

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ И ОДНОКАСКАДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Цель работы: исследование статических характеристик биполярного транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером; статических характеристик биполярного транзистора, включённого по схеме с общим коллектором; одиночного усилительного каскада с общим эмиттером; одиночного усилительного каскада с общим коллектором.

Теоретические сведения

Транзистор – трехэлектродный полупроводниковый прибор, состоящий из трех областей с чередующимися типами электропроводности, предназначенный для усиления и генерирования электрических сигналов. Транзисторы, в которых используются оба вида носителей зарядов (дырки и электроны), называются **биполярными** (БТ). Различают БТ *n-p-n*- и *p-n-p*-типов. При одинаковых рабочих режимах напряжение на одноименных электродах транзисторов *n-p-n*- и *p-n-p*-типов имеет противоположную полярность.

Структуры и условные обозначения БТ показаны на рис. 1. Средний слой транзистора называют базой (Б), один из крайних слоев называют эмиттером (Э), другой – коллектором (К). Между эмиттером и базой возникает эмиттерный переход (ЭП), а между коллектором и базой – коллекторный переход (КП).

Каждый из *p-n*-переходов транзистора может быть смещён либо в прямом, либо в обратном направлениях. В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора:

- 1) активный (усиления): эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный – в обратном;
- 2) отсечки: оба перехода смещены в обратном направлении;
- 3) насыщения: оба перехода смещены в прямом направлении;
- 4) инверсный: эмиттерный переход смещён в обратном направлении, а коллекторный – в прямом.

Активный режим используется в схемах усилителей и генераторов синусоидальных колебаний, режимы насыщения и отсечки – в импульсных схемах.

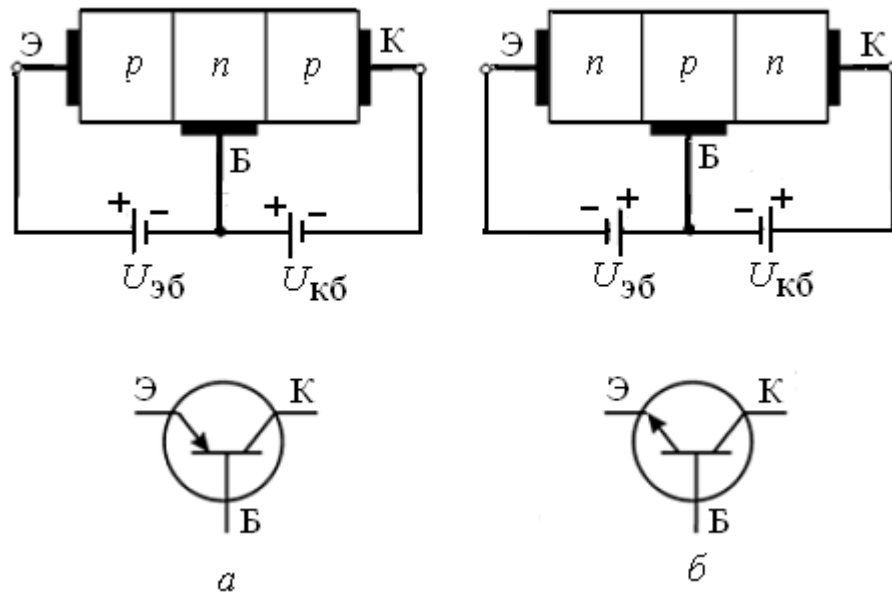


Рис. 1. Структуры и обозначения биполярных транзисторов:
p-n-p-типа (а); *n-p-n*-типа (б)

Рассмотрим *активный режим* работы транзистора *n-p-n*-типа (рис. 2). Так как эмиттерный переход смещён в прямом направлении, происходит инжекция носителей из эмиттера в базу. Поскольку область эмиттера легирована сильнее, чем область базы, поток электронов преобладает над потоком дырок. Из-за малой толщины базы почти все электроны, пройдя базу, достигают коллектора. Только малая доля электронов рекомбинирует в базе с дырками. Коллекторный переход смещён в обратном направлении, поэтому электроны, достигшие коллекторного перехода, втягиваются полем перехода в коллектор. Происходит экстракция электронов в коллектор.

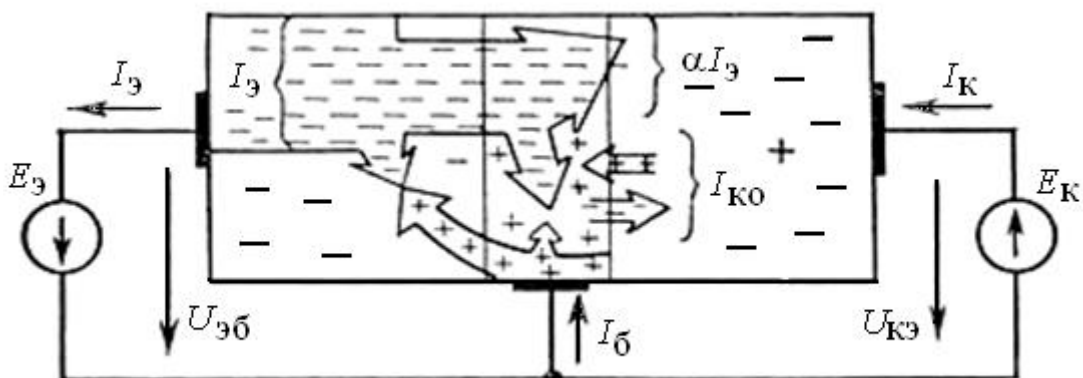


Рис. 2. Движение носителей заряда в транзисторе *n-p-n*-типа

Токи транзистора, работающего в активном режиме, связаны соотношениями:

$$I_K = I_{K0} + \alpha I_{\text{Э}}, \quad (1)$$

где $\alpha = dI_K/dI_{\text{Э}}$ – коэффициент передачи эмиттерного тока при постоянном напряжении «коллектор – база». У интегральных транзисторов $\alpha = 0,99\text{--}0,995$.

Из рис. 2 следует:

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Б}} + I_K. \quad (2)$$

Связь между коллекторным и базовым токами:

$$I_K = \beta I_{\text{Б}}, \quad (7.3)$$

где β – коэффициент передачи базового тока,

$$\beta = \frac{I_K}{I_{\text{Б}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (7.4)$$

Множитель β называют коэффициентом усиления тока базы. Так как величина α близка к 1, то β может принимать значения от 50 до 200.

При изменении входного тока на величину $\Delta I_{\text{Э}}$ изменяется выходной ток на величину $\Delta I_K = \alpha \Delta I_{\text{Э}}$. Следовательно, биполярный транзистор управляется током.

Статические характеристики транзистора показывают связь между токами транзистора и напряжениями на его электродах: входные $I_{\text{ВХ}} = f(U_{\text{ВХ}}) \Big|_{U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}}$ и выходные $I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}}) \Big|_{I_{\text{ВХ}} = \text{const}}$. Вид характеристик зависит от способа включения транзистора.

Существуют *три способа включения транзистора*: с общей базой (ОБ) (рис. 3, а), с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 3, б) и с общим коллектором (ОК) (рис. 7.3, в) в зависимости от того, какой электрод является общим для входного и выходного сигналов.

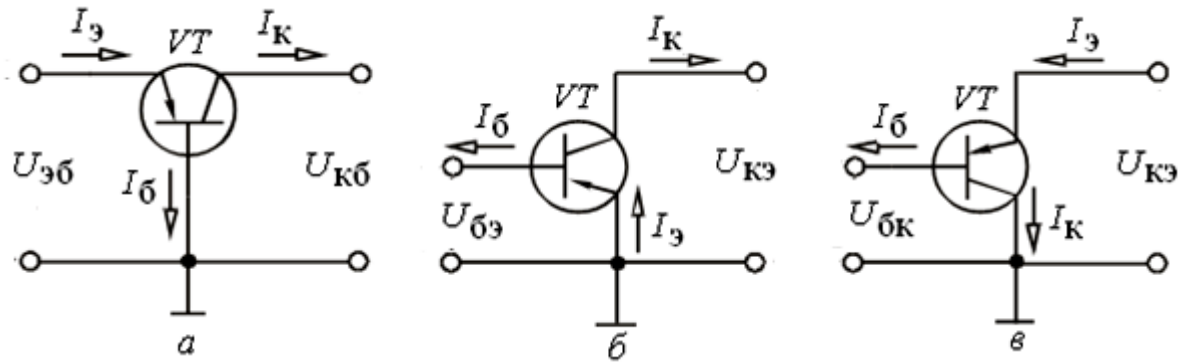


Рис. 3. Схемы включения биполярного транзистора $p-n-p$ -типа: общей базов (а); общим эмиттером (б); общим коллектором (в)

Наибольшее применение находит включение транзистора с ОЭ, так как входной (управляющий) ток I_b мал, $R_{вх}$ – сотни Ом, $R_{вых}$ – единицы, десятки кОм, коэффициент передачи (усиления) тока

$$K_{i_{оэ}} = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta \Big|_{I_{\text{к0}} = \text{const}} \gg 1; \beta = 10 \dots 100. \quad (5)$$

Схема с ОЭ обладает значительным усилением по току. Усиление по напряжению $K_u \gg 1$. Выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного.

Коэффициент усиления по мощности получается очень большим:

$$K_{P_{оэ}} = K_{i_{оэ}} \cdot K_{u_{оэ}}.$$

Входные ($I_b = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$) и выходные ($I_k = f(U_{кэ})$ при $I_b = \text{const}$) статические характеристики транзистора в схеме с ОЭ приведены на рис. 7.4.

При $U_{кэ} = 0$ входная характеристика (рис. 7.4, а) соответствует прямой ветви ВАХ двух $p-n$ -переходов (эмиттерного и коллекторного), включенных параллельно. При повышении $U_{кэ}$ характеристики смещаются вправо вследствие модуляции толщины базы. При $U_{бэ} = 0$ и $U_{кэ} \neq 0$ инжекция носителей из эмиттера в базу отсутствует, и в цепи базы протекает ток $I_{к0}$.

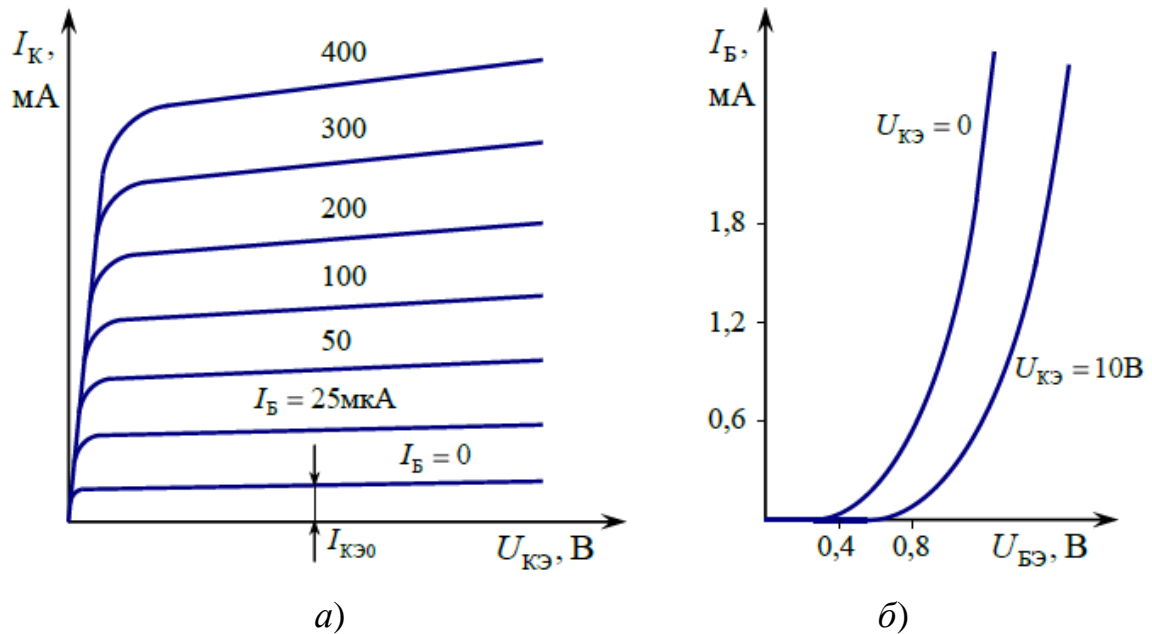


Рис. 4. Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме ОЭ: входная (а); выходная (б)

На практике в цепь коллектора включают резистор R_K (рис. 5). **Рабочей точкой** (РТ) транзистора называют напряжение на его управляющем электроде (*напряжение смещения*) или ток в цепи управляющего электрода (*токовое смещение*), которые определяют режим работы транзисторного каскада. **Нагрузочной прямой** называют линию на плоскости выходных характеристик, по которой движется рабочая точка в процессе воздействия сигналов на вход усилителя. Таким образом, РТ – это точка пересечения нагрузочной прямой с одной из статических ВАХ. Режим работы транзистора определяется начальным положением РТ и характеризуется совокупностью постоянных составляющих токов и напряжений во входной и выходной цепях.

В этом случае $I_K = (E_K - U_{КЭ})/R_K$ – это уравнение линии нагрузки, которая проходит через две точки: если $I_K = 0$, то $U_{КЭ} = E_K$, и если $U_{КЭ} = 0$, то $I_K = E_K/R_K$. Линия нагрузки служит для выбора режима (точки) покоя транзистора.

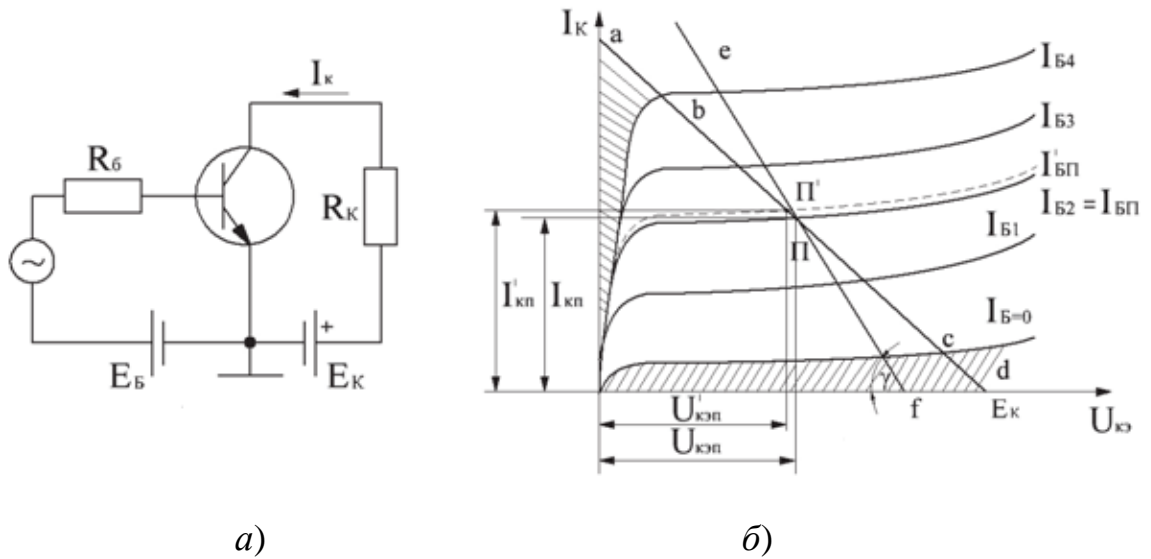


Рис. 5. Динамический режим работы транзистора: схема включения (а); выходные характеристики (б)

В зависимости от того, какой участок выходных характеристик пересекает линия нагрузки, транзистор может работать в трех режимах: активном (участок bc линии нагрузки на рис. 5, б), насыщения (участок ab) и отсечки (участок cd). При работе транзистора в активном режиме точка покоя выбирается в середине участка bc . Ей соответствуют параметры режима покоя: $I_{кп}$, $I_{бп}$, $U_{кэп}$.

Эквивалентные схемы и параметры транзистора. Для анализа и расчета цепей с транзисторами, применяют эквивалентные схемы. При малых изменениях токов и напряжений, когда связь между ними можно считать линейной, транзистор можно заменить отражающей его структуру Т-образной эквивалентной схемой (схемой замещения), показанной на рис. 6.

Определим $r_{э}$ – дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода, Ом

$$r_{э} = \left. \frac{dU_{эб}}{dI_{э}} \right|_{U_{кб} = \text{const}} ;$$

$r_{к}$ – дифференциальное сопротивление коллекторного перехода в схеме ОБ:

$$r_{К} = \left. \frac{dU_{КБ}}{dI_{К}} \right|_{I_{Э} = \text{const}} ;$$

$r_{К}^*$ – дифференциальное сопротивление коллекторного перехода схеме с ОЭ:

$$r_{К}^* = r_{К}(1 - \alpha) = r_{К}/(1 + \beta),$$

где α и β – дифференциальные коэффициенты передачи эмиттерного и базового тока:

$$C_{К}^* = (1 + \beta) C_{К(Б)},$$

где $C_{К(Б)}$ и $C_{К}^*$ – емкости эмиттерного и коллекторного переходов для схем с ОБ и ОЭ соответственно

Параметры, входящие в Т-образные схемы замещения, характеризуют физические свойства транзистора и называются внутренними, или физическими.

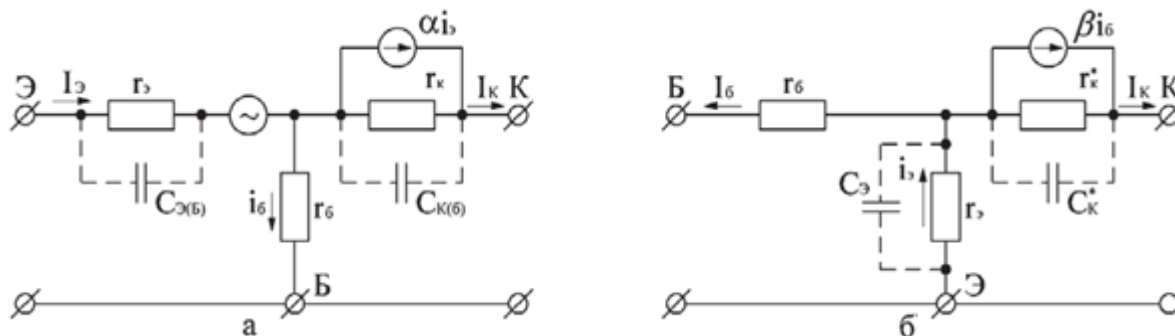


Рис. 6. Схема замещения транзистора в физических параметрах: в схеме с ОБ (а); в схеме с ОЭ (б)

На практике пользуются параметрами транзистора как активного линейного четырехполюсника (рис. 7).



Рис. 7. Четырехполюсник

Связь между входными (U_1, I_1) и выходными (U_2, I_2) напряжениями и токами четырехполюсника выражается системой двух уравнений. Принимая в качестве независимых переменных приращения входного тока ΔI_1 и выходного напряжения ΔU_2 , приращения входного напряжения ΔU_1 и выходного тока ΔI_2 выражают через h -параметры.

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_1 &= h_{11}\Delta I_1 + h_{12}\Delta U_2; \\ \Delta I_2 &= h_{21}\Delta I_1 + h_{22}\Delta U_2, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $h_{11} = \Delta U_1/\Delta I_1$ – входное сопротивление транзистора при неизменном выходном напряжении ($\Delta U_2 = 0$); $h_{12} = \Delta U_1/\Delta U_2$ – коэффициент обратной связи по напряжению при неизменном входном токе ($\Delta I_1 = 0$); $h_{21} = \Delta I_2/\Delta I_1$ – коэффициент передачи тока при неизменном выходном напряжении ($\Delta U_2 = 0$), характеризует усилительные свойства транзистора; $h_{22} = \Delta I_2/\Delta U_2$ – выходная проводимость транзистора при неизменном входном токе ($\Delta I_1 = 0$).

Эквивалентная схема транзистора в системе h -параметров представлена на рис. 8.

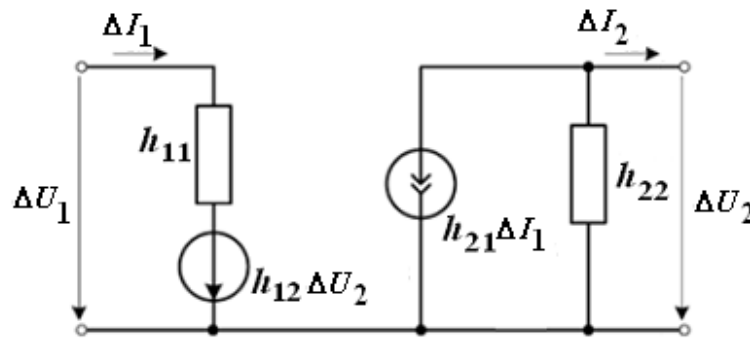


Рис. 8. Схема замещения транзистора в системе h -параметров

Значения h -параметров зависят от схемы включения транзистора, от положения рабочей точки, температуры и частоты. Параметры h_{11} и h_{12} определяются по входным (рис. 9, *а* и *б*), а h_{21} и h_{22} по выходным характеристикам транзистора в окрестности РТ транзистора (рис. 10, *а* и *б*).

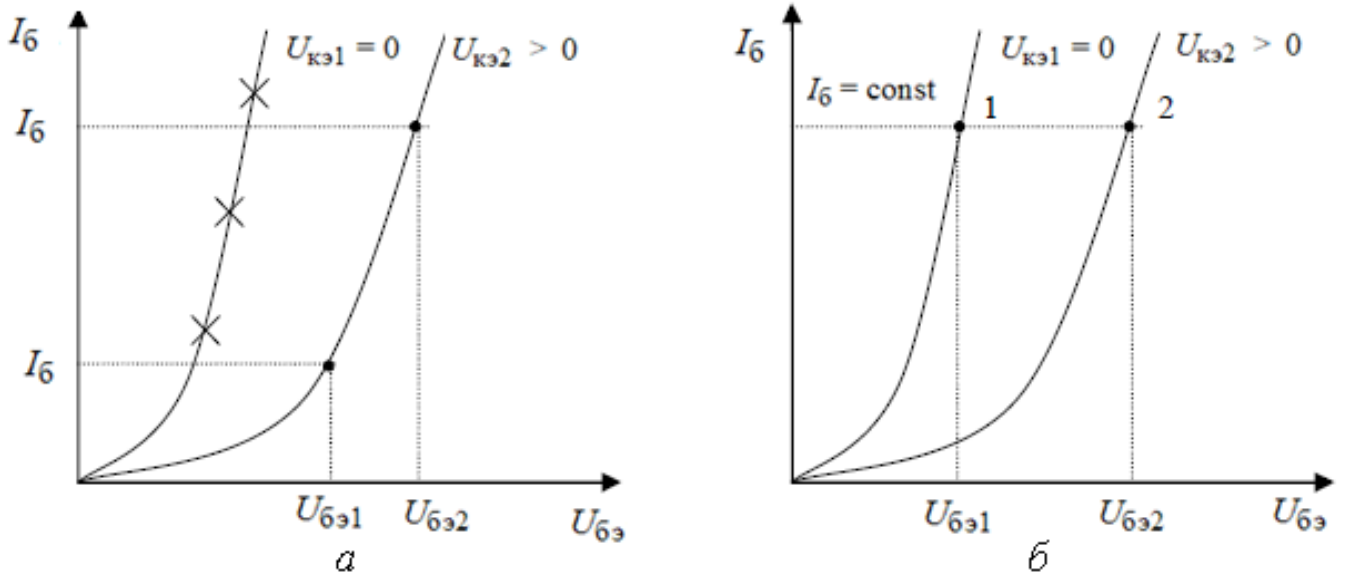


Рис. 9. Расчёт по входным характеристикам транзистора: определение параметра h_{11} (а); определение параметра h_{12} (б)

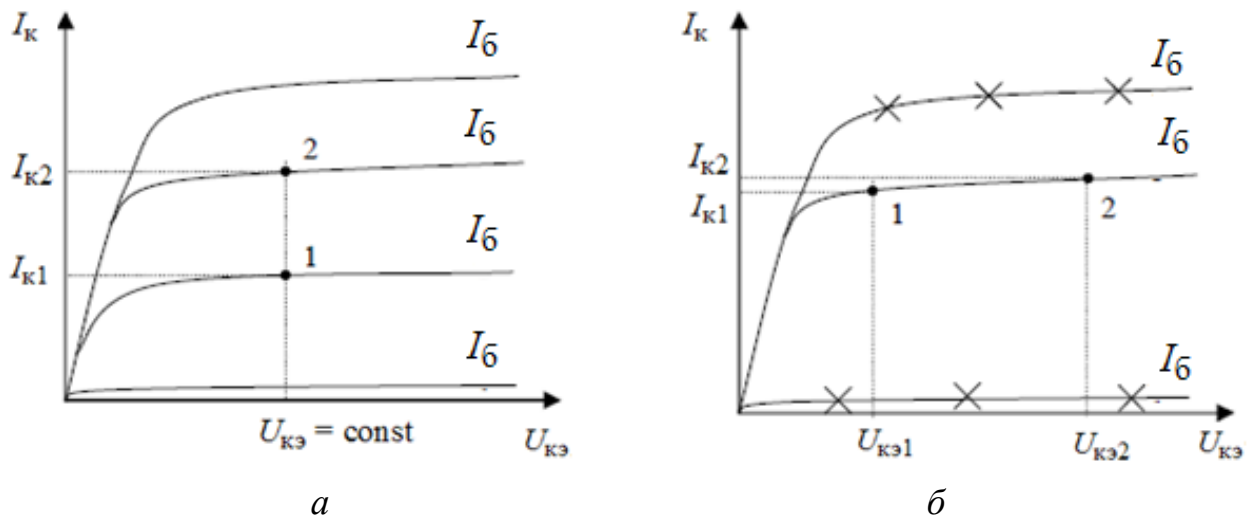


Рис. 10. Расчёт по выходным характеристикам транзистора: определение параметра h_{21} (а); определение параметра h_{22} (б)

Для схемы с ОЭ h -параметры определяются по формулам:

Входной характеристикой транзистора, включенного по схеме ОК, является зависимость $I_6 = f(U_{6к})$ при $U_{кэ} = \text{const}$, выходной характеристикой является зависимость $I_э = f(U_{кэ})$ при $I_6 = \text{const}$.

$$\begin{aligned}
h_{11э} &= \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{б}} \right|_{U_{кэ}} = \frac{U_{бэ2} - U_{бэ1}}{I_{б2} - I_{б1}}; \\
h_{12э} &= \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{б}} = \frac{U_{бэ2} - U_{бэ1}}{U_{кэ2} - U_{кэ1}} = \frac{U_{бэ2} - U_{бэ1}}{U_{кэ2}}, \text{ т.к. } U_{кэ1} = 0; \quad (7) \\
h_{21э} &= \left. \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{б}} \right|_{U_{кэ}} = \frac{I_{к2} - I_{к1}}{I_{б3} - I_{б2}} = \frac{I_{к2} - I_{к1}}{\Delta I_{б}}; \\
h_{22э} &= \left. \frac{\Delta I_{к}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{б}} = \frac{I_{к2} - I_{к1}}{U_{кэ2} - U_{кэ1}}.
\end{aligned}$$

По этим характеристикам можно определить h -параметры для схемы с ОК. Связь между h -параметрами в схемах включения с ОЭ и ОК:

$$h_{11к} = \frac{\Delta u_{бк}}{\Delta i_{б}} = h_{11э}; \quad (8)$$

$$h_{12к} = \frac{\Delta u_{бэ}}{\Delta u_{кэ}} = 1 - h_{12э} \cong 1; \quad (9)$$

$$h_{21к} = \frac{\Delta i_{э}}{\Delta i_{б}} = -(h_{11э} + 1) = 1 + \beta; \quad (10)$$

$$h_{22к} = \frac{\Delta i_{э}}{\Delta u_{эк}} = h_{22э}. \quad (11)$$

При любой схеме включения h -параметры связаны с собственными (физическими) параметрами транзистора следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned}
 r_{\bar{6}} &= \frac{h_{12\bar{6}}}{h_{22\bar{6}}} \approx h_{11\bar{6}} - \frac{h_{12\bar{6}}(1+h_{21\bar{6}})}{h_{22\bar{6}}} = h_{11\bar{6}} - \frac{h_{12\bar{6}}(1+h_{21\bar{6}})}{h_{22\bar{6}}}; \\
 r_{\bar{3}} &= h_{11\bar{6}} - \frac{h_{12\bar{6}}(1+h_{21\bar{6}})}{h_{22\bar{6}}} \approx \frac{h_{11\bar{6}}}{h_{22\bar{6}}} = -\frac{1-h_{12\bar{6}}}{h_{22\bar{6}}}; \\
 r_{\bar{к}} &= \frac{1}{h_{22\bar{6}}} \approx \frac{(1+h_{21\bar{6}})}{h_{22\bar{6}}} = -\frac{h_{21\bar{к}}}{h_{22\bar{к}}}; \\
 \alpha &= -h_{22\bar{6}} \approx \frac{h_{21\bar{6}}}{1+h_{21\bar{6}}} = \frac{1+h_{21\bar{к}}}{h_{21\bar{к}}}; \\
 \beta &= \frac{\alpha}{1-\alpha} \approx -\frac{h_{21\bar{6}}}{1+h_{21\bar{6}}} \approx h_{21\bar{6}} = h_{21\bar{к}} - 1.
 \end{aligned} \right\} (12)$$

Схемы однокаскадных усилителей различаются по способу подачи напряжения смещения на базу транзистора и наличием элементов термостабилизации рабочего режима транзистора. Наиболее распространенным усилительным каскадом на БТ является каскад с общим эмиттером.

Схема усилительного каскада с фиксированным током базы позволяет использовать для питания цепей базы и коллектора транзистора один и тот же источник питания (рис. 11, а). В простейшей схеме усилительного каскада с ОЭ с одним источником питания коллектор транзистора подключен через резистор $R_{\bar{к}}$ к источнику питания $E_{\bar{к}}$, входной сигнал подается на базу транзистора относительно общей точки. Выходной сигнал снимается с коллектора относительно той же заземленной точки.

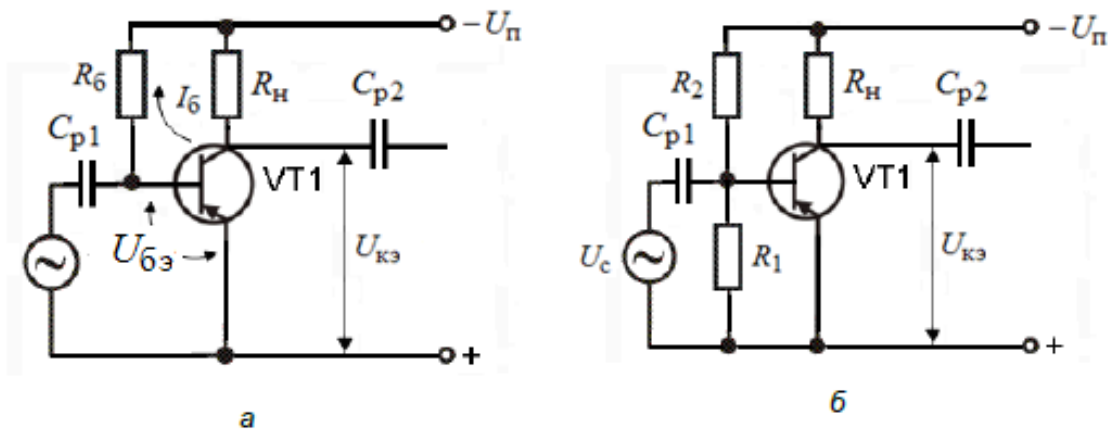


Рис. 11. Схема усилительного каскада с ОЭ: с фиксированным током базы (а); с фиксированным напряжением смещения (б)

Рассмотрим работу каскада: при подаче на базу входного напряжения входной ток протекает через переход «база - эмиттер» транзистора, что вызывает открывание транзистора и увеличение коллекторного тока. В цепи эмиттера транзистора протекает ток, равный сумме тока базы и тока коллектора. На резисторе в цепи коллектора при прохождении через него тока возникает некоторое напряжение, величиной значительно превышающее входное. Таким образом, происходит усиление транзистора по напряжению. Так как ток и напряжение в цепи – величины взаимосвязанные, аналогично происходит и усиление входного тока.

Простейший усилительный каскад по схеме с ОЭ (рис. 11, а) не может обеспечить стабильную работу в различных температурных условиях. Более эффективной является **схема с фиксированным напряжением смещения** на базе (рис. 11, б). В этой схеме резисторы R_1 и R_2 , подключенные параллельно источнику питания E_K , составляют делитель напряжения. При введении делителя повышается стабильность режима работы схемы, так как изменения тока в цепях эмиттера и коллектора транзистора незначительно влияют на величину напряжения смещения ($U_{бэп}$).

Данная схема в диапазоне температур работает лучше, чем схема с фиксированным током базы, однако для нормальной ее работы все равно необходима температурная стабилизация.

Схема с эмиттерной температурной стабилизацией (рис. 12) осуществляется на основе схемы смещения фиксированным напряжением базы, но между эмиттером и общим проводом включен резистор $R_э$. Каскад состоит из транзистора, источника питания E_K и резистора R_K , образующих главную цепь каскада. За счет протекания тока коллектора, меняющегося при изменении тока базы, создается усиленное переменное напряжение на выходе. Резисторы R_1 , R_2 и R_K задают режим покоя транзистора.

Конденсаторы $C_{р1}$ и $C_{р2}$ играют роль разделительных элементов. Разделительный конденсатор $C_{р1}$ служит для предотвращения протекания постоянной составляющей тока базы через источник входного сигнала. С помощью конденсатора $C_{р2}$ на выход каскада подается переменная составляющая напряжения $U_{кэ}$.

При отсутствии входного сигнала через транзистор протекают токи покоя $I_{бп}$, $I_{кп}$, $I_{эп}$. Выходное напряжение равно нулю. Баланс напряжений в цепи источника E_K для этого режима $E_K = U_{кэп} + I_{кп} \cdot R_K + I_{эп} \cdot R_э$.

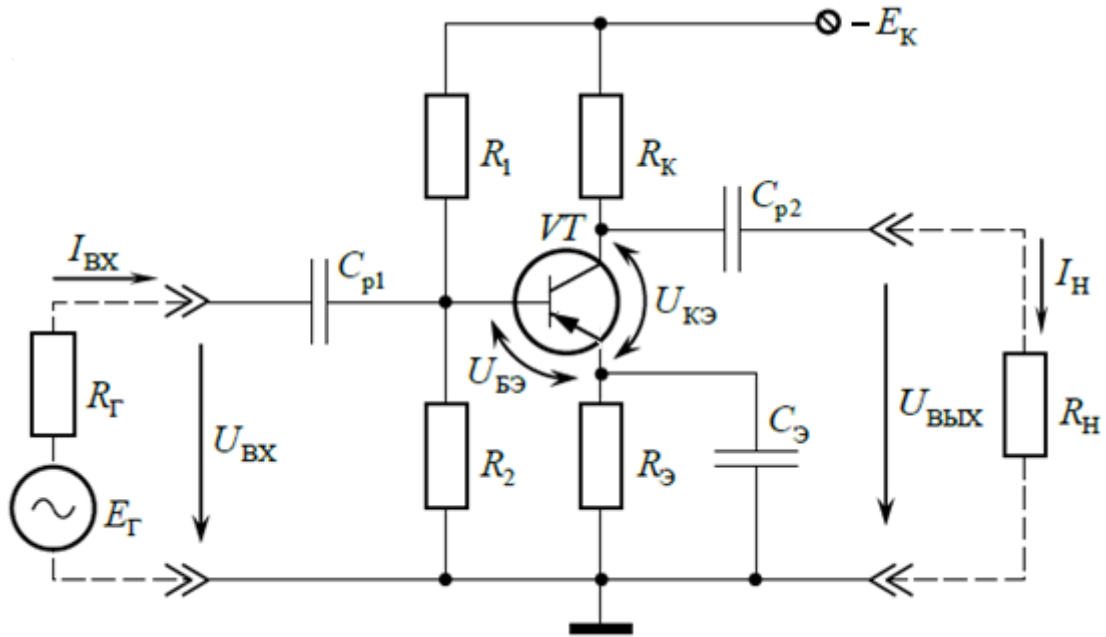


Рис. 12. Усилительный каскад с ОЭ с эмиттерной температурной стабилизацией

Ток $I_{КП}$ и напряжение $U_{КЭП}$ можно найти графически по координатам точки пересечения выходной характеристики, соответствующей току $I_{БП}$, и линии нагрузки по постоянному току (рис. 5, б).

При подаче на вход каскада переменного входного напряжения в цепи базы появляется переменная составляющая тока $i_{б\sim}$, в цепи коллектора переменная составляющая $i_{к\sim} = \beta i_{б\sim}$ и переменное выходное напряжение $U_{ВЫХ}$, связанное с током $i_{к\sim}$ линией нагрузки по переменному току (линия ef , рис. 5, б), которая проходит через точку покоя П под углом γ , котангенс которого пропорционален результирующему сопротивлению в цепи коллектора по переменному току:

$$\operatorname{ctg} \gamma = R_K R_H / (R_K + R_H).$$

Входное и выходное напряжения каскада с ОЭ находятся в **противофазе**, так как при положительной полуволне входного напряжения ток базы, а следовательно, и ток коллектора увеличиваются, падение напряжения на резисторе R_K увеличивается, потенциал коллектора по отношению к общей точке уменьшается.

Стабилизация режима покоя. Характеристики и параметры транзистора зависят от температуры. С изменением температуры

изменяются ток $I_{к0}$, напряжение $U_{бэ}$ и коэффициенты передачи тока α и β . Температурная нестабильность указанных параметров приводит к изменению $I_{кп}$ при изменении температуры и меняющегося режима покоя каскада, что может привести к искажению формы кривой $U_{вых}$.

Для **стабилизации режима покоя** применена отрицательная обратная связь (ООС) по постоянному току, в цепь эмиттера включен резистор $R_э$. Для устранения ООС по переменному току, уменьшающий коэффициент усиления каскада, резистор $R_э$ зашунтирован конденсатором $C_э$.

При повышении температуры увеличится ток $I_{к0}$, что приведет к увеличению тока $I_{кп} = \beta I_{бп} + I_{к0}$ и тока $I_{эп}$. Точка покоя сместится по линии нагрузки вверх (рис. 12). С повышением $I_{эп}$ увеличится падение напряжения на $R_э$ ($U_{R_э} = I_{эп}R_э$) и уменьшится напряжение $U_{бэ} = U_{R2} - U_{R_э}$, а следовательно, уменьшатся токи $I_{бп}$ и $I_{кп}$, точка покоя вернется в исходное положение.

Для определения основных показателей каскада с ОЭ можно воспользоваться эквивалентной схемой для средних частот (рис. 13).

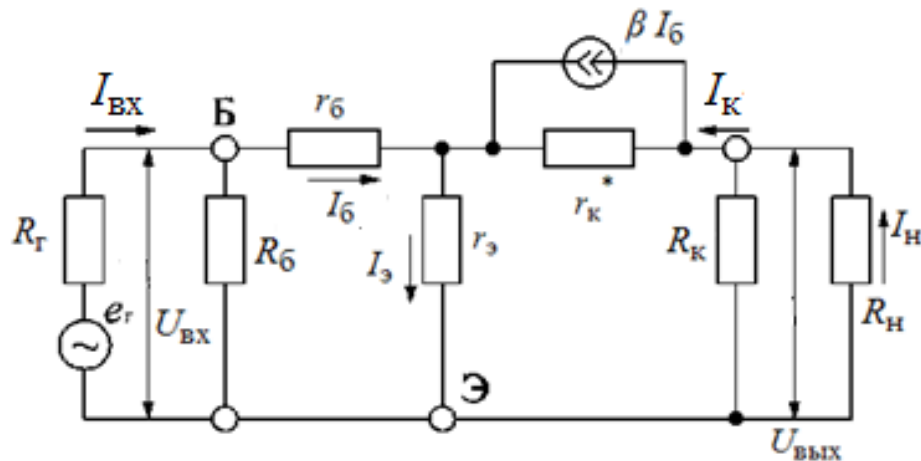


Рис. 13. Схема замещения каскада с ОЭ

Здесь транзистор представлен схемой замещения в физических параметрах. В схеме отсутствуют конденсаторы C_1 , C_2 и $C_э$, так как их сопротивление на средних частотах мало. Резистор $R_э$ также отсутствует, так как по переменному току он зашунтирован конденсатором $C_э$. Сопротивление источника питания $E_к$ по переменному току равно нулю.

Входное сопротивление каскада:

$$R_{\text{ВХ}} = R_{\text{б}} \parallel r_{\text{ВХ}} = \frac{r_{\text{ВХ}} \cdot R_{\text{б}}}{r_{\text{ВХ}} + R_{\text{б}}}, \quad (13)$$

где $r_{\text{ВХ}} = r_{\text{б}} + (\beta + 1) \cdot r_{\text{э}}$ – сопротивление входной цепи транзистора;
а $R_{\text{б}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ – эквивалентное сопротивление делителя в цепи базы.

Коэффициент усиления по току:

$$K_i = \frac{i_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{ВХ}}} = \beta \frac{R_{\text{б}}}{R_{\text{б}} + r_{\text{ВХ}}} \frac{r_{\text{к}}^* \parallel R_{\text{к}} \parallel R_{\text{н}}}{R_{\text{н}}}, \quad (14)$$

если $r_{\text{к}}^* \gg R_{\text{к}} \parallel R_{\text{н}}$, то

$$K_i = \beta \frac{R_{\text{б}}}{R_{\text{б}} + r_{\text{ВХ}}} \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}}, \quad (15)$$

если $R_{\text{б}} \geq (2 \dots 5)r_{\text{ВХ}}$, то

$$K_i = \beta \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}}. \quad (16)$$

Коэффициент усиления по напряжению, вычисленный относительно

$U_{\text{ВХ}}$:

$$K'_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{i_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}}}{i_{\text{ВХ}} \cdot R_{\text{ВХ}}} = \beta \frac{R_{\text{к}} \cdot R_{\text{н}}}{r_{\text{ВХ}} (R_{\text{к}} + R_{\text{н}})}. \quad (17)$$

Выходное сопротивление:

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{К}} \parallel r_{\text{К}}^* \approx R_{\text{К}}. \quad (18)$$

Коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = \frac{P_{\text{Н}}}{P_{\text{ВХ}}} = K_u \cdot K_i. \quad (19)$$

Амплитудная характеристика усилительного каскада показывает зависимость выходного напряжения от входного напряжения $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ при $f = \text{const}$ (рис. 14, *a*).

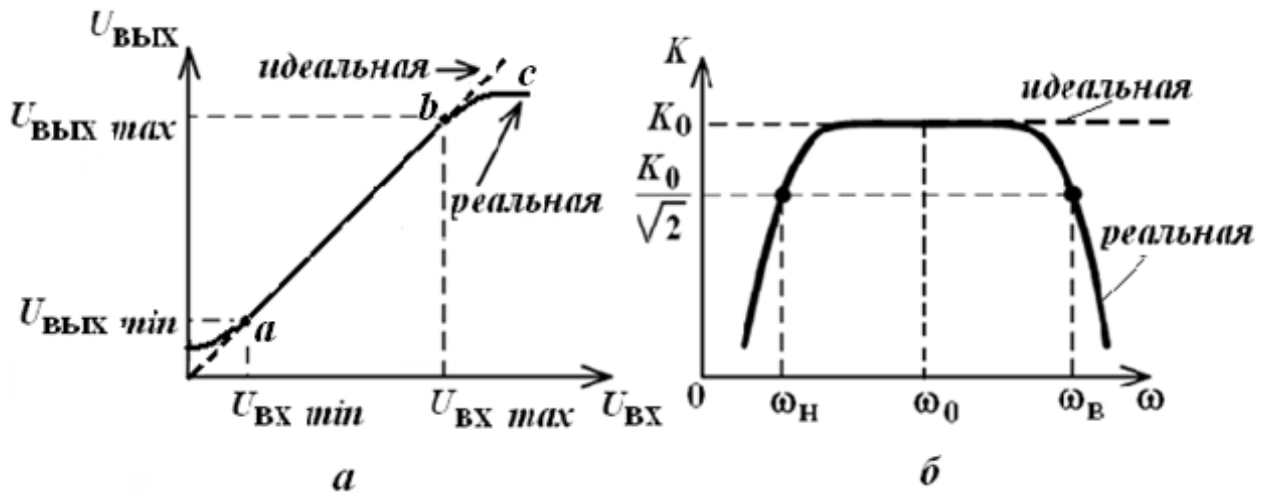


Рис. 14. Характеристики усилительного каскада: амплитудная (*a*); амплитудно-частотная (*б*)

В идеальном случае эта характеристика должна быть прямолинейной (на рис. 14, *a* показана пунктирной линией). При малых значениях входного напряжения реальная характеристика начинается не от нуля из-за наличия шумов усилителя. Участок *ab* – рабочий, на нем отсутствуют нелинейные искажения (коэффициент усиления K_u постоянен). При больших значениях входного напряжения (участок *bc*) характеристика отклоняется от прямолинейной, так как усиление ограничено напряжением питания усилителя.

Амплитудная характеристика определяет допустимый диапазон входных напряжений, при которых на выходных напряжениях

отсутствуют нелинейные искажения. *Нелинейные искажения* – это изменение формы сигнала, обусловленное нелинейностью характеристик его элементов и, прежде всего, нелинейностью ВАХ усилительных элементов.

По амплитудной характеристике определяется динамический диапазон усилителя, определяемый отношением

$$D = \frac{U_{\text{ВХ}}^{\text{max}}}{U_{\text{ВХ}}^{\text{min}}}, \quad (20)$$

где $U_{\text{ВХ}}^{\text{max}}$ и $U_{\text{ВХ}}^{\text{min}}$ – максимальное и минимальное входные напряжения, при которых нелинейные искажения усиливаемого сигнала и возможность его отличия на фоне шумов находятся в допустимых пределах. Если динамический диапазон выражается в децибелах, то

$$D^{\text{дБ}} = 20 \lg D. \quad (21)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала $K(\omega)$ при $U_{\text{ВХ}} = \text{const}$ (рис. 14, б).

По АЧХ можно определить полосу усиливаемых частот. Её принято считать ограниченной частотами, на которых коэффициент усиления усилителя уменьшается в $\sqrt{2}$ раз от своего максимального значения. Если бы в усилителе не было искажений, то АЧХ представляла бы прямую линию, параллельную оси абсцисс (пунктирная линия на рис. 14, б), т.е. одинаково усиливались бы сигналы с частотой от 0 до ∞ . Причиной частотных искажений является присутствие в схеме усилителя реактивных элементов: конденсаторов, катушек индуктивности, p - n -переходов полупроводников и т.п.

АЧХ представляет собой совокупность трех областей, разделенных верхней и нижней граничными частотами $\omega_{\text{Н}}$ и $\omega_{\text{В}}$. Частоты, при которых коэффициент усиления по напряжению уменьшается в $\sqrt{2}$ раз, называются граничными. Диапазон частот между верхней и нижней границами называется полосой пропускания. Снижение коэффициента усиления по напряжению при низких частотах входного сигнала возникает из-за возрастания емкостного сопротивления разделительных конденсаторов $C_{\text{ВХ}}$

и $C_{\text{вых}}$. При высоких частотах входного сигнала коэффициент усиления по напряжению падает из-за уменьшения емкостного межэлектродного сопротивления транзистора, обусловленного наличием паразитных емкостей p - n -переходов.

Частотные искажения характеризуются коэффициентом частотных искажений M , который определяют как отношение модуля коэффициента усиления на средних частотах K_0 к модулю коэффициента усиления на заданной частоте K_ω :

$$M = \frac{K_0}{K_\omega}. \quad (22)$$

Условно частотным диапазоном усилителя является область граничных частот от ω_H до ω_B , на которых

$$M_H = M_B = \sqrt{2}.$$

Каскад с ОК (эмиттерный повторитель). Это по сути частный случай схемы с ОЭ при $R_k = 0$, поэтому практически все соотношения для токов транзистора и потенциалов на его переходах, характерные для схемы с ОЭ, могут быть применимы и в данном случае.

Назначение элементов C_1 , C_2 , R_1 такое же, как в каскаде с ОЭ (рис. 15). Входное напряжение подается между базой и общей точкой, выходное напряжение снимается с резистора $R_э$ между эмиттером и общей точкой. В результате образуется 100 % отрицательная обратная связь по напряжению, что позволяет значительно уменьшить нелинейные искажения, возникающие при работе. Коллектор по переменному току заземлен через малое сопротивление источника питания E_k и является общей точкой для входной и выходной цепей. Фазы входного и выходного сигнала совпадают. Большое значение входного сопротивления с ОК предопределяет широкое применение на практике эмиттерного повторителя в качестве согласующего устройства.

При $U_{\text{вх}} = 0$ через транзистор протекают токи покоя, $U_{\text{вых}} = 0$. При подаче на вход переменного $U_{\text{вх}}$ в цепи базы появляется переменная составляющая тока базы, в цепи эмиттера – переменная составляющая тока эмиттера $I_э\sim$, которая создает на $R_э$ выходное напряжение $U_{\text{вых}} = R_э \cdot i_э\sim$. Напряжения $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ находятся в фазе, так как при

положительной полуволне $U_{ВХ}$ токи I_6 и I_3 увеличиваются, падение напряжения на R_3 возрастает и потенциал эмиттера становится более положительным по отношению к общей точке. Коэффициент усиления по напряжению $K_u = U_{ВЫХ}/U_{ВХ} \leq 1$, так как в каскаде с ОК вследствие отсутствия конденсатора C_3 , шунтирующего резистор R_3 (рис. 15), имеет место стопроцентная последовательная ООС по напряжению, т.е. все выходное напряжение последовательно вводится во входную цепь ($U_{ВХ} = U_{63} + U_{ВЫХ}$). Такая ООС увеличивает $R_{ВХ}$ (до 500 кОм) и уменьшает $R_{ВЫХ}$ каскада (десятки, сотни Ом). Каскад с ОК применяется для согласования сопротивлений между высокоомным источником $U_{ВХ}$ и низкоомной нагрузкой.

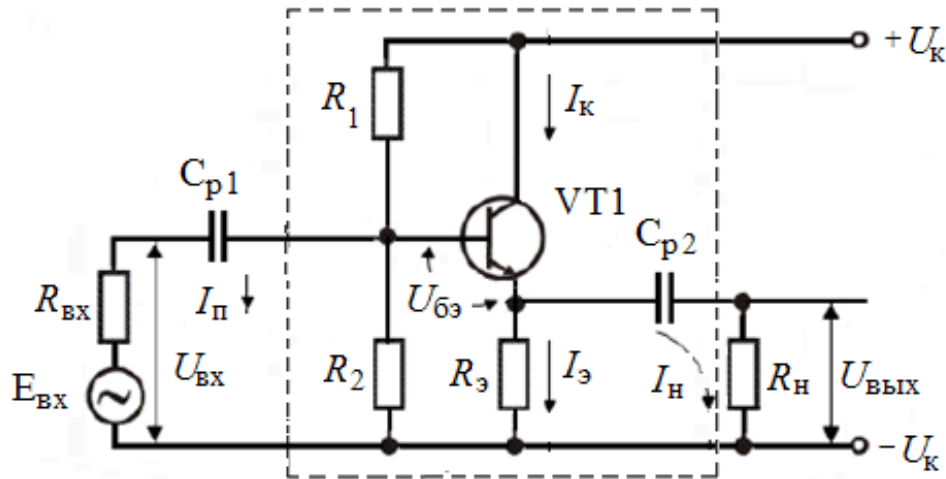


Рис. 15. Усилительный каскад с ОК

Входное сопротивление усилительного каскада с ОК определяется параллельно соединенными сопротивлениями R_1 , R_2 и сопротивлением входной цепи транзистора $r_{ВХ}$:

$$R_{ВХ} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{ВХ}, \quad (23)$$

где $r_{ВХ} = r_6 + (1 + \beta)(r_3 + R_3 \parallel R_Н)$.

Сопротивление r_3 для схемы ОК входит в сумме с $R_3 \parallel R_Н$, в связи с чем сопротивление входной цепи транзистора $r_{ВХ}$ и сопротивление $R_{ВХ}$ каскада ОК больше, чем в схеме ОЭ. Поскольку r_3 обычно много меньше

$R_3 \parallel R_H$, а r_6 меньше второго слагаемого правой части выражения (23), для входного сопротивления эмиттерного повторителя можно записать

$$R_{BX} = R_1 \parallel R_2 \parallel [(1 + \beta)(R_3 \parallel R_H)] \quad (24)$$

Коэффициент усиления по току для схемы ОК:

$$K_i = (1 + \beta) \frac{R_{BX}}{r_{BX}} \frac{R_3 \parallel R_H}{R_H}, \quad (25)$$

т.е. он также зависит от соотношений R_{BX} и r_{BX} , R_3 и R_H . В предположении $R_{BX} \approx r_{BX}$ имеем:

$$K_i = (1 + \beta) \frac{R_3 \parallel R_H}{R_H}. \quad (26)$$

Согласно выражениям (25) и (26) каскад ОК обеспечивает усиление по току.

Коэффициент усиления по напряжению каскада ОК можно найти с учетом того, что $r_3 \ll r_k$. Используя выражение:

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{I_3 (r_k \parallel R_3 \parallel R_H)}{I_6 R_{BX}} = \frac{(1 + \beta)(r_k \parallel R_3 \parallel R_H)}{r_6 + (1 + \beta)(r_k \parallel R_3 \parallel R_H)} < 1. \quad (27)$$

Учитывая, что $r_k \gg R_H$, при выполнении условия $R_H \gg R_3$ выражение (27) можно записать в виде:

$$K_U = \frac{\beta R_3}{r_6 + \beta R_3}. \quad (28)$$

Выходное сопротивление каскада можно найти, используя выражение:

$$R_{ВЫХ} = R_3 \parallel \left(r_3 + \frac{r_6}{1 + \beta} \right) \approx R_3 \parallel r_3. \quad (29)$$

В частном случае при достаточно большом значении коэффициента передачи тока базы и низкоомном источнике входного сигнала можно полагать

$$R_{\text{ВЫХ}} \approx r_{\text{Э}}. \quad (30)$$

Таким образом, входное сопротивление каскада с общим коллектором много больше входного сопротивления каскада с общим эмиттером. Выходное же сопротивление каскада с ОК много меньше входного сопротивления каскада с ОЭ.

Благодаря большому входному и малому выходному сопротивлениям каскад с ОК имеет широкую полосу пропускания (большую, чем каскад с ОЭ). Коэффициент усиления по мощности каскада с ОК определяется по формуле (20).

Описание лабораторной установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 16. Напряжение питания коллекторной цепи транзистора подается от источника питания ± 15 В, регулируется потенциометром «Рег. $E_{\text{К}}$ » и контролируется вольтметром « $E_{\text{К}}$ ». Изменение входного напряжения осуществляется резистором R_1 , ток базы измеряется микроамперметром $\mu\text{А}$, ток коллектора (эмиттера) – миллиамперметром mA . Данные измерительные приборы смонтированы на стенде. Микроамперметр $\mu\text{А}$ включен в диагональ моста для измерения среднего значения входного тока.

Лабораторный макет содержит два усилительных каскада: каскад с общим эмиттером и каскад с общим коллектором, переключение которых осуществляется с помощью тумблера B_{14} .

Переключателями B_1 , B_{12} входная цепь транзистора подключается к источнику постоянного или переменного входного напряжения, величина которого регулируется потенциометром «Рег. $U_{\text{ВХ}}$ » и измеряется переносным электронным вольтметром.

Гнезда Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 и Γ_4 позволяют подключать цифровой вольтметр для измерения переменных и постоянных напряжений $U_{\text{ВХ}}$, $U_{\text{ВЫХ}}$.

Резистор R_2 ограничивает ток базы транзистора ПП₁. Резисторы R_{61} и R_{62} задают фиксированное смещение на базу транзистора ПП₁. Конденсаторы $C_{\text{ВХ}}$ и $C_{\text{ВЫХ}}$ используются для разделения постоянных и

переменных составляющих при подключении внешнего источника сигнала на гнезда Г₁, Г₃ и снятии выходного сигнала с гнезд Г₂, Г₃.

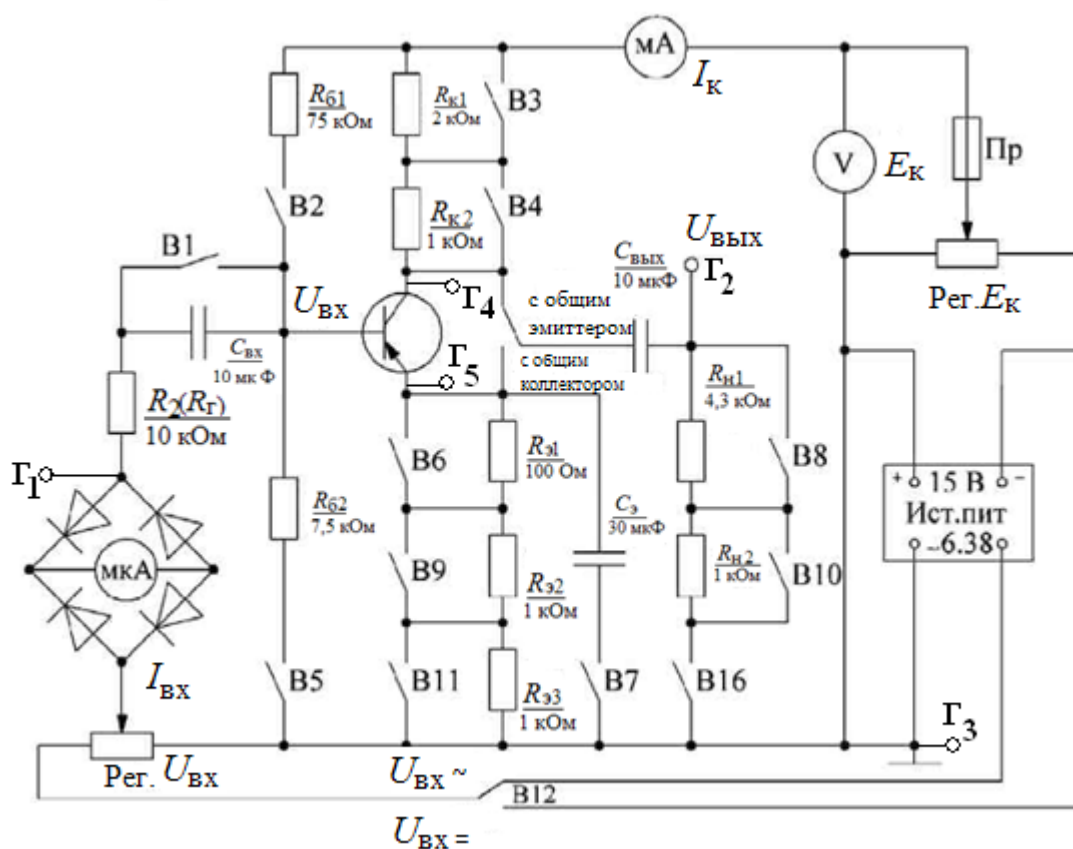


Рис. 16. Принципиальная схема лабораторной установки

Тумблерами В₂, В₅ подается смещение на базу транзистора; тумблерами В₈, В₁₀, В₁₆ к выходу усилительного каскада подключаются нагрузки $R_{н1}$ и $R_{н2}$. Сопротивления в коллекторной и эмиттерной цепях ($R_{к1}$, $R_{к2}$, $R_{э1}$ и $R_{э2}$) подсоединяются к схеме при отключении тумблеров В₅, В₄, В₆, В₉, В₁₁ (в положении «Вкл» тумблер замкнут), эмиттерная стабилизация включается тумблерами В₆, В₇.

Переменное напряжение на входе и выходе каскадов измеряется переносным электронным вольтметром переменного тока.

Рабочее задание

1. Исследуйте транзистор и однокаскадный усилитель, включенные по схеме с общим эмиттером.

2. Исследуйте транзистор и однокаскадный усилитель, включенные по схеме с общим коллектором

Методика выполнения рабочего задания 1

1. Соберите на стенде схему, соответствующую рис. 17, для снятия статистических характеристик транзистора по схеме с общим эмиттером, для этого:

а) подайте на вход постоянное напряжение (V_{12} в положении « $=U_{вх}$ », тумблер V_1 в положении «Вкл»);

б) отключите нагрузку схемы и зашунтируйте резисторы в эмиттерной и коллекторной цепях (тумблеры $V_3, V_4, V_6, V_9, V_{11}$ – в положении «Вкл», тумблеры V_2, V_5, V_7, V_{16} – выключить).

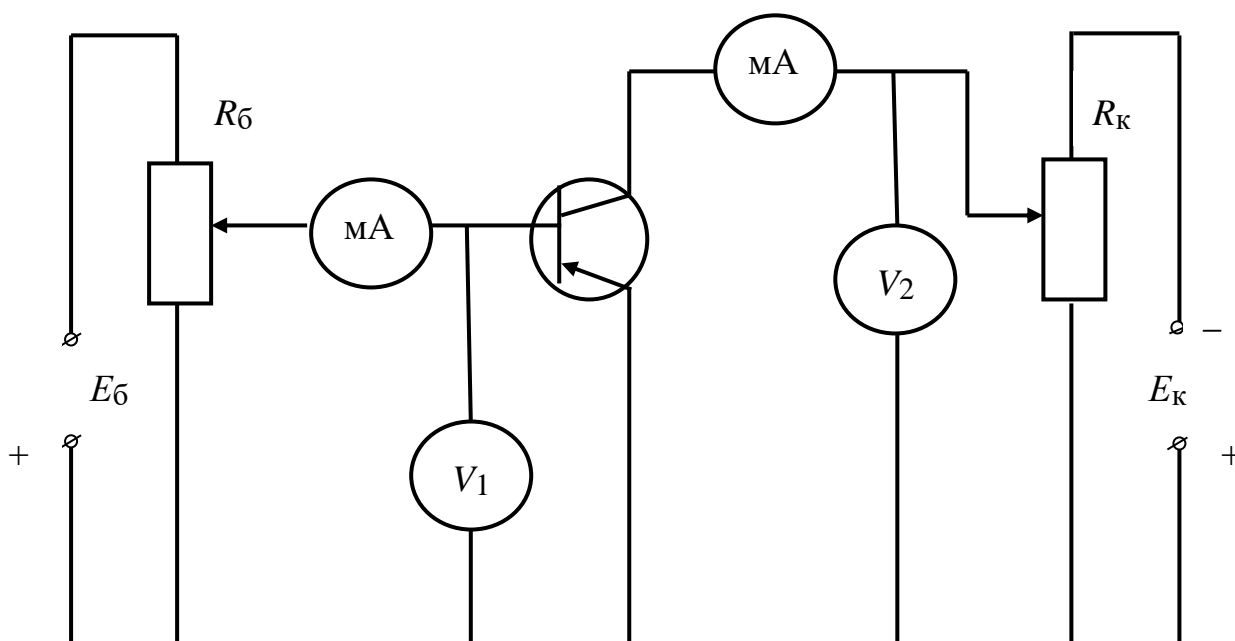


Рис. 17. Схема для снятия статических характеристик транзистора с общим эмиттером

2. Подайте питание на стенд (тумблер «Сеть» включите).

3. Снимите статические входные характеристики транзистора по схеме с общим эмиттером $I_b = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = 0$ В; $U_{кэ} = -5$ В, $U_{кэ} = -10$ В.

Постоянным напряжение $U_{кэ}$ поддерживают с помощью потенциометра «рег. $E_к$ ». Входное напряжение $U_{бэ}$ изменяют

потенциометром «рег. $U_{ВХ}$ », а измеряют цифровым вольтметром (с гнезд Г1Г3).

Результаты измерений запишите в табл. 1.

Таблица 1

I_6 , мкА								Примечание
$U_{бэ}$, В								$U_{кэ} = 0$ В
								$U_{кэ} = -5$ В
								$U_{кэ} = -10$ В

4. Снимите статические выходные характеристики транзистора по схеме с общим эмиттером $I_к = f(U_{бэ})$ при $I_6 = \text{const}$. Напряжение на выходе $U_{кэ}$ изменяют потенциометром «Рег. напряжения $E_к$ », а измеряют цифровым вольтметром (с гнезд Г1Г4). Входной ток базы I_6 поддерживают постоянным с помощью потенциометра «рег. $U_{ВХ}$ ». Результаты измерений запишите в таблицу 2.

Таблица 2

$U_{кэ}$, В								Примечание
								$I_6 =$ мкА
								$I_6 =$ мкА
								$I_6 =$ мкА
								$I_6 =$ мкА
								$I_6 =$ мкА

5. Наберите на стенде схему, представленную на рис. 11, а, для снятия амплитудной характеристики $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ усилительного каскада, собранного по схеме с ОЭ и фиксированным током базы. Для этого:

а) отключите тумблер В1 и подайте на вход переменное напряжение переключением тумблера В12 в положение « $U_{ВХ\sim}$ »;

б) тумблер В14 переключите в положение «с общим эмиттером»;

в) включите тумблеры В₂, В₆, В₉, В₁₁, В₁₃, а тумблеры В₇, В₈ выключите;

г) значения сопротивления в цепи коллектора и нагрузки возьмите из таблицы 3.

Таблица 3

вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9
с ОЭ	Сопротивления, кОм									
	R_K	3	3	3	2	2	2	1	1	1
	R_H	4,3	5,3	1,0	4,3	5,3	1,0	4,3	5,3	1,0
с ОК	$R_Э$	2	2	2	2	1	1	2,1	2,1	2,1
	R_H	4,3	5,3	1,0	4,3	5,3	1,0	4,3	5,3	1,0

6. Снимите амплитудную характеристику $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ усилительного каскада, собранного по схеме с ОЭ с фиксированным током базы при $E_K = -12$ В.

Результаты измерений запишите в табл. 4.

Примечание: входное и выходное напряжения измеряйте цифровым вольтметром.

Таблица 4

$U_{\text{ВХ}}, \text{ мВ}$											Примечания
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$											$R_K =$
$K = U_{\text{ВХ}} / U_{\text{ВХ}}$											$R_H =$

7. Наберите на стенде схему, представленную на рис. 12, для снятия амплитудной характеристики $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ усилительного каскада с ОЭ с эмиттерной стабилизацией и фиксированным напряжением база – эмиттер при тех же значениях R_K и R_H , $E_K = -12$ В, $R_Э = 100$ Ом, для этого:

- включите тумблеры В₂, В₅, В₇, В₁₃, В₉ и В₁₁;
- тумблер В₆ разомкните.

Значения сопротивлений в цепи коллектора и нагрузки возьмите из табл. 3. Входное напряжение задавать потенциометром «Рег. $U_{ВХ}$ ». Результаты измерений записать в табл. 5.

Таблица 5

$U_{ВХ}$, мВ											Примечания
$U_{ВЫХ}$, В											$R_K =$
$K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}$											$R_H =$

Зарисуйте форму выходного напряжения для линейного и нелинейного режимов работы схемы.

8. Снимите амплитудно-частотную характеристику усилительного каскада с ОЭ с эмиттерной стабилизацией и фиксированным напряжением $U_{БЭ}$. Для этого в каскаде с ОЭ при $R_1 = 0$, $R_H = 1\text{кОм}$, $U_{ВХ} = 0,5\text{ В}$ снимите зависимость $U_{ВЫХ} = \varphi(f)$. Для снятия зависимости к гнездам Г1Г3 подключите звуковой генератор ГЗ – 34. Выходное напряжение снимите с гнезд Г2Г3, измеряя его цифровым вольтметром. Частоту входного сигнала f измените от 20 Гц до 20 кГц, поддерживая неизменной величину входного напряжения по вольтметру генератора.

9. Наберите на стенде схему, представленную на рис. 15, для снятия амплитудной характеристики $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ усилительного каскада по схеме с ОК при $E_K = -12\text{ В}$, для этого:

- а) тумблер В14 переключите в положение «с общим коллектором»;
- б) тумблеры В2, В3, В4 и В13 включите;
- в) тумблеры В5, В7 выключите;

г) значения сопротивления в цепи эмиттера и нагрузки возьмите из табл. 3. Результаты измерений запишите в таблицу, аналогичную табл. 5.

10. Снимите амплитудно-частотную характеристику усилительного каскада с ОК. Для этого в каскаде с ОК при $R_1 = 0$, $R_H = 1\text{кОм}$, $U_{ВХ} = 0,5\text{ В}$ снимите зависимость $U_{ВЫХ} = \varphi(f)$. Для снятия зависимости к гнездам Г1Г3 подключите звуковой генератор ГЗ – 34. Выходное напряжение снимите с гнезд Г2Г3, измеряя его цифровым вольтметром. Частоту входного сигнала f измените от 20 Гц до 20 кГц, поддерживая неизменной величину входного напряжения по вольтметру генератора.

Обработка данных эксперимента

1. По данным табл. 1 и 2 постройте семейство входных и выходных статических характеристик транзистора. По полученным характеристикам определите h -параметры транзистора для схемы с ОЭ (см. рис. 9 и 10).

Используя выражения (12), рассчитайте внутренние параметры транзистора ($r_{э}$, $r_{к}$, $r_{б}$, α , β).

2. Постройте амплитудную характеристику $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ усилительного каскада с ОЭ и фиксированным током базы. По амплитудной характеристике определите диапазон изменения входного напряжения, в котором отсутствуют нелинейные искажения. Определите коэффициент усиления по напряжению K_U для линейной области и динамический диапазон каскада D , используя формулу (20).

3. Постройте амплитудную характеристику $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ усилительного каскада с ОЭ с эмиттерной стабилизацией и фиксированным напряжением «база – эмиттер». По амплитудной характеристике определите динамический диапазон каскада. Определите коэффициент усиления по напряжению K_U .

4. Постройте амплитудную характеристику $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ усилительного каскада с ОК. По амплитудной характеристике определите динамический диапазон каскада. Сравните амплитудные характеристики для схем с ОЭ и ОК и сделайте выводы.

5. Используя выражения (13), (15), (17), (18), (19), определите $R_{\text{ВХ}}$, $R_{\text{ВЫХ}}$, K_U , K_I и K_r каскада с ОЭ с эмиттерной стабилизацией и фиксированным напряжением «база – эмиттер». Расчетные значения K_i и K_U сравните с экспериментальными.

6. Постройте амплитудно-частотную характеристику для схемы с ОЭ в полулогарифмическом масштабе $U_{\text{ВЫХ}} = \varphi(\lg f)$. Проанализируйте полученную зависимость. Найдите нижнюю и верхнюю граничные частоты.

Сравните измеренное значение нижней граничной частоты со значением, рассчитанным из формулы

$$f_{\text{НЧ}} = \frac{1}{2\pi C_2 (R_{\text{К}} + R_{\text{Н}})}.$$

Определите полосу пропускания усилителя. Сделайте соответствующие выводы. Найдите коэффициент частотных искажений M для заданной частоты, пользуясь выражением (22) (рассчитайте на частоте 100 кГц).

7. Постройте амплитудно-частотную характеристику для схемы с ОК в полулогарифмическом масштабе $U_{\text{ВЫХ}} = \varphi(\lg f)$. Проанализируйте полученную зависимость. Найдите нижнюю и верхнюю граничные частоты. По частотной характеристике усилительного каскада определите ее рабочий диапазон по частоте, т. е. область частот, в которой изменения коэффициента усиления не превосходят 3 дБ (полосу пропускания), и рассчитайте коэффициент частотных искажений по формуле (22) (рассчитайте на частоте 100 кГц).

Используя результаты работы, проведите сравнительный анализ схем включения ОЭ и ОК.

Методика выполнения рабочего задания 2

1. Снимите статические характеристики транзистора по схеме ОК (рис. 16). Для этого тумблер B_{14} поставьте в положение «с общим коллектором». Подайте на вход постоянное напряжение (B_{12} в положении $U_{\text{ВХ}}=$, тумблер B_1 в положении «Вкл»). Отключите нагрузку схемы и зашунтируйте резисторы в эмиттерной и коллекторной цепях (тумблеры $B_3, B_4, B_6, B_9, B_{11}$ в положении «Вкл», тумблеры B_2, B_5, B_7, B_{18} выключите).

2. Подайте питание на стенд (тумблер «Сеть» включите).

3. Задавая потенциометром «Рег. $U_{\text{ВХ}}$ » ток базы по микроамперметру и поддерживая $U_{\text{КЭ}}$ постоянным (с помощью потенциометра «Рег. $E_{\text{К}}$ »), снимите входные характеристики транзистора $I_6 = f(U_{\text{БК}})$ при $U_{\text{КЭ}} = 0 \text{ В}, -5 \text{ В}, -10 \text{ В}$. Напряжение $U_{\text{БК}}$ измерьте переносным электронным вольтметром (с гнезд $\Gamma_1\Gamma_3$). Результаты измерений запишите в табл. 6.

4. Задавая потенциометром «Рег. $E_{\text{К}}$ » напряжение на коллекторе и поддерживая ток базы постоянным (с помощью потенциометра «Рег. $U_{\text{ВХ}}$ »), снимите выходные характеристики транзистора $I_3 = f(U_{\text{КЭ}})$ при $I_6 = \text{const}$. Напряжение на выходе $U_{\text{КЭ}}$ измерьте цифровым вольтметром (с гнезд $\Gamma_1\Gamma_5$).

Результаты измерений запишите в табл. 7.

Таблица 6

I_6 , мкА										Примечание
$U_{6к}$, В										$U_{кэ} = 0$ В
										$U_{кэ} = -5$ В
										$U_{кэ} = -10$ В

Таблица 7

$U_{кэ}$, В										Примечание
										$I_6 =$ мкА
										$I_6 =$ мкА
										$I_6 =$ мкА
										$I_6 =$ мкА
										$I_6 =$ мкА

5. Разомкните тумблер B_1 и подайте на вход переменное напряжение (B_{12} в положении « $U_{вх\sim}$ »).

6. Снимите амплитудную характеристику $U_{вых} = f(U_{вх})$ усилительного каскада ОЭ (рис. 12) при $E_k = -12$ В (тумблеры $B_2, B_5, B_7, B_9, B_{11}, B_{16}$ включены; B_6 выключен).

Входное напряжение задавать потенциометром «Рег. $U_{вх}$ ». Результаты измерений запишите в табл. 8. Значения сопротивлений в цепи коллектора и нагрузки возьмите из табл. 9.

Таблица 8

$U_{вх}$, мВ											Примечания
$U_{вых}$, В											$R_k =$
$K_U = U_{вых}/U_{вх}$											$R_H =$

Зарисуйте форму выходного напряжения для линейного и нелинейного режимов работы схемы.

7. Снимите амплитудную характеристику $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ усилительного каскада с ОК при $E_{\text{К}} = -12$ В (тумблер В₁₄ в положении «С общим коллектором»; В₂, В₃, В₄, В₁₆ в положения «Вкл»; В₅, В₇ выключены). Результаты измерений запишите в таблицу, аналогичную табл. 8. Значения сопротивлений $R_{\text{Э}}$ и $R_{\text{Н}}$ возьмите из табл. 9

Таблица 7

вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Схема	Сопротивления, кОм									
с ОЭ	$R_{\text{К}}$	3	3	3	2	2	2	1	1	1
	$R_{\text{Н}}$	4,3	5,3	1,0	4,3	5,3	1,0	4,3	5,3	1,0
с ОК	$R_{\text{Э}}$	2	2	2	2	1	1	2,1	2,1	2,1
	$R_{\text{Н}}$	4,3	5,3	1,0	4,3	5,3	1,0	4,3	5,3	1,0

8. Снимите амплитудно-частотную характеристику усилительного каскада с ОК. Для этого в каскаде с ОК при $R_1 = 0$, $R_{\text{Н}} = 1$ кОм, $U_{\text{ВХ}} = 0,5$ В снимите зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = \varphi(f)$. Для снятия зависимости к гнездам Г1Г3 подключите звуковой генератор ГЗ – 34. Выходное напряжение снимите с гнезд Г2Г3, измеряя его цифровым вольтметром. Частоту входного сигнала f измените от 20 Гц до 20 кГц, поддерживая неизменной величину входного напряжения по вольтметру генератора.

9. Снимите амплитудно-частотную характеристику усилительного каскада с ОЭ с эмиттерной стабилизацией и фиксированным напряжением $U_{\text{БЭ}}$. Для этого в каскаде с ОЭ при $R_1 = 0$, $R_{\text{Н}} = 1$ кОм, $U_{\text{ВХ}} = 0,5$ В снимите зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = \varphi(f)$. Для снятия зависимости к гнездам Г1Г3 подключите звуковой генератор ГЗ – 34. Выходное напряжение снимите с гнезд Г2Г3, измеряя его цифровым вольтметром. Частоту входного сигнала f измените от 20 Гц до 20 кГц, поддерживая неизменной величину входного напряжения по вольтметру генератора.

Обработка данных эксперимента

1. По данным табл. 1 и 2 постройте семейство входных и выходных

статических характеристик транзистора. По полученным характеристикам определите h -параметры транзистора для схемы с ОК (используя рис. 9 и 10 и формулы (8)–(11)).

Используя выражения (12), рассчитайте внутренние параметры транзистора ($r_{э}$, $r_{к}$, $r_{б}$, α , β).

2. Постройте амплитудную характеристику $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ усилительного каскада с ОЭ эмиттерной стабилизацией и фиксированным напряжением «база – эмиттер». По амплитудной характеристике определите коэффициент усиления по напряжению K_U для линейной области и динамический диапазон каскада D , используя формулу (20).

3. Постройте амплитудную характеристику $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ усилительного каскада с ОК. По амплитудной характеристике определите динамический диапазон каскада. Сравните амплитудные характеристики для схем с ОЭ и ОК и сделайте выводы.

4. Используя выражения (24), (25), (28), (29), (19) и значения внутренних параметров, определите $R_{\text{вх}}$, $R_{\text{вых}}$, K_U , K_I и K_P каскада с ОК. Расчетные значения K_I и K_U сравните с экспериментальными.

5. Постройте амплитудно-частотную характеристику для схемы с ОЭ в полулогарифмическом масштабе $U_{\text{вых}} = \varphi(\lg f)$. Проанализируйте полученную зависимость. Найдите нижнюю и верхнюю граничные частоты.

Сравните измеренное значение нижней граничной частоты со значением, рассчитанным по формулы:

$$f_{\text{нч}} = \frac{1}{2\pi C_2 (R_{\text{к}} + R_{\text{н}})}.$$

Определите полосу пропускания усилителя. Сделайте соответствующие выводы. Найдите коэффициент частотных искажений M для заданной частоты, пользуясь выражением (22) (рассчитайте на частоте 100 кГц).

6. Постройте амплитудно-частотную характеристику для схемы с ОК в полулогарифмическом масштабе $U_{\text{вых}} = \varphi(\lg f)$. Проанализируйте полученную зависимость. Найдите нижнюю и верхнюю граничные частоты. По частотной характеристике усилительного каскада определите ее рабочий диапазон по частоте, т. е. область частот, в которой изменения коэффициента усиления не превосходят 3 дБ (полосу пропускания), и

рассчитайте коэффициент частотных искажений по формуле (22) (рассчитайте на частоте 100 кГц).

Используя результаты работы, проведите сравнительный анализ схем включения ОЭ и ОК.

Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) исходные данные для расчета;
- 3) принципиальную схему лабораторной установки;
- 4) таблицы экспериментальных и расчетных данных;
- 5) графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчета;
- б) краткие выводы по результатам расчета и эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Поясните работу транзистора.
2. Дайте сравнительную оценку способов включения транзистора.
3. Объясните входные и выходные характеристики транзистора.
4. Расскажите, что такое линия нагрузки. Каково ее назначение?
5. В каких режимах может работать транзистор?
6. Поясните Т-образную схему замещения транзистора.
7. Поясните систему h -параметров транзистора.
8. Объясните, как определяются h -параметры по статическим характеристикам.
10. Поясните назначение элементов, входящих в схему усилительного каскада, и принцип действия каскада с ОЭ.
11. Расскажите, как осуществляется стабилизация режима покоя в каскаде с ОЭ.
12. Поясните принцип действия каскада с ОК. Почему каскад с ОК не дает усиления по напряжению?
13. Поясните амплитудную характеристику усилительного каскада.
14. Нарисуйте принципиальную схему усилителя и объясните назначение элементов.

15. Нарисуйте амплитудно-частотную характеристику исследуемого в работе каскада и поясните ее поведение в области низких и высоких частот.

16. Нарисуйте схему эмиттерного повторителя и поясните ее назначение.

17. Расскажите, чем обусловлено высокое входное сопротивление схемы с ОК.

18. Объясните, почему усилительный каскад с ОК имеет широкую полосу пропускания.

19. Объясните принцип работы биполярного транзистора.

20. Нарисуйте схемы включения транзистора.

21. Объясните входные и выходные характеристики транзистора.

22. Объясните отличие динамического режима работы транзистора от статического.

23. Расскажите, что такое коэффициенты передачи по току α и β .

24. Поясните систему h -параметров транзистора.

25. Как определить h -параметры по статическим характеристикам транзистора?

26. Поясните назначение элементов, входящих в схему усилительного каскада с ОК.

27. Поясните принцип действия каскада с ОК. Почему каскад с ОК не дает усиления по напряжению?

28. Нарисуйте АЧХ исследуемого в работе каскада и поясните ее поведение в области НЧ и ВЧ.

29. Поясните амплитудную характеристику усилительного каскада.

30. Расскажите, почему усилительный каскад с ОК имеет широкую полосу пропускания.