерений и предварительных расчетов: полученные значения параметров не должны отличаться от данных графо-аналитического расчета более, чем на 10%. Если это условие выполняется, можно приступить к выполнению следующего пункта, если нет – следует проверить монтаж каскада, результаты графо-аналитического расчета и результаты измерений;

d) исследовать усилительный каскад с ОК, работающий в режиме класса А, на переменном токе:

- убрать закоротку на входе каскада;
- ориентируясь по показаниям встроенного вольтметра, установить на выходе I генератора ГЗ-109 напряжение 1 В частотой 1000 Гц;
- подключить к входу каскада сигнальные кабели цифрового вольтметра, первого канала осциллографа и генератора синусоидальных сигналов. Второй канал осциллографа подключить к коллектору транзистора. Анализируя изображение на экране осциллографа, убедиться в нормальной (без искажений) работе усилителя. Откорректировать величину входного напряжения каскада, пользуясь показаниями ЦВ. Переключить ЦВ на выход каскада;
- используя два канала осциллографа, снять попарно, фазировав, следующие осциллограммы: $u_{вх}(t)$; $u_{вых}(t)$; $u_{R61}(t)$; $u_{R62}(t)$; $u_{63}(t)$; $u_{к3}(t)$; $u_{R3}(t)$; $u_{Cp1}(t)$; $u_{Cp2}(t)$;
- измерить с помощью ЦВ необходимые параметры для расчета входного сопротивления каскада и коэффициентов усиления по току, напряжению и мощности, рассчитать $R_{вх}$, K_U , K_I , K_P , сравнить полученные значения с рассчитанными в предварительном задании, сделать выводы;
- повторить измерения коэффициентов усиления, изменив в два раза (в большую и меньшую стороны) сопротивление эмиттерного резистора. Оценить влияние R_3 на коэффициенты усиления каскада;
- вернуть в схему прежний резистор R_3 . Последовательно меняя сопротивление нагрузки каскада ($R_H = \infty$; 51 к; 15 к; 10 к; 4,7 к; 2 к; 1 к; 560 Ом), измерять соответствующее выходное напряжение, фиксируя результат. Сделав необходимые расчеты, построить нагрузочную характеристику $U_{вых} = f(I_{вых})$, определить выходное сопротивление каскада;
- восстановить первоначальное значение сопротивления нагрузки $R_H = 10$ к. Проверить и при необходимости откорректировать

входное напряжение каскада ($U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$). Снять амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики каскада (15÷20 точек), меняя частоту входного сигнала в диапазоне от 20 Гц до 200 кГц (особое внимание уделить низким и высоким частотам). Определить коэффициенты частотных искажений на граничных частотах, сравнить полученные результаты с расчетными, сделать выводы.

- восстановить первоначальное значение частоты входного напряжения $f = 1 \text{ кГц}$. Меняя входной сигнал в диапазоне от 0 до 6 В (10÷15 точек) и отслеживая изображение выходного сигнала на экране осциллографа, снять с помощью ЦВ амплитудную характеристику $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ каскада. Отметить, при каких входном и выходном напряжениях начинают заметно проявляться нелинейные искажения выходного сигнала. Определить динамический диапазон усилителя.

е) исследовать усилительный каскад ОК, работающий в режиме класса В, на постоянном и переменном токе:

- отключить от исследуемого каскада питающее напряжение и входной сигнал. Заменить нижний по схеме резистор базового делителя $R_{\text{б2}}$ переменным резистором с сопротивлением $R_{\sim} = 3,3 \text{ к}$. Подключить напряжение питания. Используя ЦВ, установить на эмиттерном переходе прямое смещение, соответствующее напряжению отсечки e_0 («пятке») прямой ветви входной ВАХ используемого транзистора;
- входную клемму усилителя соединить проводником с «земляной» шиной;
- измерить с помощью осциллографа (цифрового вольтметра), фиксируя результат, напряжения $U_{0 \text{кэ}}$, $U_{0 \text{бэ}}$, $U_{0 \text{Рэ}}$, $U_{0 \text{Рн}}$, на резисторах базового делителя $R_{\text{б1}}$, $R_{\text{б2}}$ и на конденсаторах $C_{\text{р1}}$, $C_{\text{р2}}$;
- отключить вход усилителя от «земляной» шины. Подготовить к включению генератор прямоугольных импульсов Г5-54. После проверки преподавателем исходного состояния прибора включить генератор. Установить на основном выходе Г5-54 отрицательный импульс с амплитудой 1 В, длительностью 300 мкс и частотой 1 кГц. Подать на каскад входной сигнал. Снять, сфазировав, осциллограммы $u_{\text{вх}}(t)$, $u_{\text{бэ}}(t)$, $u_{\text{кэ}}(t)$, $u_{\text{вых}}(t)$, фиксируя все известные параметры импульсов;
- повторить последний эксперимент, установив величину входного напряжения 5 В. Сделать выводы.

ПРИМЕЧАНИЯ

1. Часть I лабораторной работы (пункты 1÷3) рассчитана на 8 часов, а часть II (пункт 4) – на 4 часа рабочего времени в лаборатории.
2. Лабораторная работа считается выполненной, если студент выполнил программу части I до пункта 3d, а части II – до пункта 4d, включительно, представил отчет и успешно защитился по всем пунктам программы; при этом рейтинг рассчитывается с понижающим коэффициентом 0,8 (80% от максимума).

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Для снятия характеристик транзистора на наборном поле лабораторного макета собирается схема, изображенная на рис. 3.

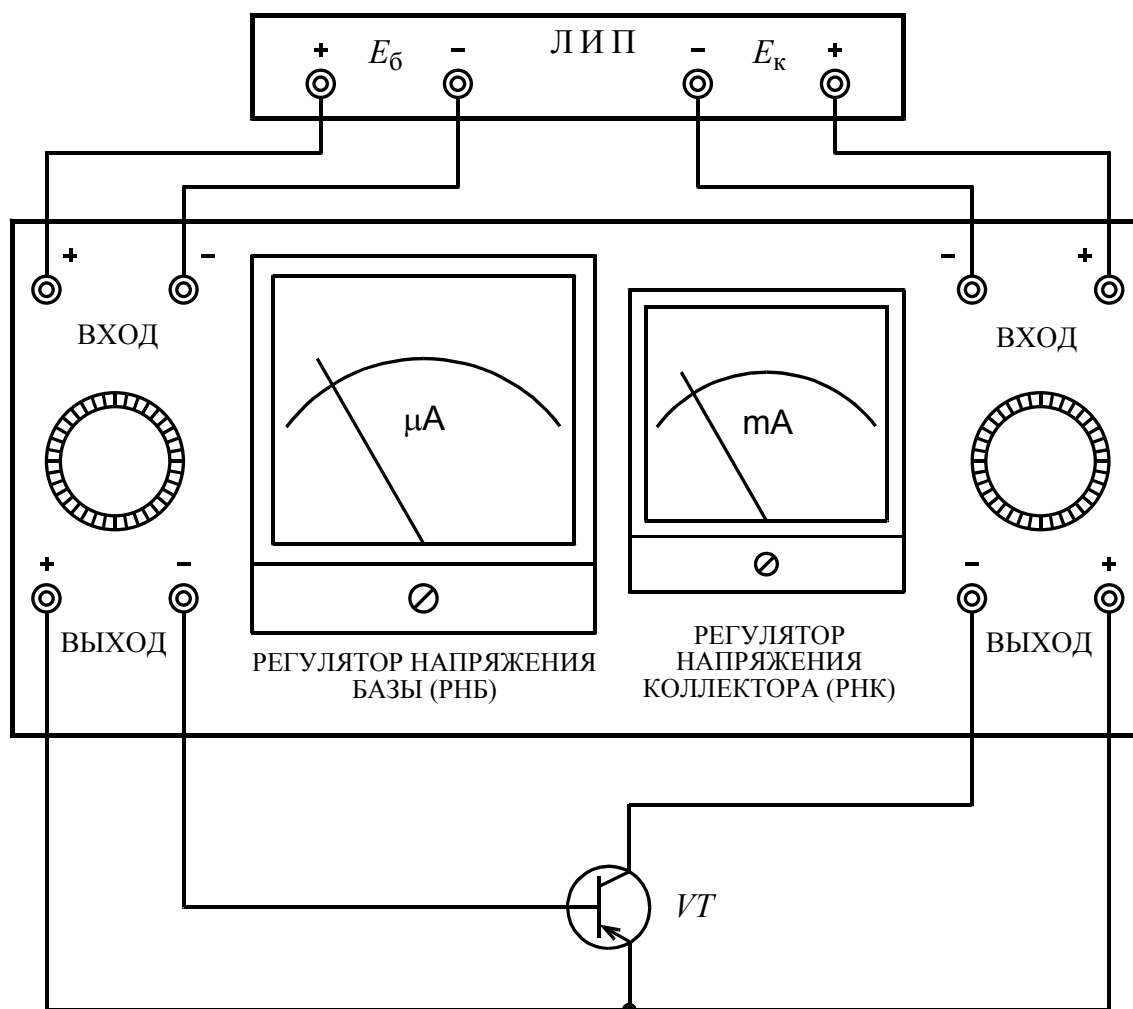


Рис. 3. Схема для снятия статических характеристик транзистора

В состав схемы входят:

ЛИП – лабораторный источник питания;

РНБ – регулятор напряжения базы, позволяющий изменять величину базового напряжения, а также производить измерения базового тока при помощи встроенного микроамперметра;

РНК – регулятор напряжения коллектора, позволяющий изменять величину коллекторного напряжения, а также производить измерения тока коллектора при помощи встроенного миллиамперметра;

VT – исследуемый транзистор.

2. При снятии статических характеристик транзистора на выходе источника питания, питающего базовую цепь, необходимо установить напряжение $E_б = 2$ В, а на выходе, питающем коллекторную цепь, напряжение $E_к = 12$ В.

Контроль и измерение напряжений непосредственно на базе и коллекторе исследуемого транзистора производится цифровым вольтметром.

3. Схема усилительного каскада, выполненного на транзисторе с общим эмиттером (ОЭ), изображена на рис. 1, а схема усилительного каскада, выполненного на транзисторе с общим коллектором (ОК), изображена на рис. 2.

4. Расчёт параметров элементов схемы усилительного каскада осуществляется графоаналитическим методом с использованием полученных ранее статических характеристик.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА RC-УСИЛИТЕЛЯ (ОЭ)

Исходные данные:

а) усилительный элемент (УЭ) – германиевый низкочастотный маломощный транзистор общего применения типа МП25, МП26 ($p-n-p$);

б) напряжение питания $E_к = (-)12$ В;

с) сопротивление нагрузки $R_н = 10$ кОм;

д) коллекторное сопротивление $R_к = 3$ кОм;

е) сопротивление в эмиттерной цепи $R_э = 330$ Ом;

ф) нижняя граничная частота усилителя $f_{н гр} = 500$ Гц;

г) верхняя граничная частота усилителя $f_{в гр} = 50$ кГц;

- h) коэффициенты частотных искажений каскада на нижней и верхней граничных частотах $M_H = M_B = 3$ дБ;
- i) температура окружающей среды $t^\circ = (10 \div 30)$ °С;

В результате расчета должны быть определены:

- сопротивление нагрузки УЭ по переменному току;
- амплитуда тока $I_{m \text{ Вых}}$ и напряжения $U_{m \text{ Вых}}$ на нагрузке каскада;
- максимально возможная выходная мощность $P_{\text{max Вых}}$, которую обеспечивает каскад на заданной нагрузке без заметных искажений сигнала;
- амплитуда переменной составляющей тока коллектора транзистора I_{mk} ;
- координаты положения рабочей точки транзистора на выходных ($I_{0k}, U_{0kэ}$) и входных ($I_{0б}, U_{0бэ}$) статических характеристиках;
- максимальный $I_{k \text{ max}}$ и минимальный $I_{k \text{ min}}$ токи транзистора;
- сопротивления резисторов базового делителя $R_{б1}$ и $R_{б2}$;
- емкости конденсаторов $C_{p1}, C_{p2}, C_э$;
- требования, предъявляемые к частотным свойствам усилительного элемента (УЭ) и соответствие быстродействия используемого транзистора условиям технического задания;
- коэффициенты усиления каскада по току K_I , напряжению K_U и мощности K_P .

Используя экспериментально полученные характеристики транзистора и результаты расчетов, построить на выходных статических характеристиках нагрузочные прямые исследуемого каскада по постоянному и переменному току.

Порядок расчета

- 1) сопротивление нагрузки каскада по переменному току:

$$R_{H\sim} = \frac{R_H \cdot R_K}{R_H + R_K};$$

- 2) амплитуда напряжения на выходе и тока нагрузки:

$$U_{m \text{ Вых}} = \frac{E_K \cdot k_{\text{зап}}}{1 + \left(1 + \frac{R_э}{R_K}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_K}{R_H}\right)}, \quad I_{m \text{ Вых}} = \frac{U_{m \text{ Вых}}}{R_H},$$

где $k_{\text{зап}} = (0,8 \div 0,95)$ – коэффициент запаса;

3) максимально возможная выходная мощность, которую обеспечивает каскад на заданной нагрузке без заметных искажений сигнала:

$$P_{\text{max вых}} = \frac{U_{m \text{ вых}} \cdot I_{m \text{ вых}}}{2};$$

4) амплитуда переменной составляющей коллекторного тока:

$$I_{mк} = \frac{U_{m \text{ вых}}}{R_{H\sim}};$$

5) ток покоя коллектора: $I_{0к} \geq I_{mк} + [\beta + (1,5 \div 10)] \cdot I_{к0 \text{ max}}$,

где $I_{к0 \text{ max}}$ – обратный тепловой ток коллекторного перехода транзистора (справочный параметр) при максимальной рабочей температуре;

6) напряжение покоя коллектора: $U_{0кз} \geq (1,2 \div 3) \cdot U_{к \text{ нас}} + U_{m \text{ вых}}$,

где $U_{к \text{ нас}}$ – напряжение насыщения транзистора (справочный параметр);

7) координаты рабочей точки на входной характеристике транзистора:

$$I_{0б} = I_{0к} / \beta_0 \text{ – ток покоя базы,}$$

где β_0 – статический коэффициент усиления транзистора по току в схеме ОЭ,

$U_{0бэ}$ – напряжение покоя база-эмиттер, определяемое по входной ВАХ транзистора при известном $I_{0б}$;

8) максимальный и минимальный токи транзистора:

$$I_{к \text{ max}} = I_{0к} + I_{mк},$$

$$I_{к \text{ min}} = I_{0к} - I_{mк};$$

9) входное сопротивление каскада: $R_{вх} = R_б || r_{вхэ}$,

где $R_б = R_{б1} || R_{б2}$ – параллельное соединение резисторов базового делителя,

$$r_{вхэ} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} \right|_{U_{кз} = \text{const}} \text{ – входное сопротивление транзистора в схеме с}$$

общим эмиттером, определяемое по входной статической ВАХ в окрестностях рабочей точки;

10) расчет емкостей навесных конденсаторов и коэффициента частотных искажений на нижней граничной частоте:

$$C_{p1} \geq \frac{1}{\omega_H \cdot (R_T + R_{Bx}) \cdot \sqrt{M_{H1}^2 - 1}}, \quad M_{H1} = \sqrt{1 + \frac{1}{\omega_H^2 \cdot C_{p1}^2 \cdot (R_T + R_{Bx})^2}},$$

$$C_3 \geq \frac{1}{\omega_H \cdot R_\Sigma \cdot \sqrt{M_{H2}^2 - 1}}, \quad M_{H2} = \sqrt{1 + \frac{1}{\omega_H^2 \cdot R_\Sigma^2 \cdot C_3^2}},$$

$$C_{p2} \geq \frac{1}{\omega_H \cdot (R_{Bx} + R_H) \cdot \sqrt{M_{H3}^2 - 1}}, \quad M_{H3} = \sqrt{1 + \frac{1}{\omega_H^2 \cdot C_{p2}^2 \cdot (R_{Bx} + R_H)^2}},$$

где: $M_H = M_{H1} \cdot M_{H2} \cdot M_{H3} = \frac{K_{U0}}{K_{UH}}$ – коэффициент частотных искажений

усилительного каскада на нижней граничной частоте, $M_{H, дб} = 20 \cdot \lg(M_H)$;

M_{H1}, M_{H2}, M_{H3} – коэффициенты частотных искажений усилительного каскада на нижней граничной частоте, обусловленные влиянием конденсаторов C_{p1}, C_3, C_{p2} , соответственно. При предварительных расчетах принимают $M_{H1} = M_{H2} = M_{H3} = \sqrt[3]{M_H}$;

K_{U0}, K_{UH} – коэффициенты усиления каскада в области средних частот и на нижней граничной частоте, соответственно;

$\omega_H = 2 \cdot \pi \cdot f_H$ – нижняя граничная частота усилителя (угловая);

$R_T \approx 25 \text{ Ом}$ – внутреннее сопротивление генератора ГЗ-109 (источника сигнала) при использовании балластной нагрузки;

$R_{Bx} \cong R_K$ – выходное сопротивление каскада с общим эмиттером;

$R_\Sigma = \frac{(R_T || R_0) + r_{Bx3}}{\beta + 1}$ – выходное сопротивление транзистора со

стороны эмиттера;

11) определение требований к частотным свойствам транзистора (проверка на соответствие УЭ требованиям технического задания):

$$\tau_\beta \leq \frac{\sqrt{M_{B1}^2 - 1}}{\omega_B}, \quad f_\beta \geq \frac{\omega_B}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{M_{B1}^2 - 1}};$$

$$C_{K(3)} \leq \frac{\sqrt{M_{B2}^2 - 1}}{\omega_B \cdot (r_{K(3)} || R_{H\sim})} - C_H,$$

где: $M_B = \frac{K_{U0}}{K_{UB}} = M_{B1} \cdot M_{B2}$ – коэффициент частотных искажений усилительного каскада на верхней граничной частоте, $M_{B, ДБ} = 20 \cdot \lg(M_B)$;

M_{B1}, M_{B2} – коэффициенты частотных искажений усилителя на верхней граничной частоте, обусловленные влиянием инерционности носителей заряда (уменьшением $\beta(\omega)$ с ростом частоты сигнала) и совместным влиянием емкостей: обратносмещенного коллекторного перехода транзистора, нагрузки и паразитных емкостей монтажа. В предварительных расчетах принимают $M_{B1} = M_{B2} = \sqrt{M_B}$.

$\omega_B = 2 \cdot \pi \cdot f_B$ – верхняя граничная частота усилительного каскада (угловая);

$$\tau_B = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_B} \text{ – постоянная времени транзистора в схеме ОЭ;}$$

f_B – граничная частота транзистора в схеме ОЭ (справочный параметр);

$$r_{к(э)} = \left. \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_{к}} \right|_{I_б = const} \text{ – динамическое (дифференциальное)}$$

сопротивление обратносмещенного коллекторного перехода в схеме ОЭ;

12) коэффициенты усиления усилителя:

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \beta \cdot \frac{r_{к(э)} \parallel R_{H\sim}}{r_{ВХ\ э}} \text{ – коэффициент усиления по напряжению;}$$

$$K_I = \frac{I_{ВЫХ}}{I_{ВХ}} = \beta \cdot \frac{R_{ВХ}}{r_{ВХ\ э}} \cdot \frac{(r_{к(э)} \parallel R_{H\sim})}{R_H} \text{ – коэффициент усиления по току;}$$

$$K_P = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}} = K_U \cdot K_I \text{ – коэффициент усиления по мощности.}$$

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет к лабораторной работе выполняется индивидуально, аккуратно, грамотно и должен содержать следующие разделы:

1) цель работы;

2) программа работы (укрупненно, без подробного описания действий, предпринимаемых при выполнении того или иного подпункта);

3) последовательно изложенные результаты выполнения каждого пункта программы, включающие (по мере необходимости):

- результаты измерений, сведенные в таблицу;
- сравнение результатов графо-аналитического расчета и эксперимента с расчетом погрешностей;
- сфазированные осциллограммы;

4) выводы (приводятся либо в конце работы, либо в конце каждого пункта по ходу выполнения).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расскажите о существующих способах включения транзисторов в электронную цепь. Каким образом на практике определяется схема включения транзистора?
2. Приведите полную схему замещения биполярного транзистора в схеме ОЭ (ОБ). Объясните физический смысл всех элементов, входящих в схему. Как найти значения этих элементов и какова их приблизительная величина? Как изменится эта схема на нижних (верхних) частотах?
3. Сравните каскады ОБ, ОЭ и ОК по основным показателям. Когда предпочтительнее использовать ту или иную схему?
4. Расскажите принцип действия электронного усилителя на примере усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.
5. Объясните назначение всех элементов в типовом усилительном каскаде ОЭ.
6. Приведите сфазированные диаграммы токов и напряжений в исследуемом каскаде ОЭ: $U_{вх}(t)$; $U_{ср1}(t)$; $U_{оэ}(t)$; $i_{к}(t)$; $U_{кэ}(t)$; $U_{Rэ}(t)$; $U_{ср2}(t)$; $U_{вых}(t)$.
7. Почему каскад с ОЭ чаще используется на практике, чем другие?
8. В каких классах усиления может работать усилительный элемент? Каким образом обеспечивается требуемый режим? Какой основной параметр характеризует класс усиления? В каких случаях используется тот или иной класс?
9. Какие способы задания рабочей точки транзистору Вы знаете? Какой из них, на Ваш взгляд, предпочтительнее? Почему?
10. Поясните действие механизма эмиттерной термостабилизации положения рабочей точки в схеме ОЭ.
11. Какая из схем включения транзистора обеспечивает наилучшую стабильность положения рабочей точки? Почему?

12. Приведите общую схему замещения типового усилительного каскада ОЭ на переменном токе. Объясните физический смысл всех элементов, входящих в схему.
13. Используя схему замещения каскада ОЭ на нижних частотах, поясните, каким образом и почему влияют на коэффициент усиления навесные конденсаторы (C_{p1} , $C_э$, C_{p2}). Какой из этих конденсаторов имеет, как правило, большую ёмкость?
14. Покажите на конкретном примере, каким образом осуществляется построение динамических выходных характеристик (нагрузочных прямых) по постоянному и переменному току для каскадов ОЭ и ОК. Каким образом по этим характеристикам определить величину выходного сигнала при заданном изменении базового тока?
15. Используя схему замещения каскада ОЭ для средних частот, получите выражение для определения какого либо из параметров (по указанию преподавателя): $K_{и}$; $R_{вх}$; K_i ; K_p ; $R_{вых}$. Поясните, каким образом и почему (с физической точки зрения) зависят эти параметры от значений входящих в формулу элементов?
16. Что нужно знать, чтобы задать требуемые координаты рабочей точки транзистора на выходных характеристиках в схемах ОЭ (ОК)? Как это осуществляется на практике?
17. На какие показатели усилительного каскада влияет величина сопротивления в коллекторной цепи? Какие рекомендации по выбору R_k существуют?
18. Почему каскад ОК называется еще: «эмиттерный повторитель»; «трансформатор сопротивления»?
19. Какие показатели каскада ОЭ изменятся, если конденсатор $C_э$ цепочки термостабилизации: а) потеряет емкость ($C_э=0$); б) пробьется накоротко? Как в этом случае изменится режим каскада по постоянному (переменному) току?
20. Каким образом измерить K_i исследуемого каскада с помощью универсального цифрового вольтметра? Приведите схему измерения.
21. Что такое «собственные шумы усилителя»? Каким образом они определяются практически?
22. Приведите типичный вид амплитудной характеристики усилителя. Объясните ход кривой.
23. Чем обусловлены нелинейные искажения в усилителе? Какой параметр используется для их оценки?
24. Что такое «линейные искажения» в усилителе? Чем они обусловлены и какими параметрами оцениваются? Приведите типичный вид амплитудно- и фазо-частотной характеристик резистивно-ёмкостного усилительного каскада. Объясните ход

- указанных зависимостей.
25. Приведите схему усилительного каскада, в котором используется последовательная отрицательная обратная связь по переменному току. Каким образом эта связь влияет на основные параметры усилителя?
 26. Приведите критерии, по которым производится выбор конкретного транзистора в качестве усилительного элемента каскада.
 27. Каким образом рассчитывается требуемое напряжение питания усилительного каскада?
 28. Как определить сопротивления резисторов делителя при задании рабочей точки транзистору методом фиксированного напряжения в каскаде ОЭ (ОК)?
 29. Каково целесообразное значение тока делителя при задании рабочей точки транзистору методом фиксированного напряжения в каскаде ОЭ (ОК)? Почему? Как отражается на параметрах каскада увеличение (уменьшение) тока делителя?
 30. Приведите вид внешней (нагрузочной) характеристики усилителя. Объясните ход кривой. Чем ограничивается минимально-допустимое сопротивление нагрузки?
 31. Как определить входное сопротивление транзистора? От каких факторов оно зависит?
 32. Что такое “электронный усилитель”? Чем он отличается от повышающего трансформатора?
 33. Укажите критерии, по которым усилительный каскад относят к: а) усилителям напряжения; б) усилителям тока; в) усилителям мощности.
 34. Приведите структурную схему усилительного каскада. Объясните назначение всех блоков, входящих в схему.
 35. Как, используя только универсальный цифровой вольтметр, определить пробой структуры эмиттер-коллектор транзистора усилительного каскада? Предложите несколько вариантов.
 36. Предложите методы плавного регулирования коэффициента усиления каскада.
 37. Какие типы резисторов и конденсаторов целесообразно применять при практической реализации RC -усилителя бытового назначения? Обоснуйте ответ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. Учебник для вузов.- М.: Высш. школа, 1982.
2. Остапенко Г.С. Усилительные устройства. Учебник для вузов.- М., Радио и связь, 1989.

Учебное издание

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсам «Схемотехника», «Электроника» для студентов III курса,
обучающихся по направлению 210100 Электроника и нанoeлектроника,
201000 Биотехнические системы и технологии

Составитель

ЯРОСЛАВЦЕВ Евгений Витальевич


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати _____.2012. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,68
Заказ . Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru