

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).

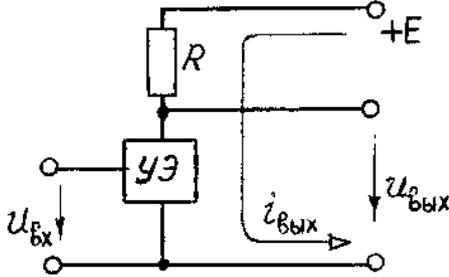


Рисунок 1

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

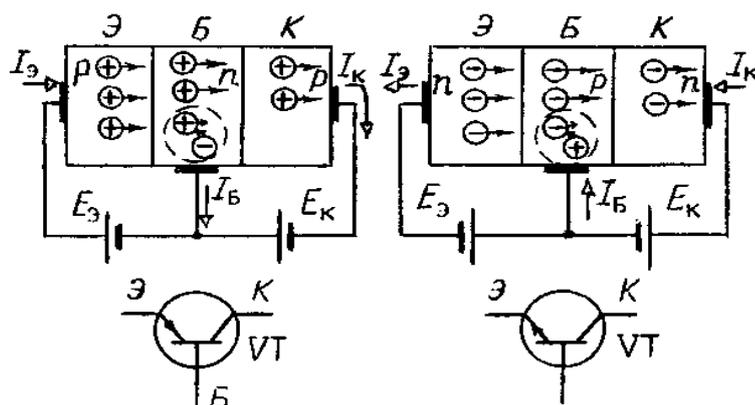


Рисунок 2

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

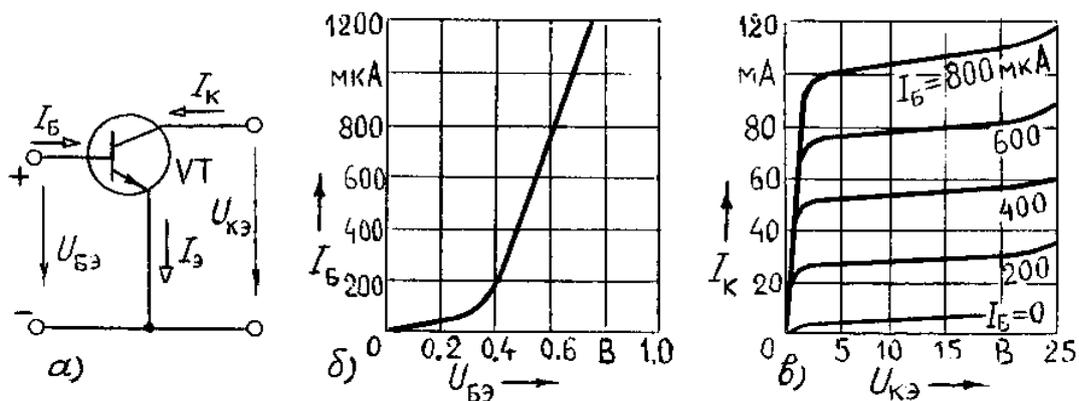


Рисунок 3

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: $u_н = u_{ввых}$.

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° (рисунок 4, б).

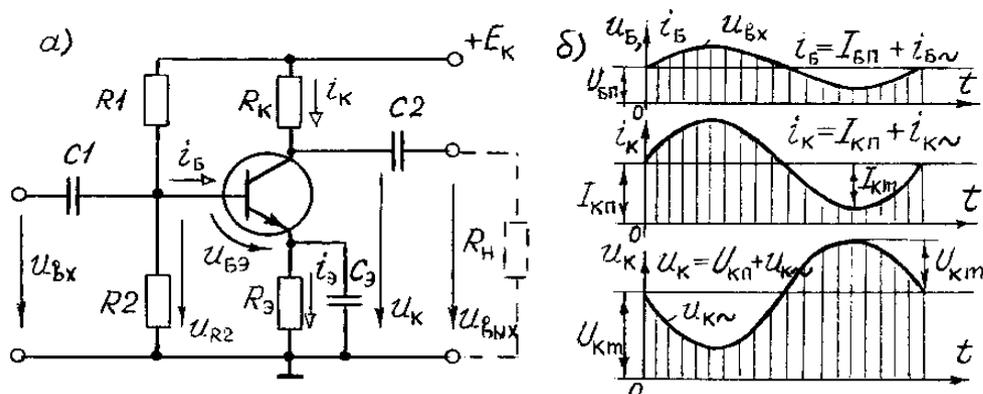


Рисунок 4

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: $u_{бэ} \approx u_{вх}$.

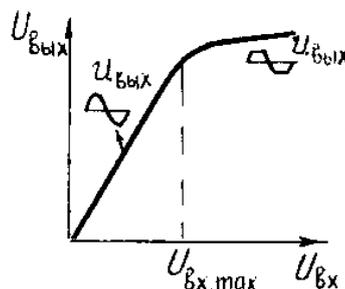


Рисунок 5

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

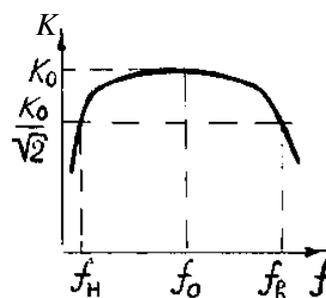


Рисунок 6

Амплитудная характеристика (рисунок 5) позволяет определить диапазон входного напряжения, в пределах которого зависимость $U_{вых}(U_{вх})$ линейная. При большой амплитуде входного напряжения $U_{вх} > U_{вх,маx}$ появляются нелинейные искажения $u_{ввых}$, 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 $U_{ввых}(U_{вх})$ 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?