

## Лабораторная работа

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКАСКАДНОГО ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: изучение принципа действия и определение основных параметров и характеристик однокаскадного транзисторного усилителя.

#### Общие сведения

Усилителем называют устройство, позволяющее увеличить напряжение, ток, мощность слабых электрических сигналов. В усилителях используют биполярные и полевые транзисторы, а последние годы - интегральные микросхемы (ИМС). Усилители на ИМС обладают высокой надежностью и экономичностью, большим быстродействием, имеют малые размеры и массу, высокую чувствительность. Они обеспечивают усиление очень слабых сигналов (напряжение порядка  $10^{-13}$  В, токи до  $10^{-17}$  А, мощность порядка  $10^{-24}$  Вт).

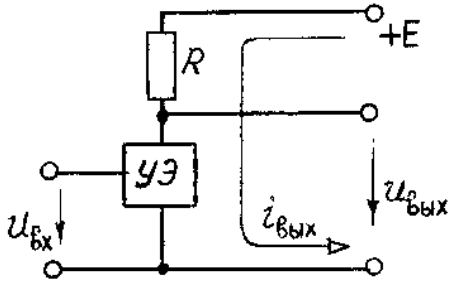


Рисунок 1

Многие усилители состоят из нескольких ступеней, осуществляющих последовательное усиление сигнала и называемых каскадами. В зависимости от выполняемых функций усилительные каскады подразделяют на каскады предварительного усиления, предназначенные для повышения уровня сигнала по напряжению, и выходные каскады – для получения требуемых тока или мощности в нагрузке.

Рассмотрим принцип построения и работы усилительного каскада на структурной схеме рисунка 1. Основными элементами являются управляемый элемент УЭ (биполярный или полевой транзистор) и резистор  $R$ , которые совместно с источником питания  $E$  образуют выходную цепь каскада. Усиление выходного сигнала  $u_{\text{вых}}$  происходит за счет энергии источника постоянного напряжения  $E$ . При подаче входного сигнала  $u_{\text{вх}}$  изменяются сопротивление УЭ и ток выходной цепи  $i_{\text{вых}}$  по закону, задаваемому  $u_{\text{вх}}$ . Переменная составляющая  $i_{\text{вых}}$  создает переменный сигнал  $u_{\text{вых}}$ . Усилительные свойства каскада зависят от степени влияния  $u_{\text{вх}}$  на ток управляемого элемента. Чем больше изменяется ток, тем больше будет падение напряжения на резисторе  $R$ , а значит, и сигнал  $u_{\text{вых}}$ , который также зависит и от величины  $R$ .

Основные параметры усилительного каскада:

- коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}};$$

- коэффициент усиления по току

$$K_I = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}};$$

- коэффициент усиления по мощности

$$K_P = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}} = U_{\text{вых}} I_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} I_{\text{вх}} = K_U K_I;$$

(в соотношениях используются амплитуды тока и напряжения).

В настоящей работе исследуется усилитель на биполярном транзисторе, который выполняет роль управляемого элемента. Транзистор - это полупроводниковый прибор с двумя  $p-n$ -переходами, имеющий три вывода. В зависимости от чередования областей полупроводников с различными типами электропроводности различают транзисторы типа  $p-n-p$  и типа  $n-p-n$ . Их схематическое устройство и условное графическое обозначение показано на рисунке 2.

Центральный слой транзистора называют базой (Б), наружный слой, являющийся источником зарядов (электронов или дырок), - эмиттером(Э), а наружный слой, принимающий заряды, - коллектором(К).

На переход эмиттер - база напряжение источника  $E_3$  подается в прямом направлении, и прямое сопротивление перехода мало, поэтому даже при малых  $E_3$  возникает значительный ток эмиттер - база  $I_3$ . На переход коллектор-база напряжение источника  $E_к$  подается в обратном направлении.

Рассмотрим работу транзистора типа  $p-n-p$  (рисунок 2) (транзистор типа  $n-p-n$  работает аналогично). При отсутствии источника  $E_3$  эмиттерный ток  $I_3=0$ , и в транзисторе через коллекторный переход в обратном направлении протекает малый ток (у кремниевых транзисторов  $I_{к0}=0,1 \dots 10$  мкА).

При подключении источника  $E_3$  возникает эмиттерный ток  $I_3$ : дырки

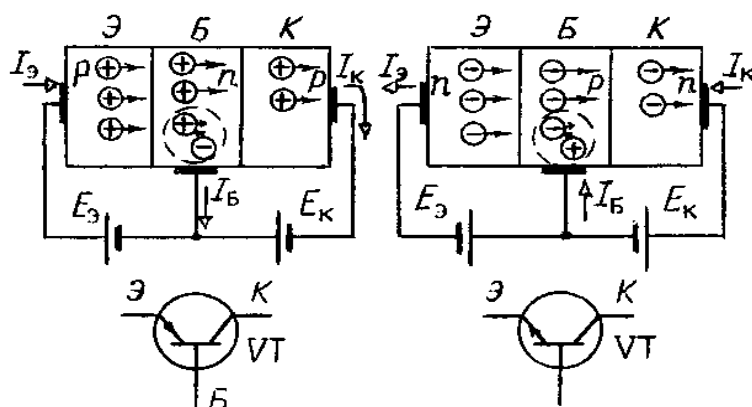


Рисунок 2

преодолевают переход эмиттер-база и попадают в область базы, где частично рекомбинируют со свободными электронами базы. Убыль электронов в базе пополняется электронами, поступающими из внешней цепи, образуя ток базы  $I_6$ . Благодаря диффузии часть дырок в базе, продолжая движение, доходит до коллектора и под действием электрического поля источника  $E_к$  проходит коллекторный  $p-n$ -переход. В цепи база-коллектор протекает ток  $I_к=I_3-I_6$ .

Соотношение между приращениями эмиттерного и коллекторного токов характеризуют коэффициентом передачи тока

$$\alpha = \frac{dI_к}{dI_3} \Big|_{U_{к6}=\text{const}} \approx \frac{\Delta I_к}{\Delta I_3} \Big|_{U_{к6}=\text{const}}$$

Так как  $\Delta I_к < \Delta I_3$ , то для биполярных транзисторов  $\alpha=0,9 \dots 0,995$ , и ток коллектора  $I_к=I_{к0}+\alpha I_3 \approx I_3$ .

Рассмотренная схема включения транзистора, где база является общим электродом для эмиттерной и коллекторной цепей, называется схемой с общей базой. Ее применяют крайне редко из-за низкого коэффициента передачи тока.

Существует три способа включения транзистора: с общей базой, с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (электрод, находящийся на входе и выходе схемы одновременно, определяет название схемы). Основной является схема с общим эмиттером (рисунок 3,а), в которой входной ток равен току базы

$$I_б = I_э - I_к = I_э - (I_{к0} + \alpha I_э) = (1 - \alpha) I_э - I_{к0} \ll I_э \approx I_к.$$

Широкое применение схемы с общим эмиттером обусловлено малым входным (управляющим) током  $I_б$ . Коэффициент передачи тока для схемы с общим эмиттером  $\beta = \Delta I_к / \Delta I_б$  колеблется в пределах 10 ... 200.

Входные характеристики транзистора с ОЭ (рисунок 3,б) отражают зависимость тока базы от напряжения, приложенного между базой и эмиттером, при  $U_{кэ} = \text{const}$ . Они мало зависят от  $U_{кэ}$ , поэтому обычно приводят одну характеристику  $I_б(U_{бэ})$ .

Выходные характеристики отражают зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при  $I_б = \text{const}$  (рисунок 3,в).

Рассмотрим один из наиболее распространенных усилительных каскадов на транзисторах – каскад с общим эмиттером (рисунок 4,а).

Источник усиливаемого сигнала подключается к входной цепи каскада (между базой и эмиттером) через конденсатор  $C1$ , а нагрузка  $R_н$  – к выходу каскада через конденсатор  $C2$ . Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  разделяют эти цепи по постоянному току и связывают их по переменному. В выходную цепь включается источник  $E_к$ , за счет которого происходит усиление мощности выходного сигнала.

Напряжение покоя между базой и эмиттером  $U_{бэп}$  определяется делителем

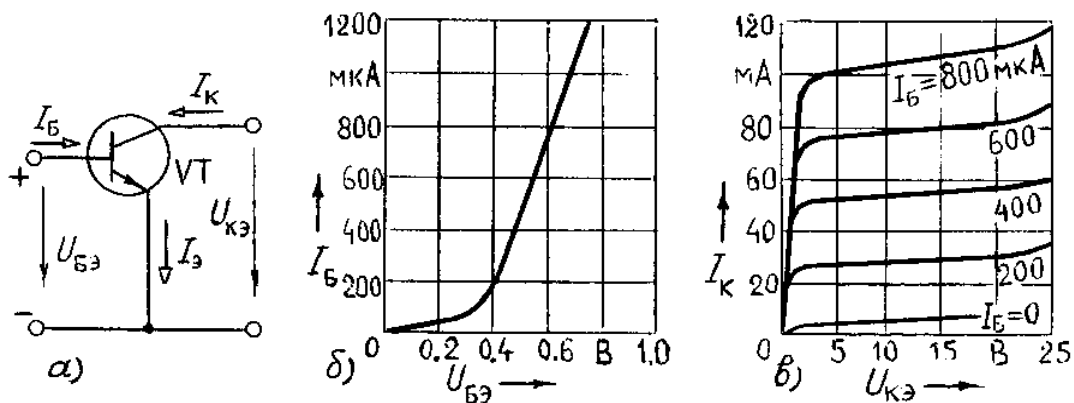


Рисунок 3

напряжении  $R1 - R2$  и резистором  $R_э$ , в результате возникают токи базы  $I_{бп}$  и коллектора  $I_{кп}$ . Режим работы усилителя при  $u_{вх} = 0$  называют режимом покоя.

При подаче входного сигнала  $u_{вх}$  на постоянную составляющую тока  $I_{бп}$  накладывается переменная составляющая  $i_{б\sim}$ , и ток базы становится пульсирующим  $i_б$  (рисунок 4, б). Он вызывает пульсацию тока коллектора  $i_к = \beta i_б$  и коллекторного напряжения  $u_к$ . Переменная составляющая напряжения  $u_{к\sim}$  через конденсатор  $C2$  передается в нагрузку:  $u_н = u_{в\text{ых}}$ .

По второму закону Кирхгофа для выходной цепи

$$E_к = u_к + R_к i_к = (U_{кп} + u_{к\sim}) + R_к (I_{кп} + i_{к\sim}).$$

Так как  $E_K = \text{const}$  и режим по постоянному току не меняется, то видно, что с увеличением тока  $i_{k\sim}$  напряжение  $u_{k\sim}$  уменьшается, оно сдвинуто по фазе относительно входного напряжения на  $180^\circ$  (рисунок 4, б).

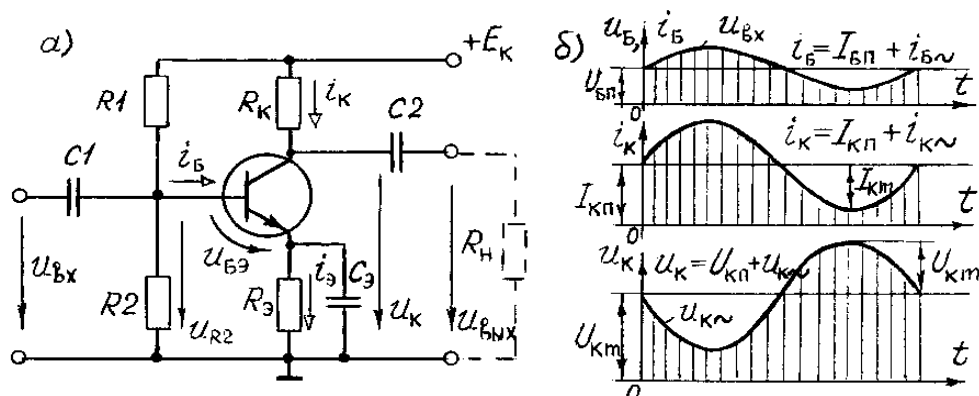


Рисунок 4

Недостатком полупроводниковых усилителей является зависимость их параметров от температуры. Для уменьшения влияния температуры в рассмотренном усилительном каскаде с ОЭ применена эмиттерная температурная стабилизация: в цепь эмиттера включен резистор  $R_3$ , шунтированный конденсатором  $C_3$ . С увеличением температуры возрастают токи транзистора  $I_{кп}$ ,  $I_{эп}$ , но возникающее падение напряжения на резисторе  $R_3$  уменьшает напряжение  $U_{бэп} = U_{R2} - R_3 I_{эп}$  (при  $U_{R2} = \text{const}$ ), что повлечет уменьшение токов  $I_{бп}$ ,  $I_{эп}$ ,  $I_{кп}$ . Стабилизация тем эффективнее, чем больше  $R_3$ . Но падение напряжения на  $R_3$  уменьшает  $U_{бэ}$  и снижает коэффициент усиления, что нежелательно. Это явление называют отрицательной обратной связью (ООС). Для ослабления ООС по переменному напряжению резистор  $R_3$  шунтируют конденсатором  $C_3$ , сопротивление которого  $X_{C3} \ll R_3$  для всех частот  $u_{вх}$ . Тогда падение напряжения на участке  $R_3 - C_3$  от переменной составляющей  $i_3$  незначительно, и усиливаемое напряжение практически не меняется:  $u_{бэ} \approx u_{вх}$ .

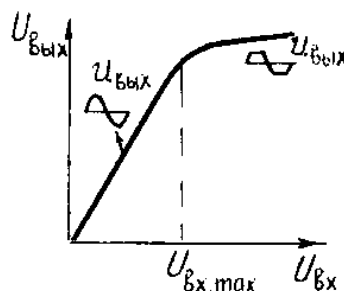


Рисунок 5

Основные характеристики усилителя: амплитудная  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$  и амплитудно-частотная  $K_U(f)$ , определяющая зависимость модуля коэффициента усиления напряжения от частоты усиливаемого сигнала.

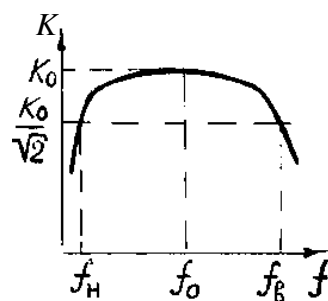


Рисунок 6

Амплитудная характеристика (рисунок 5) позволяет определить диапазон входного напряжения, в пределах которого зависимость  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$  линейная. При большой амплитуде входного напряжения  $U_{\text{вх}} > U_{\text{вх.маж}}$  появляются нелинейные искажения  $u_{\text{вых}}$ , обусловленные нелинейностью входной и выходной характеристик транзистора (рисунок 3, б, в).

Амплитудно-частотная характеристика (рисунок 6) важна при усилении несинусоидальных сигналов, так как гармонические составляющие  $u_{\text{вх}}$  усиливаются в различной степени, и форма  $u_{\text{вых}}$  искажается. По амплитудно-частотной характеристике определяют полосу пропускания усилителя – диапазон от низших  $f_{\text{н}}$  до высших  $f_{\text{в}}$  частот, в котором коэффициент усиления  $K_U \geq K_0 / \sqrt{2}$ , где  $K_0$  – максимальный коэффициент усиления.

Уменьшение  $K_U$  при низших частотах обусловлено влиянием конденсаторов  $C_1, C_2, C_3$ . С понижением частоты  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  увеличивается, и возрастают падения напряжения на конденсаторах. В диапазоне средних частот влиянием разделительных конденсаторов можно пренебречь из-за малости их сопротивления, и коэффициент усиления максимален. В области высших частот усилительные свойства ухудшаются.

### Предварительное задание к эксперименту

Изучить устройство и принцип работы однокаскадного транзисторного усилителя с ОЭ (рисунок 4,а), проанализировать назначение всех его элементов. Письменно дать обоснованный ответ на вопрос соответствующего варианта в таблице 1.

Таблица 1

Вариант	Вопрос
1	Назначение конденсатора $C_2$ . Какое влияние он оказывает на коэффициент усиления $K_U$ ?
2	Как изменится коэффициент усиления $K_U$ , если сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ увеличится?
3	Каково назначение элементов $R_3, C_3$ ? Изменится ли коэффициент усиления $K_U$ , если исключить конденсатор $C_3$ ?
4	Как изменится амплитуда выходного сигнала $u_{\text{вых}}$ , если $R_{\text{н}}$ уменьшится при неизменной амплитуде входного сигнала?
5	Почему конденсаторы $C_1, C_2$ называют разделительными? Как изменится выходной сигнал $u_{\text{вых}}$ , если емкость конденсатора $C_2$ увеличится при неизменной амплитуде входного сигнала?
6	Что такое отрицательная обратная связь (ООС)? Как ослабляется в усилителе ООС по переменному напряжению? Как изменится $u_{\text{вых}}$ , если емкость $C_3$ уменьшить до нуля?
7	Назначение резистора $R_3$ . Что такое отрицательная обратная связь по постоянному напряжению? Каково влияние конденсатора $C_3$ на коэффициент усиления $K_U$ ?
8	Как изменится коэффициент усиления $K_U$ , если емкость конденсатора $C_2$ уменьшится?

## Порядок выполнения эксперимента

1. Собрать электрическую цепь по схеме однокаскадного транзисторного усилителя с ОЭ (рисунок 4,а).

2. Подготовить к работе осциллограф, генератор звуковых частот и цифровой вольтметр: подключить питание, прогреть в течение 5 минут. Подключить цифровой вольтметр для измерения выходного напряжения усилителя (зажимы  $R_H$ ) и электронный осциллограф для визуального наблюдения этого напряжения. Подать на вход усилителя напряжение от генератора звуковых частот.

3. Изменяя напряжение  $u_{вх}$  от 0 до 100 мВ (6 ... 7 значений), снять амплитудные характеристики усилителя  $U_{вых}(U_{вх})$  при частоте входного сигнала  $f=1000$  Гц для двух значений нагрузки  $R_H=1$  кОм и  $R_H=10$  кОм. Амплитуду выходного напряжения  $u_{ввых}$  при синусоидальной его форме определить, умножив показание цифрового вольтметра на  $\sqrt{2}$ . При искажении выходного сигнала измерение его амплитуды выполнять с помощью осциллографа, определив масштаб по оси "У". Результаты измерений записать в таблицу 2, построить графики в общей системе координат.

Таблица 2

$U_{вх}, мВ$							
$R_H=1$ кОм	$U_{ввых}, В$						
$R_H=10$ кОм							

Таблица 3

	$f, Гц$							
$C_2=1$ мкФ	$U_{ввых}, В$							
	$K_U$							
$C_2=10$ мкФ	$U_{ввых}, В$							
	$K_U$							

4. Определить с помощью осциллографа, при каком напряжении  $U_{вх}$  наступает заметное искажение формы  $u_{ввых}(t)$ . Зарисовать для этого режима кривую  $u_{ввых}(t)$ . Отметить значение  $U_{вх}$  на графиках  $U_{ввых}(U_{вх})$ .

5. Определить коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H=1$  кОм,  $R_H=10$  кОм при  $U_{вх}=10$  мВ.

6. Изменяя частоту входного напряжения от 20 Гц до 200000 Гц, снять амплитудно-частотные характеристики  $K_U(f)$  при  $U_{вх}=5$  мВ,  $R_H=1$  кОм для двух значений емкости  $C_2: 1$  мкФ и 10 мкФ.

Результаты измерений записать в таблицу 3 и построить графики  $K_U(f)$  в общей системе координат. Определить и указать на графиках полосу пропускания усилителя.

7. Экспериментально проверить правильность ответа на вопрос предварительного задания.

## Содержание отчета

Цель работы; схема однокаскадного транзисторного усилителя с ОЭ (рисунок 4,а); обоснованный ответ на вопрос предварительного задания; таблицы измерений, графики амплитудных  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$  и амплитудно-частотных  $K_U(f)$  характеристик усилителя, расчетные значения  $K_U$ , полоса пропускания усилителя для двух значений емкости  $C_2$ ; оценка влияния нагрузки  $R_n$  и емкости связи  $C_2$  на коэффициент усиления  $K_U$ , выводы.

## Контрольные вопросы

1. Что такое биполярный транзистор? Каково его устройство и принцип работы в схеме с ОЭ? 2. Объяснить принцип действия транзисторного усилителя. Каково назначение транзистора в усилительном каскаде? 3. Какими параметрами характеризуется усилитель? 4. Как снимается амплитудная и амплитудно-частотная характеристики каскада? 5. Как определить полосу пропускания усилителя? 6. Как осуществляется температурная стабилизация в усилителе? 7. В чем причины появления нелинейных искажений выходного напряжения и спада амплитудно-частотной характеристики на низких и высоких частотах?