

Лабораторная работа № 5

Исследование усилительных каскадов на биполярных транзисторах в схемах с общей базой и общим коллектором

Цель работы – изучение усилительных каскадов на биполярном транзисторе с различными схемами включения транзистора (с общей базой и общим коллектором); расчёт усилительных каскадов и определение их параметров и характеристик.

5.1. Краткие теоретические сведения

В современной технике при решении многих инженерных задач возникает необходимость в усилении изменяющихся электрических сигналов (напряжения или тока), источниками которых могут быть, например, различного рода датчики, фотоприёмники и т.п. Для усиления таких сигналов используют электронные усилители.

Электронным усилителем называют устройство, преобразующее электрическую энергию источника питания в энергию выходного сигнала, который по форме аналогичен входному сигналу, но превосходит его по мощности (напряжению и/или току). Другими словами, любой усилитель модулирует энергию внешнего источника питания входным управляющим сигналом. Этот процесс осуществляется при помощи управляемых нелинейных элементов.

Рассмотрим принцип построения и работы усилительного каскада на структурной схеме, представленной на рис. 5.1. Основными элементами здесь являются нелинейный управляемый элемент $УЭ$ и сопротивление R , которые совместно с источником питания U_{Π} образуют выходную цепь каскада.

Под действием входного сигнала $u_{ВХ}$ изменяется сопротивление $УЭ$ и соответственно ток выходной цепи $i_{ВЫХ}$. Изменение $i_{ВЫХ}$ вызывает соответствующие изменения падений напряжений на сопротивлении R и $УЭ$, причём падение напряжения на $УЭ$ является выходным сигналом $u_{ВЫХ}$. Таким образом $u_{ВХ}$ преобразуется в пропорциональное значение $u_{ВЫХ}$ большей величины.

Усилительные свойства каскада зависят от степени влияния $u_{ВХ}$ на ток управляемого элемента и величины R . Чем больше изменение тока и величина R , тем больше будет $u_{ВЫХ}$. Очевидно, что рост амплитуды $U_{m\ ВЫХ}$ требует соответствующего повышения U_{Π} , а ток источника равен $i_{ВЫХ}$. Поэтому повышение мощности выходного сигнала требует увеличения мощности источника.

Необходимо помнить, что ни при каких условиях мощность выходного сигнала не может превысить мощность, потребляемую от источника питания!

К основным параметрам и характеристикам усилителя относятся:

– коэффициент усиления усилителя по напряжению

$$K_U = \Delta u_{ВЫХ} / \Delta u_{ВХ}, \quad (5.1)$$

где $\Delta u_{ВЫХ}$ – изменение выходного напряжения, соответствующее изменению входного напряжения $\Delta u_{ВХ}$;

– сквозной коэффициент усиления усилителя по напряжению

$$K_E = \Delta u_{ВЫХ} / \Delta e_{Г},$$

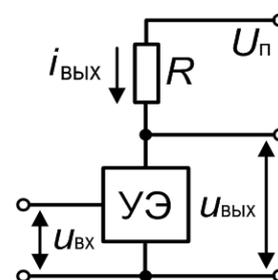


Рис. 5.1 Структурная схема усилительного каскада

где Δe_{Γ} – изменение напряжения источника сигнала, которому соответствует изменение выходного напряжения $\Delta u_{\text{ВЫХ.}}$;

– коэффициент усиления усилителя по току

$$K_I = \Delta i_{\text{ВЫХ.}} / \Delta i_{\text{ВХ.}},$$

где $\Delta i_{\text{ВЫХ.}}$ – изменение выходного тока, соответствующее изменению входного тока $\Delta i_{\text{ВХ.}}$;

– коэффициент усиления усилителя по мощности

$$K_P = K_U K_I; \quad (5.2)$$

– коэффициент полезного действия

$$\eta = (P_H / P_{\text{ИСТ.}}) \times 100\%, \quad (5.3)$$

где $P_H = \frac{U_{\text{мН}} I_{\text{мН}}}{2} = \frac{U_{\text{мН}}^2}{2R_H} = \frac{I_{\text{мН}}^2 R_H}{2}$ – мощность, выделяющаяся в нагрузке сопротивлением R_H , $P_{\text{ИСТ.}}$ – мощность, развиваемая источником питания;

– амплитудная (передаточная) характеристика – зависимость амплитудных значений

напряжения $U_{\text{м ВЫХ.}}$ (тока $I_{\text{м ВЫХ.}}$) на выходе усилителя от напряжения $U_{\text{м ВХ.}}$ (тока $I_{\text{м ВХ.}}$) на его входе (рис. 5.2а). Начальный участок характеристики (до $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ max}}$) является линейным, и ему соответствует постоянный коэффициент усиления. При $U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ВХ max}}$ амплитудная характеристика становится нелинейной. Нелинейность амплитудной характеристики обусловлена переходом УЭ в режим насыщения. В этом режиме коэффициент усиления K_U уменьшается, что приводит к уменьшению наклона характеристики. Вследствие нелинейности амплитудной характеристики в выходном сигнале появляются гармонические составляющие, отсутствующие во входном, в результате чего выходной сигнал искажается, т.е. форма выходного сигнала не соответствует форме входного. Такие искажения выходного сигнала называют *нелинейными искажениями*;

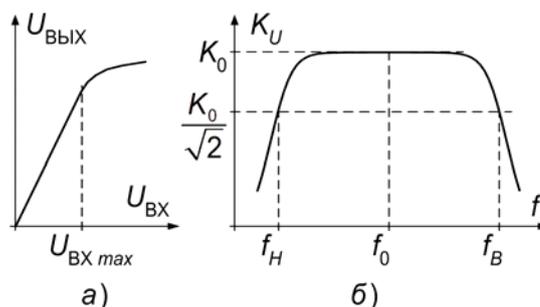


Рис. 5.2 Характеристики усилителя: а – амплитудная; б – амплитудно-частотная

амплитудная; б – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость модуля коэффициента усиления K_U от частоты усиливаемого сигнала (рис. 5.2б). По амплитудно-частотной характеристике определяется

– полоса пропускания усилителя, т.е. диапазон усиливаемых частот

$$\Delta f = f_B - f_H, \quad (5.4)$$

в пределах которого коэффициент усиления $K_U > K_0 / \sqrt{2}$, где K_0 – максимальный коэффициент усиления на частоте

$$f_0 = \sqrt{f_H \cdot f_B}, \quad (5.5)$$

f_H и f_B – соответственно низшая и высшая частоты, на которых $K_U = K_0 / \sqrt{2}$.

Уменьшение K_U на низких частотах обусловлено влиянием разделительных кон-

денсаторов, используемых в *усилителях* переменного напряжения для связи между каскадами. В области высших частот усилительные свойства ухудшаются в результате проявления паразитных ёмкостей в самом управляемом элементе. Из-за неравномерности АЧХ при усилении несинусоидальных сигналов (например, прямоугольных), имеющих гармонические составляющие с частотами ниже f_H и выше f_B , форма выходного сигнала будет отличаться формы входного. Такие искажения, *не связанные с нелинейностью амплитудной характеристики*, называют *частотными искажениями*.

В настоящее время в каскадах электронных усилителей различного назначения в качестве управляемого элемента широко используются биполярные и полевые транзисторы, поэтому электронные усилители с такими элементами называют транзисторными.

Усилители на биполярных транзисторах.

В зависимости от схемы включения биполярного транзистора различают усилительные каскады с *общей базой* (ОБ), *общим эмиттером* (ОЭ) и *общим коллектором* (ОК).

Схема с общей базой. На рис.5.3 представлена схема с ОБ с фиксированным напряжением покоя базы, задаваемым с помощью делителя напряжения на резисторах $R_{Б1} - R_{Б2}$. Входное напряжение

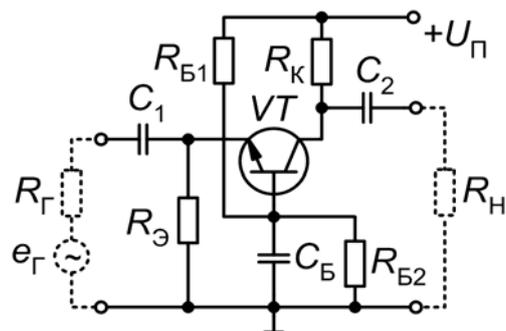


Рис. 5.3 Схема усилительного каскада с общей базой

$u_{ВХ}$ от источника усиливаемого сигнала $e_Г$ с внутренним сопротивлением $R_Г$ подаётся на усилительный каскад через конденсатор связи C_1 . Резистор $R_К$ совместно с транзистором VT образуют управляемый делитель напряжения. Резистор $R_Э$ в цепи эмиттера служит для обеспечения заданного тока покоя эмиттера. Конденсаторы связи C_1 и C_2 (иначе – разделительные) служат соответственно для предотвращения проникновения постоянной составляющей тока в цепь источника сигнала и на выход усилительного каскада. Блокировочный конденсатор $C_Б$ в цепи базы исключает действие цепи делителя напряжения $R_{Б1} - R_{Б2}$ и обеспечивает связь базового электрода с нулевым проводом в области рабочих частот. В качестве внешнего источника энергии в усилителе используется источник постоянного напряжения $U_П$ (источник питания).

Усилительный каскад по схеме с ОБ является *неинвертирующим*. Это означает, что напряжение на выходе усилительного каскада в полосе рабочих частот совпадает по фазе с входным напряжением.

Параметры усилительного каскада с ОБ в полосе рабочих частот можно рассчитать по формулам:

$$R_{ВХ} \approx R_Э \parallel h_{11Б}; \quad (5.6)$$

$$R_{ВЫХ} \approx R_К \parallel (1/h_{22Б}); \quad (5.7)$$

$$K_U \approx h_{21Б} \frac{R_{ВЫХ} \parallel R_Н}{h_{11Б}}; \quad (5.8)$$

$$K_I = \frac{\Delta i_Н}{\Delta i_{ВХ}} = K_U \frac{R_{ВХ}}{R_Н}, \quad (5.9)$$

$$K_E = K_U \frac{R_{\text{ВХ.}}}{R_{\text{ВХ.}} + R_{\Gamma}}; \quad (5.10)$$

где значения h -параметров берутся либо из справочника, либо определяется по входным и выходным ВАХ транзистора (см. Лабораторную работу № 4).

Значения ёмкостей разделительных конденсаторов рассчитываются по формулам:

$$C_1 \geq 1/(\omega_H (R_{\Gamma} + R_{\text{ВХ.}})); \quad C_2 \geq 1/(\omega_H (R_{\text{ВЫХ.}} + R_H)), \quad (5.11)$$

где $\omega_H = 2\pi f_H$ – нижняя граничная частота усиливаемого сигнала.

Значения ёмкости блокировочного конденсатора рассчитывается по формуле:

$$C_B = (10 \dots 50) / (\omega_H \cdot (R_{\text{Б1}} \parallel R_{\text{Б2}})). \quad (5.12)$$

Схема с общим коллектором. В данной схеме (рис.5.4) в отличие от схемы с ОБ (рис.5.3) резистор R_K отсутствует, а управляемый делитель напряжения образован транзистором VT и резистором $R_{\text{Э}}$. с помощью делителя напряжения на резисторах $R_{\text{Б1}} - R_{\text{Б2}}$ задаётся потенциал базы. Входной сигнал подаётся на базу транзистора VT , а выходное напряжение снимается с резистора $R_{\text{Э}}$. Поэтому в данном случае с помощью резистора $R_{\text{Э}}$, помимо ООС по постоянному току, обеспечивается и 100% ООС по переменному напряжению.

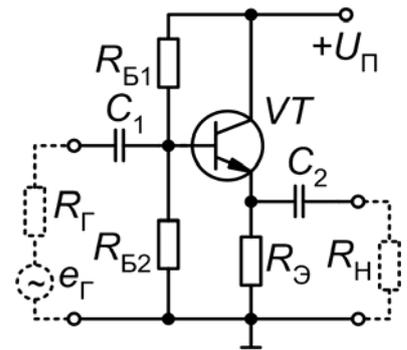


Рис. 5.4 Схема усилительного каскада с общим коллектором

Из теории обратной связи следует, что при 100% отрицательной обратной связи коэффициент усиления по напряжению

$$K_{U\text{ООС}} = \frac{K_{U0}}{1 + K_{U0}} \approx 1, \quad (5.13)$$

где K_{U0} – коэффициент усиления схемы при отсутствии обратной связи.

Таким образом, в схеме с ОК коэффициент усиления по напряжению не может превышать 1, поэтому данную схему называют *эмиттерным повторителем*.

Так же, как и схема с ОБ (рис.5.3), эмиттерный повторитель является неинвертирующим усилительным каскадом.

Ёмкости разделительных конденсаторов C_1, C_2 рассчитываются по формулам (5.11).

Параметры усилительного каскада с ОК можно рассчитать по формулам:

$$R_{\text{ВХ.}} = R_{\text{Б1}} \parallel R_{\text{Б2}} \parallel r_{\text{ВХ.}}, \quad (5.14)$$

где

$$r_{\text{ВХ.}} \approx h_{11Э} + (1 + h_{21Э})(R_{\text{Э}} \parallel R_H); \quad (5.15)$$

$$R_{\text{ВЫХ.}} \approx \left(\frac{R_{\Gamma} \parallel R_{\text{Б1}} \parallel R_{\text{Б2}} + h_{11Э}}{1 + h_{21Э}} \right) \parallel R_{\text{Э}}; \quad (5.16)$$

$$K_U \approx (h_{21Э} + 1) \frac{R_{\text{Э}} \parallel R_H}{r_{\text{ВХ.}}}, \quad (5.17)$$

здесь $r_{\text{ВХ.}}$ рассчитывается по формуле (5.15).

Коэффициенты K_E и K_I рассчитываются соответственно по формулам (5.10) и (5.9).

5.2. Порядок выполнения работы

❶ Для всех исследуемых схем используются данные, полученные в [Лабораторной работе № 4](#).

Задание 1: Исследование усилительного каскада с ОБ

- а) собрать схему (рис.5.3), установив заданное напряжение питания и рассчитанные значения номинальных сопротивлений резисторов $R_{Б1}$, $R_{Б2}$, R_K и $R_Э$ (см. [Л.р. № 4](#)); установить значение сопротивления нагрузки $R_H = (7...10)R_K$;
- б) рассчитать значения сопротивлений $R_{ВХ}$ (5.6) и $R_{ВЫХ}$ (5.7), коэффициент усиления K_U (5.8), значения ёмкостей C_1 , C_2 (5.11) и $C_Б$ (5.12), приняв значение сопротивления источника сигнала $R_Г = (0,1...0,2) \times R_{ВХ}$ (значение нижней граничной частоты f_H согласовать с преподавателем);
- в) построить динамическую линию нагрузки и оценить максимальную неискажённую амплитуду выходного напряжения $U_{ВЫХ.max}$ на нагрузке;
- г) определить $U_{ВХ.max} = U_{ВЫХ.max} / K_U$; подать на вход усилителя сигнал с амплитудой $U_{m.ВХ} = (0,3...0,5) \times U_{ВХ.max}$, и частотой $f = 10$ кГц;
- д) построить эпюры входных и выходных токов и напряжений (**Analysis/Transient...**);
- е) получить ЛАЧХ и ЛФЧХ исследуемой схемы в диапазоне частот $f = 1$ Гц...1 ГГц (**Analysis/AC...**);
- ж) выполнить пункт д), установив $U_{m.ВХ} = (3...5)U_{ВХ.max}$ и частоту $f = 10$ кГц;
- з) установить сопротивление $R_H = (0,3...0,5)R_K$, и выполнить пункты д) – е).

Задание 2: Исследование усилительного каскада с ОК

- а) собрать схему (рис.5.4), установить заданное напряжение питания; рассчитать значения номинальных сопротивлений резисторов $R_{Б1}$, $R_{Б2}$ и $R_Э$, не изменяя значений напряжений и токов исходной рабочей точки; установить значение сопротивления нагрузки $R_H = (7...10)R_Э$;
- б) рассчитать значения сопротивлений $R_{ВХ}$ (5.14) и $R_{ВЫХ}$ (5.16), коэффициент усиления K_U (5.17), значения ёмкостей C_1 , C_2 (5.11), приняв значение сопротивления источника сигнала $R_Г = (0,1...0,2) \times R_{ВХ}$ (значение нижней граничной частоты f_H согласовать с преподавателем);
- в) выполнить пункты в) – з) задания 1.

Задание 3: Обработка результатов измерений

- а) по полученным во всех случаях ЛАЧХ определить нижние f_H и верхние f_B граничные частоты (по уровню -3 дБ) и полосу пропускания Δf усилителя (5.4), определить по ЛАЧХ коэффициент усиления K_0 на частоте f_0 (5.5), сделать выводы;
- б) по полученным эпюрам входных и выходных токов и напряжений определить для каждого случая коэффициенты усиления по напряжению и току; сравнить полученные значения с теоретическими (5.8), (5.17), (5.9); сделать выводы;
- в) определить сквозные коэффициенты усиления по напряжению K_E (5.10)
- г) рассчитать коэффициенты усиления по мощности K_P (5.2) и к.п.д. усилителей (5.3).

5.3. Контрольные вопросы

1. Что такое электронный усилитель?
2. Объяснить принцип действия транзисторного усилителя. Каково назначение транзистора в усилительном каскаде?
3. Какими параметрами характеризуется усилитель?
4. Как определить полосу пропускания усилителя?
5. В чём причины появления нелинейных искажений выходного напряжения?
6. Что такое коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник) усилителя, как он рассчитывается?
7. Как зависит коэффициент нелинейных искажений усилителя от амплитуды входного гармонического сигнала?
8. Чем обусловлена неравномерность амплитудно-частотной характеристики на низких и высоких частотах?
9. Что такое коэффициент частотных искажений усилителя? Как его определить по амплитудно-частотной характеристике усилителя?
10. Какие характеристики транзисторов используются при расчёте усилителей?
11. Почему динамическая линия нагрузки всегда имеет больший наклон, чем статическая линия нагрузки?
12. Как следует выбирать исходную рабочую точку для обеспечения максимального размаха выходного напряжения при заданном напряжении питания?
13. Какие достоинства и недостатки имеют усилительные каскады с различными схемами включения биполярного транзистора?
14. Какое влияние оказывает сопротивление нагрузки на параметры усилителя?
15. Какое влияние оказывает сопротивление генератора на параметры усилителя?