

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ОДНОКАСКАДНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

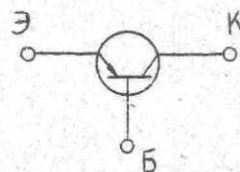
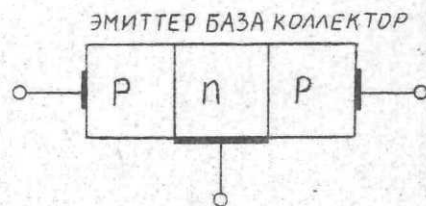
(2 часа)

I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

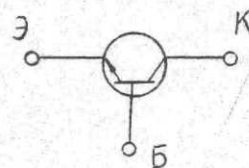
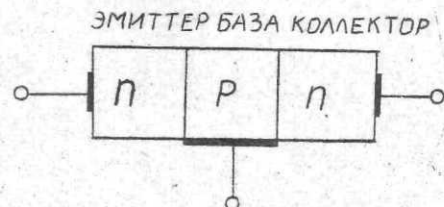
Исследование характеристик биполярных транзисторов и характеристик однокаскадных транзисторных усилителей; приобретение навыков снятия характеристик биполярных транзисторов и транзисторных усилителей; определения простейших неисправностей в однокаскадных усилителях.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Статистические характеристики биполярного транзистора и его схема замещения. Биполярный транзистор — полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ -переходами, — для усиления мощности электрических сигналов, имеющий три вывода. Биполярные транзисторы представляют собой трехслойную полупроводниковую структуру с чередующимся типом электропроводности слоев. В зависимости от чередования слоев существуют транзисторы типов $p-n-p$ и $n-p-n$. На рис. 3.1, а схематически показано устройство и условные графические изображения биполярных транзисторов. Центральная область биполярного транзистора называется базой Б. Две других области называются эмиттером Э и коллектором К. Соответственно различают эмиттерный и коллекторный $p-n$ -переходы. К эмиттерному переходу напряжение прикладывается в прямом (проводящем) направлении. Величина его незначительна (0,2+0,7 В). К коллекторному переходу напряжение прикладывается в обратном (запирающем) направлении, поэтому оно сравнительно велико (5+10 В). Электрическая работа транзистора подробно описывается с помощью семейства его статических вольт-амперных характеристик (ВАХ). Практический интерес представляют зависимости напряжения и тока входной цепи (входные ВАХ) и выходной цепи (выходные ВАХ). Вид характеристик зависит от способа включения транзистора.



а)



б)

Рис.3.1. Транзисторы типа $p-n-p$ (а) и $n-p-n$ (б)

Наибольшее распространение из схем включения транзисторов получила схема с общим эмиттером (ОЭ), представленная на рис.3.2. Для этой схемы включения, как правило, приводятся характеристики

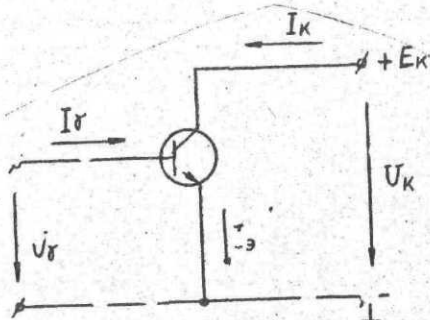


Рис.3.2. Схема включения транзисторов п-р-п типа с общим эмиттером

в справочниках. Диапазон основных параметров биполярных транзисторов, включенных по схеме с ОЭ (усилитель напряжения) и по схеме с общим коллектором ОК (эмиттерный повторитель), приведен в табл.1.

Т а б л и ц а 1

Основные параметры схем включения транзисторов

П а р а м е т р	Схема включения с ОЭ (усилитель напряжения)	Схема включения с ОК (эмиттерный повторитель)
Входное сопротивление	200+2000 Ом	10+500 кОм
Выходное сопротивление	30+70 кОм	50+100 Ом
Коэффициент усиления по напряжению	30+1000	1
Коэффициент усиления по току	10+200	10+200
Коэффициент усиления по мощности	3000+30000	10+200

Для схемы с 0Э входными статическими характеристиками являются зависимости $I_{\delta} = f(U_{\delta})$ (при $U_{\kappa} = \text{const}$), рис. 3 а, и выходными $I_{\kappa} = f(U_{\kappa})$ (при $I_{\delta} = \text{const}$), рис. 3 б. Так как входные характеристики при изменении U_{κ} в широких пределах изменяются незначительно, то можно пользоваться одной характеристикой $I_{\delta} = f(U_{\delta})$, соответствующей некоторому среднему значению U_{κ} . Если входной сигнал имеет небольшую величину и вариация ΔI_{δ} , ΔU_{δ} , ΔI_{κ} , ΔU_{κ} малы, то работа усилителя будет проходить на линейных участках входных и выходных характеристик. В этом случае транзистор можно представить в виде линейного четырехполюсника. Связь между входными и выходными токами и напряжениями в эквивалентном четырехполюснике выражается системой уравнений

$$\begin{cases} \Delta U_{\delta} = h_{11} \Delta I_{\delta} + h_{12} \Delta U_{\kappa} \\ \Delta I_{\kappa} = h_{21} \Delta I_{\delta} + h_{22} \Delta U_{\kappa} \end{cases}$$

где коэффициенты h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} называются h -параметрами транзистора и используются для определения его физических параметров. h -параметры могут быть получены экспериментально, а также из статических ВАХ на линейных участках вольты-амперной точки. Параметры h_{11} и h_{12} определяются по входным характеристикам

$$h_{11} \approx \left| \frac{\Delta U_{\delta}}{\Delta I_{\delta}} \right|_{U_{\kappa} = \text{const}}$$

- входное сопротивление транзистора

$$h_{12} \approx \left| \frac{\Delta U_{\delta}}{\Delta U_{\kappa}} \right|_{I_{\delta} = \text{const}}$$

- коэффициент внутренней обратной связи

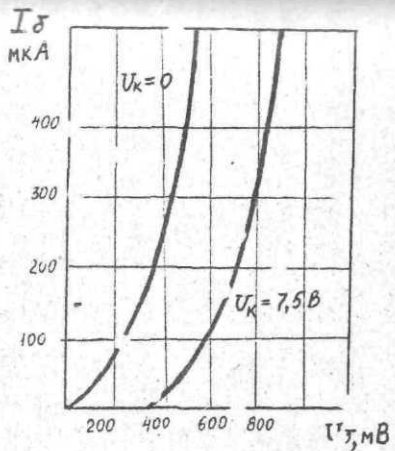
Параметры h_{21} и h_{22} рассматриваются по выходным характеристикам

$$h_{21} \approx \left| \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\delta}} \right|_{U_{\kappa} = \text{const}}$$

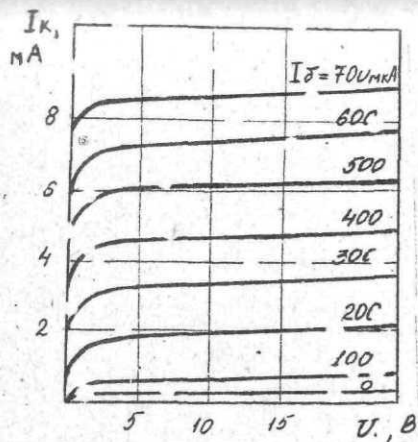
- коэффициент усиления по току (β).

$$h_{22} \approx \left| \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta U_{\kappa}} \right|_{I_{\delta} = \text{const}}$$

- выходная проводимость транзистора



а)



б)

рис.3.3. Входные (а) и выходные (б) статические характеристики

Так как входное напряжение U_{δ} не зависит от выходного U_{κ} , то $h_{22} \approx 0$. Диапазон параметров представлен в табл. 2.1 для схемы с общим эмиттером и эмиттерного повторителя. Учитывая что нелинейный элемент (транзистор) рассматривается в линейном приближении, необходимо учитывать определенные ограничения на рабочую область характеристики. При работе на высоких частотах коэффициент усиления по току h_{21} и за инерционности носителей заряда уменьшается. Кроме того, на повышенных частотах начинает сказываться влияние паразитной емкости коллекторного перехода. Схема замещения транзистора h -параметрах при $h_{12} = 0$ представлена на рис 3.4.

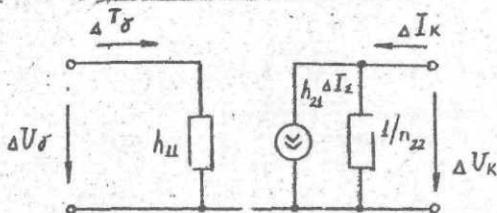


Рис.3.4. Схема замещения транзистора

Усилительный каскад с общим эмиттером (усилитель напряжения) на сиполарном транзисторе.

Принципиальная схема усилительного каскада с общим эмиттером приведена на рис.3.5. Напряжение $U_{\delta x}$ от источника с переменной

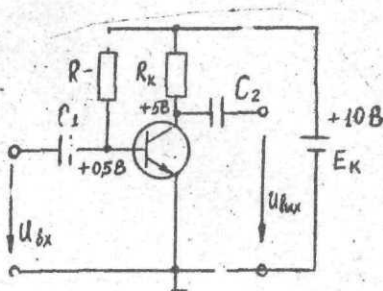


Рис.3.5. Усилительный каскад с общим эмиттером

эда подается на вход каскада. За счет использования энергии постоянного напряжения происходит значительное увеличение мощности на выходе усилителя. Конденсаторы C_1 и C_2 служат для разделения сигнала — предотвращают попадание на вход каскада и на нагрузку постоянной составляющей тока. Величины сопротивлений R_1 , R_k и напряжение E_k определяют положение рабочей точки на характеристиках транзистора в режиме покоя и начальные значения I_{B0} , U_{B0} , I_{K0} , U_{K0} .

Наиболее простым методом расчета основных параметров усилителя (коэффициента усиления по току K_I , по напряжению K_U , входного $R_{вх}$ и выходного $R_{вых}$ сопротивлений) является графоаналитический метод, при котором выбор рабочей точки производится графически, а для расчета других параметров используются h -параметры транзистора.

Рассмотрим на примере данные от расчета. Пусть имеется усилительный каскад с $E_k = 15$ В, $R_k = 2$ кОм. Необходимо выбрать рабочую точку, определить соответствующие ей величины I_{B0} , U_{B0} , I_{K0} , U_{K0} и рассчитать величину R_1 , необходимую для создания режима работы усилителя в выбранной рабочей точке. На выходных характеристиках (рис.3.6) проводим линию нагрузки, в соответствии с уравнением $U_k = E_k - R_k I_k$, и по точкам пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками транзистора строим переходную характеристику усилителя $I_k = f(I_B)$. Рабочую точку (РТ)

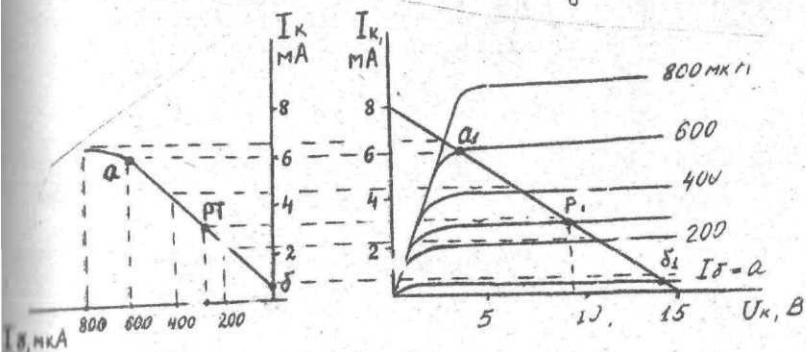


Рис.3.5. Построение линии нагрузки и переходной характеристики

покою выбираем в средней части линейного участка характеристики аб, что соответствует примерно середине рабочего участка линии нагрузки $a_1 b_1$. Рабочей точке покоя соответствуют значения $I_{K0} = 3 \text{ мА}$, $U_{K0} = 8 \text{ В}$, $I_{\delta 0} = 300 \text{ мкА}$. По входной характеристике (рис. 3, а) определяем $U_{\delta 0}$ по найденной величине $I_{\delta 0}$. Для создания требуемого тока базы $I_{\delta 0}$

$$R_{\delta} = \frac{E_K - U_{\delta 0}}{I_{\delta 0}} \approx 50 \text{ кОм}.$$

По переходной характеристике также можно определить те ограничения, которые накладываются на величину входного сигнала для работы усилительного каскада в линейном режиме (без искажения формы передаваемого сигнала). В рассматриваемом примере амплитуда входного тона не должна превышать 300 мкА, иначе возникнут искажения выходного сигнала.

На рис. 3.5 показано приблизительно распределение потенциалов (потенциальная диаграмма усилительного каскада) в различных точках каскада. Так если $E_K = +1 \text{ В}$, то потенциал коллектора $\varphi_K = +5 \text{ В}$, потенциал базы $\varphi_{\delta} = +0,5 \text{ В}$. Для расчета основных параметров усилителя необходимо определить h -параметры по соответствующим характеристикам вблизи рабочей точки. И с их помощью можно рассчитать:

а) коэффициент усиления по напряжению в области средних частот в режиме холостого хода:

$$K_{U_{\text{хх}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot \frac{R_K}{1 + R_K h_{22}},$$

так как

$$R_K h_{22} \ll 1, (h_{22} = 10^{-5} \div 10^{-6} \text{ см}, R_K = 10^3 \div 10^4 \text{ Ом}), \text{ то } K_{U_{\text{хх}}} \approx \frac{h_{21} \cdot R}{h_{11}}$$

б) выходное сопротивление

$$R_{R_{\text{х}}} = \frac{h_{11} R_{\delta}}{h_{11} + R_{\delta}} \approx h_{11},$$

так как $R_{\delta} \gg h_{11}$;

в) входное сопротивление

$$K'_{\text{вх}} = \frac{R_K}{1 + h_{21} R_{\text{вх}}}$$

Недостатком рассмотренной схемы усиления является зависимость ее параметров от температуры. На рис.3.7 представлена схема усилительного каскада с температурной стабилизацией рабочей точки.

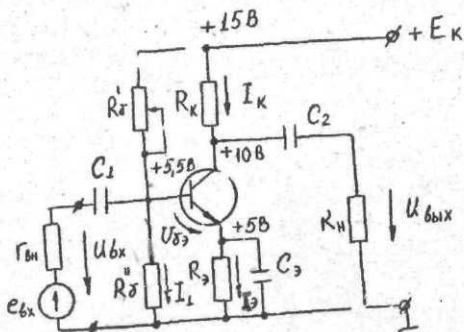


Рис.3.7. Схема усилительного каскада с температурной стабилизацией рабочей точки

В схеме усилительного каскада с температурной стабилизацией функцию цепи смещения выполняет делитель R_1, R_2 , а функцию температурной стабилизации — звено, состоящее из резистора R_3 и конденсатора C_3 , включенных в цепь эмиттера. При повышении температуры увеличиваются токи транзистора. Ток эмиттера $I_э$ создает дополнительное падение напряжения на резисторе R_3 . Согласно второму закону Кирхгофа

$$U_{бэ} = I_1 R_2 - I_э R_3$$

Следовательно, увеличение тока эмиттера $I_э$ приводит к уменьшению напряжения $U_{бэ}$, вследствие чего эмиттерный переход смещается в сторону запирающего. Ток базы и ток коллектора уменьшаются, т.е. устанавливается прежний режим работы. Потенциальная диаграмма каскада показана на рис.3.7. Рассмотренная схема усилительного каскада с общим эмиттером "поворачивает" фазу выходного напряжения по отношению к фазе входного напряжения на 180° . Представленный на рис.3.8 усилительный каскад с общим коллекто-

ром "повторяет" фазу входного напряжения, т.е. фаза выходного напряжения практически совпадает с фазой входного. Обычно такой каскад носит название эмиттерный повторитель. Основное назначение эмиттерного повторителя - согласование каскадов с различными выходными и входными сопротивлениями. Это возможно вследствие особенности эмиттерного повторителя: очень большое входное со-

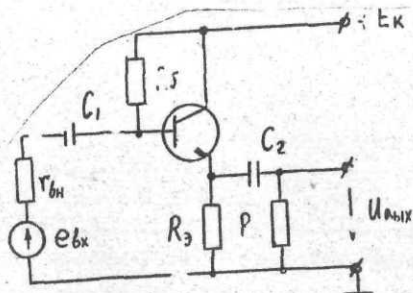


Рис.3.8. Схема эмиттерного повторителя

противление $R_{вх}$ и незначительное выходное сопротивление $K_v \approx 1$. Коэффициент усиления по напряжению эмиттерного повторителя. Основным качественным показателем любого усилителя является вносимое в процессе его работы искажение сигнала. Различают частотные и нелинейные искажения сигнала.

Частотные искажения обуславливаются зависимостью от частоты параметров усилителя и самого транзистора. Важнейшим показателем усилителей, работающих с частотными искажениями, является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) - зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты $K = f(f)$ (рис.3.9). Диапазон частот от f_n до f_d , охватываемый графически на уровне $0,707 K_{max}$, называется полосой пропускания усилителя. Нелинейные искажения образуются за счет наличия в усилителях элементов с нелинейными характеристиками. Они связаны только с амплитудой входного сигнала. Зависимость выходного напряжения усилителя от входного $U_{вых} = f(U_{вх})$ называется амплитудной характеристикой (рис.3.10).

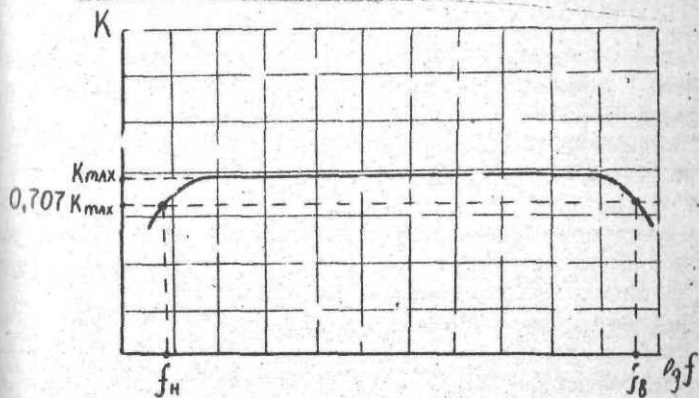


Рис.3.9. Амплитудно-частотная характеристика усилителя

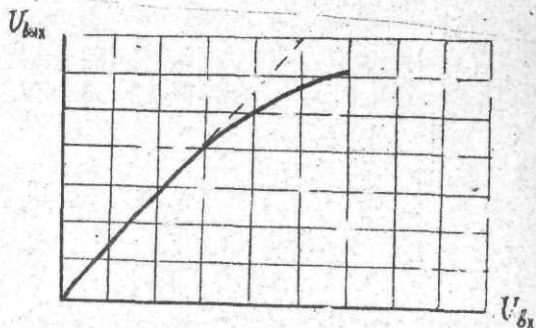


Рис.3.10. Амплитудная характеристика усилителя

На рис.3.II приведена схема включения транзистора для снятия входных выходных характеристик биполярного транзистора. Для исследования одиночного усилительного каскада по схеме с общим эмиттером используется схема с температурной стабилизацией рабочей точки (рис.3.7). С помощью схемы, изображенной на рис.3.8, исследуются свойства эмиттерного повторителя. Во всех указанных схемах в качестве источника входного сигнала используется генератор сигнала ГЗ-33. Также в работе применяются следующие приборы:

1. Вольтметр магнитоэлектрической системы.
2. Амперметры магнитоэлектрической системы.
3. Стабилизированный источник питания "Электроника В5-II".
4. Осциллограф СИ-19Б.
5. Цифровой вольтметр ВК7-10А/1.

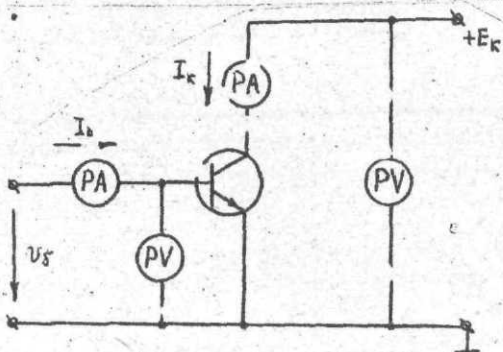


Рис.3.II. Схема включения транзистора для снятия входных и выходных статических характеристик

IV. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА

Студенты в данной работе проводят измерения тока базы и коллектора и напряжений I_b , I_k и U_b , U_k для построения входных и выходных характеристик биполярного транзистора, осуществляют сборку однокаскадного усилителя и снимают амплитудную и амплитудно-частотную характеристики.

1. Подготовить формуляр отчета лабораторной работы. В чертить схемы, используемые при выполнении работы. Записать расчетные формулы. Подготовить таблицы для занесения результатов измерения (см. табл. 4.1+4.5).

2. С помощью входных и выходных характеристик транзистора (рис. 3, а, б), включенного по схеме с общим эмиттером необходимо выполнить:

- построить линию нагрузки;
- построить переходную характеристику;
- определить положение рабочей точки ($I_{B0}, U_{B0}, U_{CE0}, I_{CE0}$);
- рассчитать значение h -параметров.

Дополни эльское задание для студентов специальностей 0405.

0106, 0407.

3. Определить по характеристикам транзистора максимально допустимое значение амплитуды входного напряжения, которое увеличивается без искажения.

4. Рассчитать основные параметры ($K_{V_{xx}}, R_{bx}, R_{bx}$) усилителя, изображенного на рис. 3.5 для $R_H = \infty$ и $R_H = 1,5 \text{ кОм}$. Данные для расчетов представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Данные к расчету параметров усилителя

№ варианта	$E_k, \text{В}$	$R_k, \text{Ом}$	№ варианта	$E_k, \text{В}$	$R_k, \text{Ом}$
1.	10	2	8.	16	1,2
2.	11	1,3	9.	15	1,3
3.	12	1,4	10.	14	1,4
4.	13	1,5	11.	13	1,5
5.	11	1,6	12.	12	1,6
6.	15	1,7	13.	11	1,7
7.	16	1,8	14.	10	1,8

Не допускать превышения напряжения и тока в схемах, руководствуясь пределами, указанными в описании. Сборку схем производить при отключенном напряжении на стенде. После сборки схемы обязательно пригласить лаборанта для проверки правильности электрической цепи и только в его присутствии включать стенд под напряжение.

Методические указания по проведению эксперимента

При снятии входных характеристик транзистора для удобства измерений и повышения точности предлагается изменять ток базы I_B и фиксировать значения напряжения U_B . Ток базы I_B изменять в пределах 0-600 мкА. Выходные характеристики снимать при значениях тока базы $I_B = 100$ мкА, 300 мкА, 500 мкА. Напряжение U_K изменять в пределах 0-8 В. Амплитудную характеристику усилителя снимать при частоте $f = 1$ кГц, изменяя U_{BX} в пределах от 0 до напряжения, при котором появляются искажения выходного сигнала. Контроль вести с помощью осциллографа. Амплитудно-частотную характеристику снимать при постоянном входном напряжении (при отсутствии искажения сигнала на входе), изменяя частоту f от 50 Гц до 20 кГц.

Задания, выполняемые в лаборатории

1. Снять входные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером при $U_K = 0$ В и $U_K = 5$ В. Показания приборов записать в табл.3.

Т а б л и ц а 3

Входные характеристики биполярного транзистора

	$I_B, \text{мкА}$	0	100	300	400	600
$U_K = 0 \text{ В}$	$U_B, \text{В}$					
$U_K = 5 \text{ В}$	$U_B, \text{В}$					

1.2. Снять выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Показания прибора записать в табл.4.

Таблица 4

Выходные характеристики биполярного транзистора

$U_K, В$		0	3	5	8
$I_D = 100 \text{ мкА}$	$I_K, \text{мА}$				
$I_D = 300 \text{ мкА}$	$I_K, \text{мА}$				
$I_D = 500 \text{ мкА}$	$I_K, \text{мА}$				

1.3. Собрать однокаскадный усилитель по схеме с общим эмиттером. Снять амплитудную характеристику $U_{вых} = f(U_{вх})$ усилителя. Данные измерений записать в табл.5.

Таблица 5

Амплитудная характеристика

$U_{вх}, \text{мВ}$									
$U_{вых}, \text{В}$									

1.4. Снять амплитудно-частотную характеристику усилителя, собранного по схеме с общим эмиттером. Полученные данные записать в табл.6.

Таблица 6

Амплитудно-частотная характеристики

$U_{вх} = \text{const}$ В	$f, \text{Гц}$	50 Гц	20 кГц
	$U_{вых}, \text{В}$		
	$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$		

Дополнительные задания для студентов специальностей 0405, 0406, 0407.

1.5. Собрать однокаскадный усилитель на транзисторе по схеме эмиттерного повторителя. Снять амплитудную характеристику усилителя. Данные занести в табл.5.

1.6. Снять амплитудно-частотную характеристику усилителя. Полученные данные записать в табл.6.

У. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. По данным п.п. 1.1-1.2 построить входные и выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. В соответствии с вариантом построить линию нагрузки по постоянному току: $U_K = E_K - R_K I_K$ и построить переходную характеристику $I_K = f(I_\delta)$, выбрать рабочую точку покоя, определить I_δ , I_{K0} , $U_{\delta 0}$, U_{K0} (по входным и выходным характеристикам), найти h_{11} , h_{21} , h_{22} в рабочей точке покоя.

Дополнительное задание для студентов специальностей 0405, 0406, 0407.

1.1. Определить максимально допустимое значение амплитуды входного сигнала, при котором не происходит искажения входного сигнала; используя h -параметры транзистора, рассчитать $K_{U_{xx}}$, R_{bx} и $R_{вых}$.

2. По данным п.1.3 построить амплитудную характеристику усилителя, собранного по схеме с общим эмиттером. Определить на графике напряжение U_{bx} , при котором начинают возникать искажения выходного сигнала.

3. По данным п.1.4 построить амплитудно-частотную характеристику усилителя собранного по схеме с общим эмиттером.

Дополнительное задание для студентов специальностей 0405, 0406, 0407.

3.1. По амплитудно-частотной характеристике п.1.3 определить полосу пропускания усилителя.

3.2. По данным п.1.5 построить амплитудную характеристику усилителя собранного по схеме эмиттерного повторителя, на одном графике с амплитудной характеристикой усилителя, собранного по схеме с общим эмиттером (п.1.2).

3.3. По данным п.1.6 построить амплитудно-частотную характеристику усилителя, собранного по схеме эмиттерного повторителя, на одном графике с амплитудно-частотной характеристикой усилителя, собранного по схеме с общим эмиттером. Определить голосу пропуски усилителя.

У1. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет по лабораторной работе должен содержать

1. Формулы для вычисления основных параметров транзистора и транзистора-усилителя.
2. Схемы усилительных каскадов.
3. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
4. Графики полученных в процессе эксперимента зависимостей.

УП. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство и назначение биполярного транзистора.
2. Чем отличаются транзисторы типа $p-n-p$ от транзистора $n-p-n$ типа?
3. Какие бывают схемы включения транзисторов?
4. Для чего применяются различные схемы включения транзисторов?
5. Какие зависимости характеризуют работу транзисторов для различных схем включения?
6. Что такое h -параметры транзистора?
7. Каким образом определяются h -параметры транзисторов?
8. Каково назначение элементов усилительного каскада с общим эмиттером (2.6)?
9. Что такое переходная характеристика усилителя?
10. Как построить переходную характеристику усилителя?
11. Что такое "линия нагрузки усилителя"?
12. Как построить линию нагрузки усилителя?
13. Каково назначение элементов усилительного каскада с общим коллектором?
14. Что такое "частотные и нелинейные искажения сигнала"?
15. Какой вид имеют амплитудные и амплитудно-частотные характеристики усилителя?

Дополнительные вопросы для студентов специальностей 105,
0406, 0407.

16. Сравните различные схемы включения транзисторов по:

- а) входному, выходному, сопротивлению;
- б) коэффициентам усиления по току, напряжению и мощности.

17. Напишите выражения для определения h -параметров для схемы с общим коллектором.

18. Объясните значения элементов схемы замещения транзистора (рис. 3.4).

19. Как с помощью h -параметров рассчитать основные параметры усилителя ($K_{\text{вых}}$, $R_{\text{вх}}$, $R_{\text{вых}}$)?

20. Объясните принцип работы схем с температурной стабилизацией рабочей точки?

21. В чем преимущество усилителя с общим коллектором перед другими усилителями?

22. Что такое "полоса пропускания усилителя", как он определяется?

УШ. ЛИТЕРАТУРА

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. -М.: Высшая школа, 1982. с.49-56. 91-92.