

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение характеристик, параметров и режимов работы усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

2.1. Изучить темы курса «Усилители электрических сигналов», «Принцип построения усилительных каскадов», «Принцип действия усилительного каскада», «Способы задания положения рабочей точки», «Стабилизация положения рабочей точки усилительного элемента», «Классы усиления», быть готовым ответить на все контрольные вопросы.

2.2. Пользуясь принципиальными схемами, приведенными в программе работы подготовить схемы для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе.

2.3. Выполнить пункты программы работы 4.1-4.5.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Усилительный каскад на биполярном транзисторе по схеме ОЭ

Принципиальная схема усилительного каскада приведена на рис. 3.1. В основе принципа действия каскада лежит преобразование энергии источника питания в энергию переменного выходного сигнала за счет изменения выходного тока усилительного элемента (УЭ) по закону, задаваемому источником входного сигнала.

Функцию усилительного элемента в каскаде выполняет транзистор VT , работающий в активном режиме.

Резистор R_k задает динамический режим работы УЭ. При отсутствии R_k невозможно изменение напряжения на выходе каскада, даже при создании всех необходимых условий.

Резисторы $R_{б1}$ и $R_{б2}$ образуют резистивный делитель, задающий режим покоя (режим по постоянному току) каскада. Поскольку биполярный транзистор управляется током, ток покоя коллектора $I_{0к}$ создается заданием тока покоя базы $I_{0б}$ соответствующей величины.

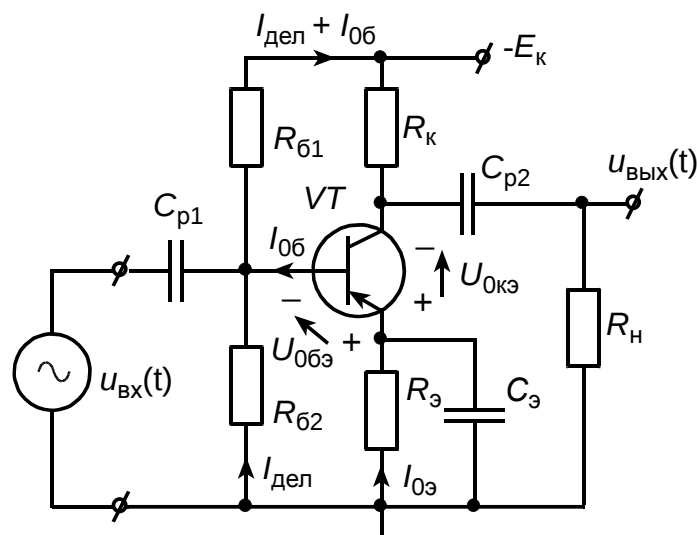


Рис. 3.1. Усилительный каскад по схеме ОЭ

Конденсаторы C_{p1} и C_{p2} исключают протекание постоянного тока от цепей транзистора в нагрузку и в источник входного сигнала.

Элементы $R_эC_э$ составляют цепь термостабилизации положения рабочей точки УЭ и служат для создания последовательной отрицательной обратной связи по постоянному току и устранения такой связи по переменному току.

$E_к$ – источник питания каскада и источник питания цепи смещения ($R_{б1}$, $R_{б2}$).

$R_н$ – нагрузка каскада.

Построение нагрузочных прямых усилительного каскада

Различают два режима работы усилительного каскада: режим покоя или режим по постоянному току и динамический режим или режим по переменному току. В режиме покоя входной сигнал отсутствует (источник входного сигнала закорочен), в цепях усилительного элемента протекают постоянные токи (постоянные составляющие), при этом конденсаторы заменяются разрывами. Величина постоянных составляющих определяется заданным классом усиления. В режиме по переменному току под действием входного переменного сигнала токи и напряжения УЭ приобретают переменные составляющие, которые накладываются на постоянные составляющие, при этом конденсаторы и источник питания представляются коротками.

Определение величин постоянных и переменных составляющих токов и напряжений в усилительном каскаде осуществляется графо-аналитическим методом с использованием статических вольт-амперных

характеристик транзистора и нагрузочных прямых по переменному и постоянному току. Нагрузочные прямые представляют собой траекторию движения рабочей точки УЭ в усилительном каскаде, однозначно связывая выходные ток и напряжение УЭ.

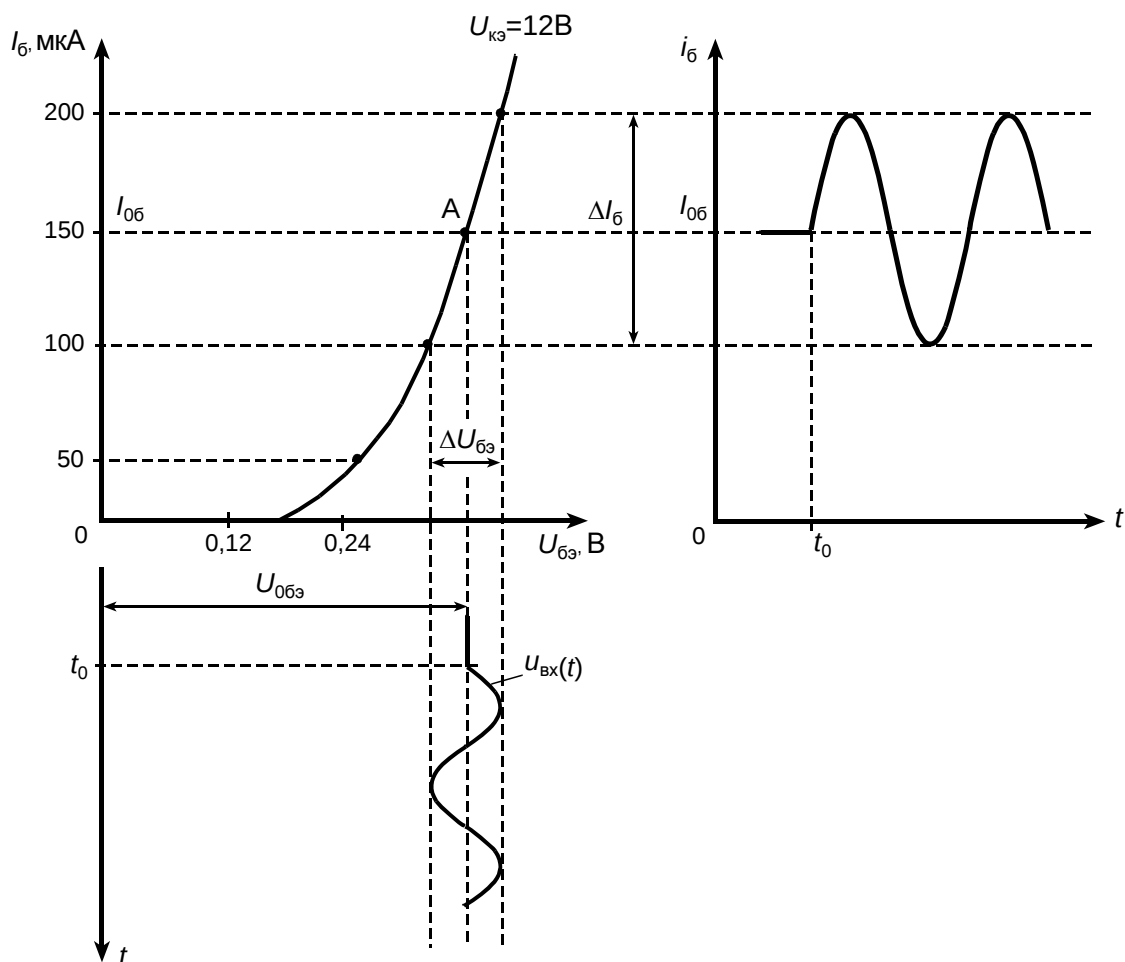


Рис. 3.2. Задание рабочей точки транзистора и определение переменных составляющих базового тока и напряжения по входной ВАХ

В режиме покоя рабочая точка (точка покоя) во входной (базовой) цепи транзистора задается в соответствии с классом усиления на входной статической вольт-амперной характеристике (ВАХ). В классе усиления *A* рабочая точка должна находиться на середине линейного участка входной характеристики транзистора для усиления сигнала с минимальными искажениями. В этом случае при подаче входного переменного сигнала, например, синусоиды, формируется ток базы, практически повторяющий по форме входное напряжение (рис. 3.2). Координаты рабочей точки на входной ВАХ – (U_{0b3}, I_{0b}) .

Расчет параметров режима покоя для выходной (коллекторной) цепи производится на выходных статических вольт-амперных характеристиках при построении нагрузочной прямой (линии) по постоянному току. Выражение для выходной цепи каскада, составленное по второму закону Кирхгофа является уравнением нагрузочной прямой по постоянному току:

$$E_{\text{к}} \cong I_{\text{к}}(R_{\text{к}} + R_{\text{э}}) + U_{\text{кэ}}.$$

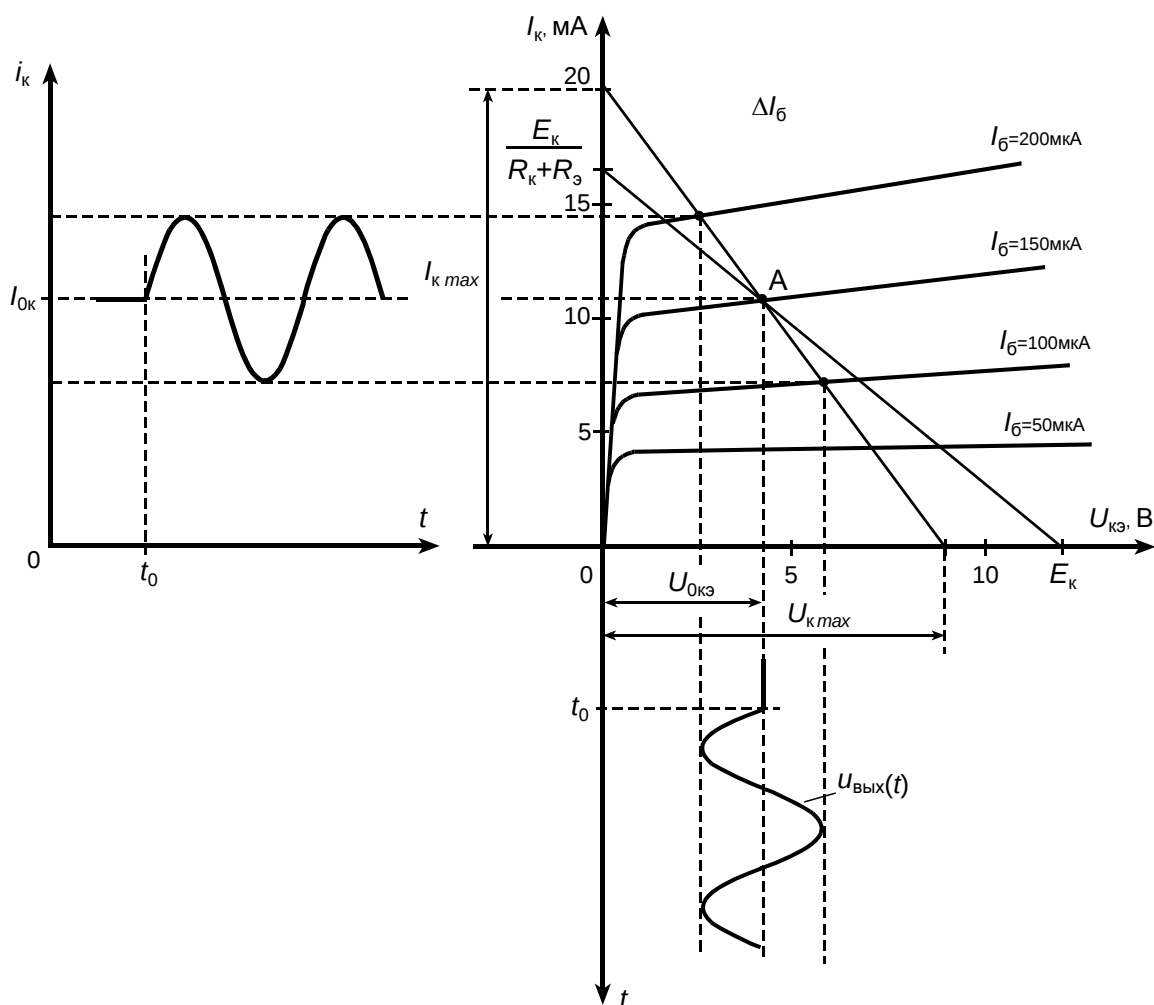


Рис. 3.3. Построение нагрузочных прямых и определение переменных составляющих коллекторного тока и напряжения

В соответствии с полученным уравнением нагрузочная прямая строится на выходных характеристиках по двум точкам: 1) $U_{\text{кэ}} = 0$, $I_{\text{к}} = E_{\text{к}}/(R_{\text{к}} + R_{\text{э}})$; 2) $I_{\text{к}} = 0$, $U_{\text{кэ}} = E_{\text{к}}$. Точка покоя транзистора с координатами $(U_{0\text{кэ}}, I_{0\text{к}})$ является точкой пересечения (на рисунке точка А) нагрузочной прямой постоянного тока и вольт-амперной характеристики, соответствующей

значению базового тока, например $I_{б2} = I_{б6}$, заданному на входной характеристике. Поскольку транзистор работает в активном режиме, токи коллектора и базы связаны соотношением:

$$I_{0к} = I_{0б} \cdot \beta_0,$$

где β_0 – статический коэффициент передачи тока базы; используется при расчетах на постоянном токе.

Размах переменных составляющих коллекторного тока и выходного напряжения определяется с помощью нагрузочной прямой переменного тока, которая также строится на выходных статических характеристиках транзистора (рис.3.3). Данная прямая проходит через предварительно заданную точку покоя A . Уравнение нагрузочной прямой по переменному току имеет вид:

$$u_{кэ}(t) = E_k - I_{0к}(R_k + R_{н\sim}) - \Delta i_k(t)R_{н\sim} = U_{0кэ} - \Delta i_k(t)R_{н\sim},$$

где $\Delta i_k(t) = I_{mk} R_{н\sim} \sin \omega t$ – переменная составляющая коллекторного тока при входном гармоническом сигнале;

I_{mk} – амплитуда переменной составляющей коллекторного тока;

$R_{н\sim} = R_k \parallel R_n$ – сопротивление нагрузки по переменному току; определяется в режиме по переменному току.

Нагрузочная прямая переменного тока строится по двум точкам:

1) точка покоя A ;

2) $I_{к max} = I_{0к} + \frac{U_{0кэ}}{R_{н\sim}}$ (при $u_{кэ}(t) = 0$,

т.е. в отсутствии переменной составляющей напряжения) либо $U_{кэ max} = U_{0кэ} + I_{0к} R_{н\sim}$ (при $\Delta i_k(t) = 0$, т.е. при отсутствии переменной составляющей тока).

Таким образом, нагрузочная прямая переменного тока «привязана» к точке покоя A , и при изменении ее положения прямая переносится в новую точку покоя параллельно самой себе. Максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку каскадом обеспечивается в положении, при котором точка покоя A располагается на середине нагрузочной прямой переменного тока.

Кроме переменной составляющей тока коллектора нагрузочная прямая переменного тока позволяет определить амплитуду выходного напряжения, равную амплитуде переменной составляющей коллекторного напряжения.

4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Внести изменения модель биполярного транзистора BC639:

а) дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по изображению транзистора на макетном поле. В открывшемся окне выбрать вкладку **Value**. Нажать кнопку **Edit model**;

б) установите значения параметров: $BF = 14 - 20$; $ISC = 4 \text{ мкА}$.

в) для сохранения изменений нажмите кнопку **Change component**.

Примечание: теперь используемая модель не является моделью транзистора BC639. На схеме наименование транзистора помечено звездочкой. Дальнейшие действия проводить с измененной моделью транзистора.

4.2. Собрать схему с ОЭ (рис. 4.1) для снятия статических характеристик. Снять входную характеристику $I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}})$ при напряжении $U_{\text{кэ}} = 12\text{В}$. Построить полученную характеристику.

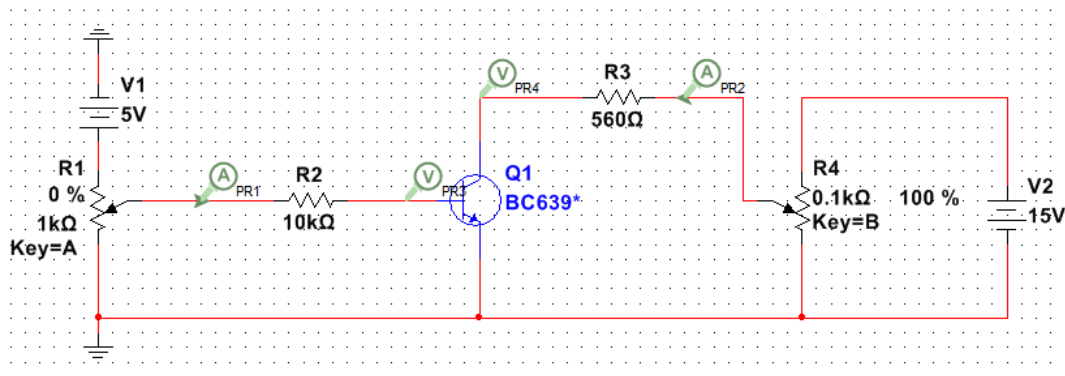


Рис. 4.1. Схема для снятия ВАХ транзистора

4.3. С помощью характериографа (**IV analyzer**) получить семейство выходных характеристик $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}})$ при токах базы $I_{\text{б}}$: 1) 50 мкА; 2) 100 мкА; 3) 150 мкА; 4) 200 мкА. Построить полученные зависимости.

4.4. Собрать схему (рис. 4.2) для измерения обратного тока коллектора.

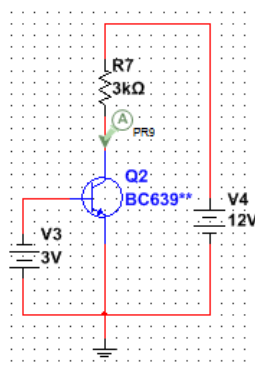


Рис. 4.2. Схема для измерения обратного тока коллектора

4.5. Рассчитать типовой резистивно-емкостной усилительный каскад (рис. 4.3), работающий в режиме усиления A , при $E_k = 12\text{ В}$, $R_k = 3\text{ кОм}$, $R_s = 300\text{ Ом}$, $R_n = 10\text{ кОм}$, $f_{\text{нгр}} = 500\text{ Гц}$, $f_{\text{вгр}} = 50\text{ кГц}$.

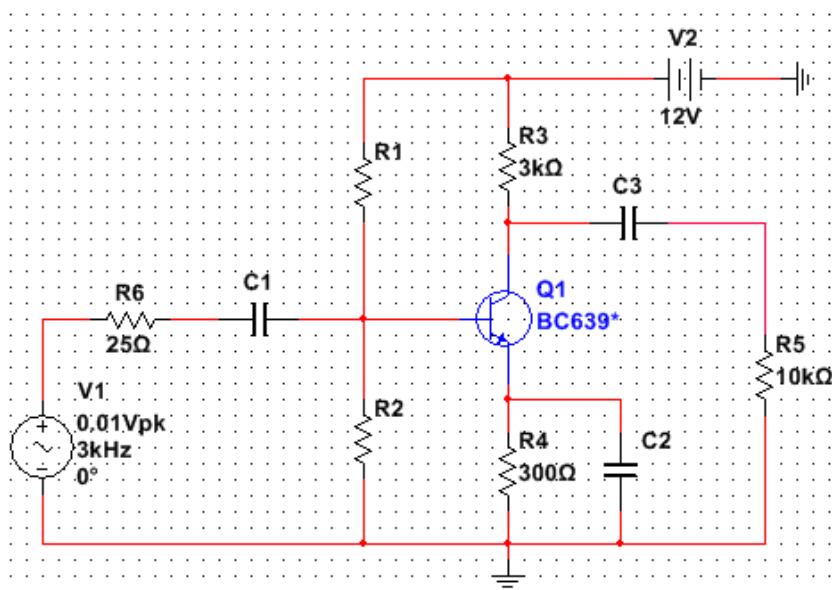


Рис. 4.3. Схема усилительного каскада ОЭ

Используя экспериментально полученные вольт-амперные характеристики транзистора, построить на выходных статических характеристиках нагрузочные прямые по постоянному и переменному току.

В результате расчета определяются:

- координаты положения рабочей точки на входных ($U_{0бэ}$, $I_{0б}$) и выходных ($U_{0кэ}$, $I_{0к}$) статических характеристиках;
- амплитуду напряжения на нагрузке $U_{m\text{ вых}}$ и тока $I_{m\text{ вых}}$, максимально возможную выходную мощность $P_{\text{вых max}}$, которые обеспечивает каскад в заданной нагрузке без искажений;
- максимальный $I_{k\text{ max}}$ и минимальный $I_{k\text{ min}}$ токи транзистора;
- сопротивления резисторов базового делителя $R_{б1}$ и $R_{б2}$;
- емкости конденсаторов C_{p1} , C_{p2} , $C_э$;
- входное сопротивление каскада $R_{вх}$;
- коэффициенты усиления по напряжению K_U , току K_I и мощности K_P .

4.6. Собрать схему усилительного каскада с ОЭ (рис. 4.3).

4.7. Исследование усилительного каскада на постоянном токе (в исходном состоянии).

Вход усилительного каскада соединить проводником с общей точкой «землей» схемы.

Измерить с помощью осциллографа (вольтметра и амперметра) токи базы $I_{0б}$ и коллектора $I_{0к}$ транзистора и напряжения E_k , $U_{0кэ}$, $U_{0бэ}$, $U_{0Rк}$, $U_{0Rн}$, U_{0R61} , U_{0R62} и на конденсаторах C_{p1} , C_{p2} , C_3 .

Рассчитать статический коэффициент передачи тока транзистора β_0 .

Сравнить результаты проведённых измерений и предварительных расчётов. Если отличие составляет более 10% следует проверить схему каскада и результаты графо-аналитического расчёта, в противном случае можно приступить к выполнению следующего пункта.

4.8. Исследовать усилительный каскад ОЭ на переменном токе:

- убрать закоротку на входе каскада;
- подключить сигнальный провод первого канала осциллографа к входу усилительного каскада. Вторым канал осциллографа подключить к коллектору транзистора. Наблюдая изображение на экране осциллографа, убедиться в нормальной (без искажений) работе каскада. При необходимости скорректировать величину входного напряжения каскада;

- снять попарно, фазировав, следующие осциллограммы: $u_{вх}(t)$, $u_{вых}(t)$, $u_{кэ}(t)$, $u_{Cp1}(t)$, $u_{Cp2}(t)$, $u_{C3}(t)$, $u_{6э}(t)$, $u_{R61}(t)$, $u_{R62}(t)$, $u_{R3}(t)$, $u_{Rк}(t)$;

- измерить с помощью измерительных приборов необходимые параметры для расчёта входного сопротивления каскада $R_{вх}$, коэффициентов усиления по току K_I , напряжению K_U и мощности K_P ; сравнить полученные данные с предварительными расчётами, сделать выводы;

- повторить предыдущий пункт, удалив конденсатор C_3 из схемы. Оценить влияние последовательной отрицательной обратной связи по току на параметры усилительного каскада;

- вернуть конденсатор на место. Последовательно меняя сопротивление нагрузки каскада ($R_n = \infty$; 30к; 24к; 20к; 15к; 10к; 7,5к; 5,1к; 3к; 1к; 560, 300), измерять соответствующее выходное напряжение, фиксируя результат. Сделав необходимые расчёты, построить нагрузочную характеристику $U_{вых} = f(I_n)$. Рассчитать выходное сопротивление каскада;

- установить сопротивление нагрузки $R_n = 10к$. Снять амплитудно-частотную характеристику каскада (15-20 точек) в диапазоне изменения частоты входного сигнала от 20 Гц до 200 кГц. Рассчитать коэффициенты частотных искажений на граничных частотах, сравнить полученные результаты с расчётными, сделать выводы.

– снять с помощью цифрового вольтметра амплитудную характеристику $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ усилителя, изменяя амплитуду входного сигнала от 0 до 3 В (10-15 точек). Наблюдая выходной сигнал на экране осциллографа, зафиксировать значения входного и выходного напряжений, при которых начинают проявляться нелинейные искажения выходного сигнала. Определить динамический диапазон усилителя.

5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА RC-УСИЛИТЕЛЯ (ОЭ)

Исходные данные:

- а) усилительный элемент (УЭ) – модифицированный транзистор BC639 (*n-p-n*);
- б) напряжение питания $E_k = 12\text{В}$;
- в) амплитуда выходного напряжения $U_{m \text{ вых}} = 1,1\text{В}$;
- г) сопротивление нагрузки $R_n = 10 \text{ кОм}$;
- д) коллекторное сопротивление $R_k = 3 \text{ кОм}$;
- е) сопротивление в эмиттерной цепи $R_3 = 300 \text{ Ом}$;
- ж) нижняя граничная частота усилителя $f_{н \text{ гр}} = 500 \text{ Гц}$;
- з) верхняя граничная частота усилителя $f_{в \text{ гр}} = 50 \text{ кГц}$;
- и) коэффициенты частотных искажений каскада на нижней и верхней граничных частотах $M_n = M_v = 3 \text{ дБ}$;
- к) температура окружающей среды $t^\circ = (10-30)^\circ\text{C}$;
- л) внутреннее сопротивление источника сигнала $R_r \approx 250 \text{ Ом}$.

В результате расчета должны быть определены:

- сопротивление нагрузки УЭ по постоянному току;
- сопротивление нагрузки УЭ по переменному току;
- амплитуда тока $I_{m \text{ вых}}$ в нагрузке каскада;
- максимально возможная выходная мощность $P_{\text{max вых}}$, которую обеспечивает каскад на заданной нагрузке без заметных искажений сигнала;
- амплитуда переменной составляющей тока коллектора транзистора I_{mk} ;
- координаты положения рабочей точки транзистора на выходных ($U_{0кз}$, $I_{0к}$) и входных ($U_{0бз}$, $I_{0б}$) статических характеристиках;
- максимальный $I_{k \text{ max}}$ и минимальный $I_{k \text{ min}}$ токи транзистора;
- сопротивления резисторов базового делителя $R_{б1}$ и $R_{б2}$;
- емкости конденсаторов C_{p1} , C_{p2} , C_3 ;

- требования, предъявляемые к частотным свойствам усилительного элемента (УЭ);
- коэффициенты усиления каскада по напряжению K_U , току K_I и мощности K_P .

Порядок расчета

- 1) сопротивление нагрузки по постоянному току:

$$R_{H\approx} = R_K + R_{\text{э}};$$

- 2) построение нагрузочной прямой по постоянному току:

прямая строится на выходных статических характеристиках по двум точкам: а) $U_{KЭ} = 0; I_{KЭ} = E_K/R_{H\approx}$; б) $U_{KЭ} = E_K; I_K = 0$;

- 3) сопротивление нагрузки каскада по переменному току:

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

- 4) амплитуда тока нагрузки:

$$I_{m \text{ Вых}} = \frac{U_{m \text{ Вых}}}{R_H};$$

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

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

- 6) амплитуда переменной составляющей коллекторного тока:

$$I_{mK} = \frac{U_{m \text{ Вых}}}{R_{H\sim}};$$

- 7) требования к положению рабочей точки:

ток покоя коллектора: $I_{0K} \geq I_{mK} + [\beta + (1,5 \div 10)] \cdot I_{K0 \text{ max}}$,

напряжение покоя коллектора: $U_{0KЭ} \geq (1,2 \div 3) \cdot U_{K \text{ нас}} + U_{m \text{ Вых}}$,

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

$U_{к \text{ нас}}$ – напряжение насыщения транзистора;

8) определяем координаты рабочей точки A в режиме покоя:

координаты ($U_{0кэ}$, $I_{0к}$) определяются в соответствии требованиями к точке покоя на нагрузочной прямой постоянного тока;

9) координаты рабочей точки на входной характеристике транзистора:

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

где β_0 – статический коэффициент усиления транзистора по току в схеме ОЭ, определяемый в точке пересечения нагрузочной прямой постоянного тока с выходной характеристикой;

10) построение нагрузочной прямой по переменному току:

прямая строится на выходных характеристиках и проходит по через две

точки: а) точка покоя A ; б) $I_{к \max} = I_{0к} + \frac{U_{0кэ}}{R_{н\sim}}$ либо $U_{кэ \max} = U_{0кэ} + I_{0к} \cdot R_{н\sim}$;

11) максимальный и минимальный токи транзистора:

$$I_{к \max} = I_{0к} + I_{мк}, \quad I_{к \min} = I_{0к} - I_{мк};$$

12) сопротивление резисторов базового делителя:

$$R_{б1} = \frac{E_k - U_{0бэ} - U_{0Rэ}}{I_{дел} + I_{0б}}, \quad R_{б2} = \frac{U_{0бэ} + U_{0Rэ}}{I_{дел}}, \quad U_{0Rэ} = I_{0э} \cdot R_э = (\beta_0 + 1) \cdot I_{0б},$$

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

$$I_{дел} = (2 \div 5) \cdot I_{0б} - \text{ток делителя;}$$

13) входное сопротивление каскада: $R_{вх} = R_{б1} \parallel R_{б2}$,

где $R_{б} = R_{б1} \parallel R_{б2}$ – параллельное соединение резисторов базового делителя,

$$r_{\text{вх} \text{ э}} = h_{11 \text{ э}} = \left. \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta I_{\text{б}}} \right|_{U_{\text{кз}} = \text{const}} \quad - \text{входное (динамическое) сопротивление}$$

ление транзистора в схеме с общим эмиттером, определяемое по входной статической ВАХ в окрестностях рабочей точки;

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

$$C_{\text{п1}} \geq \frac{1}{\omega_{\text{н}} \cdot (R_{\text{г}} + R_{\text{вх}}) \cdot \sqrt{M_{\text{н1}}^2 - 1}}, \quad C_{\text{э}} \geq \frac{1}{\omega_{\text{н}} \cdot R_{\Sigma} \cdot \sqrt{M_{\text{н2}}^2 - 1}},$$

$$C_{\text{п2}} \geq \frac{1}{\omega_{\text{н}} \cdot (R_{\text{вых}} + R_{\text{н}}) \cdot \sqrt{M_{\text{н3}}^2 - 1}},$$

где: $M_{\text{н}} = M_{\text{н1}} \cdot M_{\text{н2}} \cdot M_{\text{н3}} = \frac{K_{U0}}{K_{U\text{н}}}$ – коэффициент частотных искажений усилительного каскада на нижней граничной частоте, $M_{\text{н, дБ}} = 20 \cdot \lg(M_{\text{н}})$;

$M_{\text{н1}}, M_{\text{н2}}, M_{\text{н3}}$ – коэффициенты частотных искажений усилительного каскада на нижней граничной частоте, обусловленные влиянием конденсаторов $C_{\text{п1}}, C_{\text{э}}, C_{\text{п2}}$, соответственно. При предварительных расчетах принимают $M_{\text{н1}} = M_{\text{н2}} = M_{\text{н3}} = \sqrt[3]{M_{\text{н}}}$;

$K_{U0}, K_{U\text{н}}$ – коэффициенты усиления каскада в области средних частот и на нижней граничной частоте, соответственно;

$\omega_{\text{н}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{н}}$ – нижняя граничная частота усилителя (угловая);

$R_{\text{вых}} \cong R_{\text{к}}$ – выходное сопротивление каскада с общим эмиттером;

$R_{\Sigma} = \frac{(R_{\text{г}} \parallel R_{\text{б}}) + r_{\text{вх} \text{ э}}}{\beta + 1}$ – выходное сопротивление транзистора со стороны эмиттера;

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

$$f_{\beta} \geq \frac{\omega_B}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{M_{B1}^2 - 1}}, \quad C_{K(\Theta)} \leq \frac{\sqrt{M_{B2}^2 - 1}}{\omega_B \cdot (r_{K(\Theta)} \| R_{H\sim})} - C_H,$$

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

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

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

f_{β} – граничная частота транзистора в схеме ОЭ (справочный параметр);

$$r_{K(\Theta)} \cong \frac{1}{h_{22\Theta}} = \frac{\Delta U_{K\Theta}}{\Delta I_K} \bigg|_{I_0 = \text{const}} \quad \text{– динамическое (дифференциальное)}$$

сопротивление обратносмещенного коллекторного перехода в схеме ОЭ;

16) коэффициенты усиления усилителя:

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \beta \cdot \frac{r_{K(\Theta)} \| R_{H\sim}}{r_{\text{ВХ } \Theta}} \quad \text{– коэффициент усиления по напряже-}$$

нию;

$$K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \beta \cdot \frac{R_{\text{ВХ}}}{r_{\text{ВХ } \Theta}} \cdot \frac{(r_{K(\Theta)} \| R_{H\sim})}{R_H} \quad \text{– коэффициент усиления по току;}$$

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

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1. Цель работы.

6.2. Программа работы (кратко, без подробного описания действий).

6.3. Результаты выполнения каждого пункта программы (при необходимости):

- принципиальные схемы исследуемых цепей (устройств);
- результаты измерений, сведенные в таблицы;
- сфазированные осциллограммы с указанием характерных параметров для всех сигналов;
- характеристики, построенные по экспериментальным данным;
- расчеты параметров, выполненные с использованием полученных характеристик;
- сравнение результатов графо-аналитического расчёта и экспериментальных данных, расчёт погрешностей;

6.4. Выводы (приводятся либо в конце каждого пункта по ходу выполнения, либо в конце работы).

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Приведите схему замещения биполярного транзистора в физических параметрах для схемы ОЭ (ОБ). Объясните физический смысл всех элементов, входящих в схему. Как определить значения всех элементов, входящих в схему, и какова их приблизительная величина? Как изменится эта схема на нижних и верхних частотах?

7.2. Сравните каскады ОЭ, ОК и ОБ по основным показателям. В каких случаях целесообразно использование той или иной схемы?

7.3. Каково назначение всех элементов в схеме типового усилительного каскада?

7.4. Поясните принцип действия усилительного каскада на биполярном транзисторе по схеме ОЭ. Приведите сфазированные диаграммы токов и напряжений в следующем усилительном каскаде ОЭ: $u_{\text{вх}}(t)$, $u_{\text{с1}}(t)$, $u_{\text{бэ}}(t)$, $i_{\text{к}}(t)$, $u_{\text{кэ}}(t)$, $u_{\text{вых}}(t)$.

7.5. Перечислите классы усиления, в которых может работать усилительный элемент. Каким образом обеспечивается требуемый режим усиления? В каких случаях используется тот или иной класс?

7.6. Расскажите об известных способах задания рабочей точки транзистору. Какой из них, по Вашему мнению, предпочтительнее? Обоснуйте ответ.

7.7. Какая из схем включения биполярного транзистора обладает наибольшей стабильностью положения рабочей точки? Почему?

7.8. Приведите полную схему замещения типового усилительного каскада ОЭ на переменном токе. Поясните физический смысл всех элементов в схеме.

7.9. Для схемы замещения усилительного каскада ОЭ на нижних частотах, объясните как влияют на коэффициент усиления навесные конденсаторы (C_{p1} , $C_э$, C_{p2}). Почему?

7.10. Поясните, как осуществляется построение нагрузочных прямых по постоянному и переменному току для каскада ОЭ. Как с помощью этих характеристик определить величину выходного сигнала при заданном изменении базового тока?

7.11. Приведите схему замещения усилительного каскада ОЭ на средних частотах. Получите выражения для расчета параметров (по указанию преподавателя) K_U , K_I , K_P , $R_{вх}$, $R_{вых}$.

7.12. Каким параметром оцениваются нелинейные искажения в усилителе? Чем эти искажения обусловлены?

7.13. Чем обусловлены линейные искажения в усилителе? Какими параметрами они оцениваются? Приведите типовой вид амплитудно-частотной характеристики резистивно-емкостного усилительного каскада и поясните ход указанной зависимости.

7.14. По каким критериям производится выбор конкретного транзистора в качестве усилительного элемента каскада?

7.15. Что такое «электронный усилитель»? Чем он отличается от повышающего трансформатора?