

## Лекция 6

### Тема Усилительные каскады на биполярных транзисторах

#### 1.1 Питание усилителей. Подача смещения на вход активного элемента

Положение начальной рабочей точки определяется полярностью и значением напряжения смещения на входе усилительного элемента. Значения напряжения смещения на входе обычно лежат в пределах от 0,1 до 1 (меньшие значения для германиевых транзисторов, большие – для кремниевых). Ранее были рассмотрены схемы, в которых питание входной и выходной цепей транзистора осуществлялось от двух источников ( $E_B$  и  $E_K$ ). Существует ряд схем, которые позволяют осуществлять подачу напряжения смещения во входную цепь от источника питания выходной цепи ( $E_K$ ). Такие схемы называются схемами смещения фиксированным током или фиксированным напряжением. Рассмотрим их для случая, когда активным элементом является биполярный транзистор; включенный по схеме с ОЭ.

**Подача смещения фиксированным током.** В этой схеме (рисунок 10) база соединена с минусом источника  $E_K$  через резистор  $R_B$ . В режиме покоя напряжение смещения на базе

$$U_{OB} = E_K - I_{OB}R_B, \quad (11)$$

где ток  $I_{OB}$  определяют по входной статической характеристике транзистора, исходя из требуемого положения начальной рабочей точки, которое задается постоянными напряжениями смещения  $U_{OB}$  и  $U_{OK}(E_K)$ . Из (11) можно определить сопротивление резистора:

$$R_B = (E_K - U_{OB}) / I_{OB}. \quad (12)$$

Напряжение  $U_{OB} \ll E_K$ , поэтому  $R_B \approx E_K / I_{OB}$ . Отсюда следует, что при установленных значениях  $E_K$  и  $R_B$  ток базы  $I_{OB} = E_K / R_B$  останется тем же при замене транзистора или при изменении температуры и др. Значения  $R_B$  обычно составляют десятки и сотни килоОм.

Аналогично осуществляется подача смещения фиксированным током в схеме с ОБ.

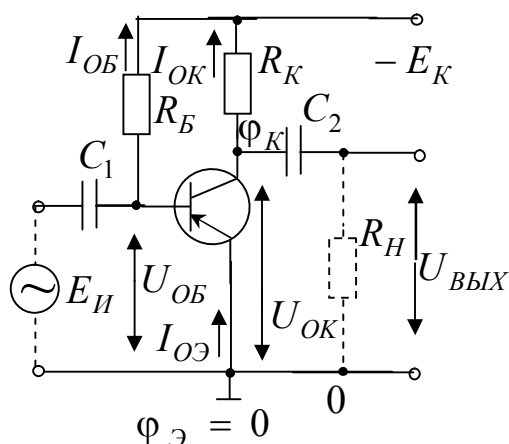


Рисунок 10 – Подача смещения фиксированным током

**Подача смещения фиксированным напряжением.** Напряжение смещения создается делителем напряжения с резисторами  $R_{Д1}$  и  $R_{Д2}$  (рисунок 11), через которые проходят токи делителя  $I_{Д1}$  и  $I_{Д2}$ . Из уравнений  $E_K = R_{Д1}I_{Д1} + R_{Д2}I_{Д2}$  можно определить сопротивления делителя:

$$R_{Д1} = (E_K - U_{ОБ}) / I_{Д1}; \quad R_{Д2} = U_{ОБ} / I_{Д2}. \quad (13)$$

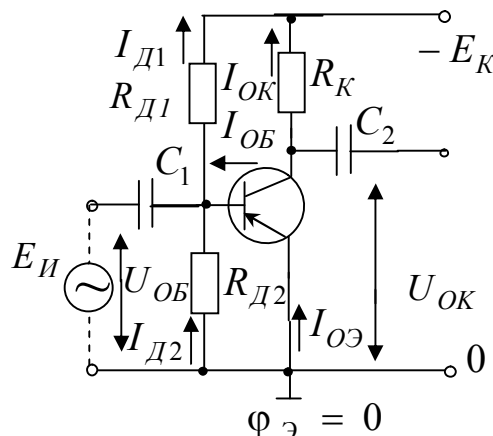


Рисунок 11 – Подача смещения фиксированным напряжением

При расчете схемы сопротивления  $R_{Д1}$  и  $R_{Д2}$  выбирают такими, чтобы токи  $I_{Д1}$  и  $I_{Д2}$ , проходящие через них, были в 3÷5 раз больше тока  $I_{ОБ}$ . В этом случае изменение тока базы  $I_{ОБ}$  не вызывает ощутимого изменения напряжения смещения, практически оно остается постоянным.

## 1.2 Схемы стабилизации положения рабочей точки

Основные свойства усилительного каскада (КПД, нелинейные искажения, мощность сигнала на выходе каскада и т. д.) определяются положением начальной рабочей точки, которое задает ток покоя выходной цепи  $I_{ОК}$ . Поэтому при изменении температуры, замене активного элемента и т. д. положение начальной рабочей точки не должно изменяться (сверх допустимых значений).

Если же активным элементом является биполярный транзистор, то изменение температуры или замена активного элемента могут повлиять на значение коэффициента усиления по току и значение теплового тока (обратного тока коллекторного перехода); если транзистор полевой, то влияние скажется на напряжении отсечки и крутизне характеристики. Поэтому схема подачи смещения фиксированным током нецелесообразна, особенно если активным элементом является биполярный транзистор по схеме с ОЭ.

При подаче смещения фиксированным напряжением изменение температуры и замена транзистора в меньшей степени влияют на ток покоя коллектора (при использовании в качестве активного элемента биполярного или полевого транзисторов), поэтому такие схемы находят применение в промышленности.

Для того чтобы обеспечить работоспособность усилительного каскада при изменении температурных условий в режиме *A*, используют схемы стабилизации положения начальной рабочей точки.

**Эмиттерная стабилизация** (рисунок 12). Стабилизация осуществляется введением в схему последовательной отрицательной ОС по постоянному току. Напряжение обратной связи снимается с резистора  $R_{\text{Э}}$ , который включен в цепь эмиттера.

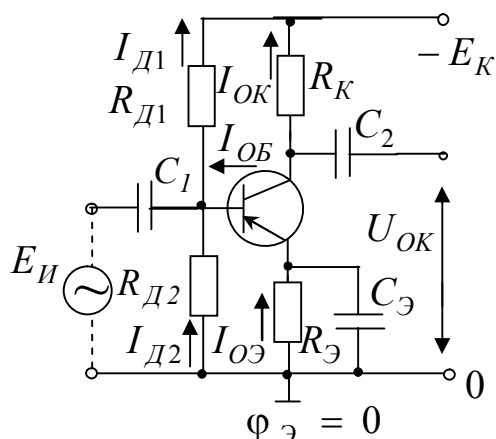


Рисунок 12 – Эмиттерная стабилизация

Напряжение смещения, приложенное к эмиттерному переходу

$$U_{0Б} = R_{Д2}I_{Д2} - R_{Э}I_{0Э}. \quad (14)$$

С изменением, например, температуры изменится ток покоя коллектора, а, следовательно, и ток покоя эмиттера  $I_{0Э}$ . Пусть токи  $I_{0К}$  и  $I_{0Э}$  увеличатся. Начальная рабочая точка на выходной динамической характеристике должна подняться вверх (рисунок 9, в)), но этого не произойдет, так как напряжение смещения  $U_{0Б}$  уменьшится (14), а вместе с этим уменьшатся и токи транзистора. Начальная рабочая точка останется на прежнем месте.

Для исключения влияния отрицательной обратной связи по переменному току на коэффициент усиления параллельно резистору  $R_{\text{Э}}$  включен конденсатор  $C_{\text{Э}}$ . Если конденсатор  $C_{\text{Э}}$  отсутствует, то переменная составляющая эмиттерного тока создает на резисторе падение напряжения  $u_{\text{Э}} = R_{\text{Э}}i_{\text{Э}}$  что снижает усиливаемое напряжение, так как  $u_{\text{Б}} = u_{\text{вх}} - R_{\text{Э}}i_{\text{Э}}$ , а, следовательно, и коэффициент усиления. Чтобы переменная составляющая на всех частотах усиливаемого напряжения не проходила через резистор, емкость конденсатора  $C_{\text{Э}}$  должна быть большой. При этом емкостное сопротивление  $1/(2\pi f C_{\text{Э}}) \ll R_{\text{Э}}$ .

**Коллекторная стабилизация** (рисунок 13, а)). Стабилизация осуществляется введением параллельной отрицательной ОС по напряжению. Напряжение подается через резистор  $R_B$ , который включают между коллектором и базой. При этом напряжение на коллекторе  $U_{0K} = E_K - R_K(I_{0B} + I_{0K}) = U_{0B} + R_B I_{0B}$ . Поскольку напряжение  $U_{0B}$  ничтожно мало по сравнению с напряжением на резисторе  $R_B$ , им можно пренебречь. Тогда  $R_B I_{0B} = E_K - R_K(I_{0K} + I_{0B})$ , откуда следует, что, например, при увеличении температуры и, следовательно, тока  $I_{0K}$  напряжение на резисторе, равное  $R_B I_{0B}$ , уменьшается, т. е. уменьшается ток  $I_{0B}$ , а это вызывает уменьшение тока  $I_{0K}$ . Чтобы исключить отрицательную ОС по переменной составляющей коллекторного напряжения (что вызвало бы снижение коэффициента усиления усилителя), в цепь базы вводят конденсатор  $C_\Phi$  (рисунок 13, б)). При этом резистор  $R_B$  заменяют двумя с примерно равными сопротивлениями и конденсатор включают между ними и заземленной точкой, в результате чего переменная составляющая напряжения не попадает на резистор  $R_{B1}$ . Следует заметить, что сопротивление конденсатора должно быть значительно меньше (в десятки раз) сопротивления  $R_B = R_{B1} + R_{B2}$ .

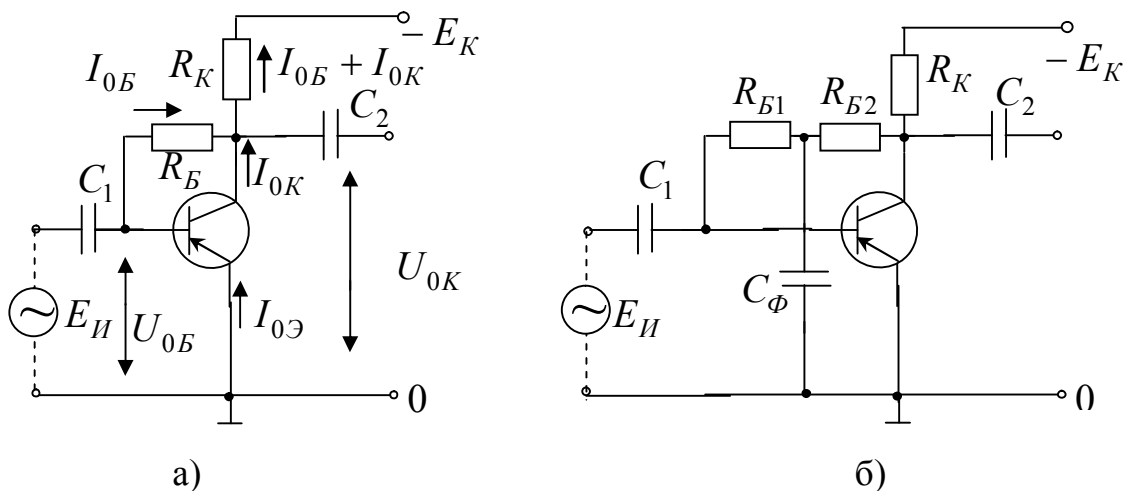


Рисунок 13 – Коллекторная стабилизация, где:

- а) – с помощью параллельной отрицательной ОС по напряжению;
- б) – для исключения отрицательной ОС по переменной составляющей коллекторного напряжения

Коллекторная стабилизация проще и экономичней эмиттерной, но уступает ей по диапазону стабилизируемых температур (стабилизация осуществляется в пределах изменения температуры не более чем на  $20^\circ \div 30^\circ$  и изменениях статического коэффициента передачи по току  $H_{21Э}$  не более чем в  $1,5 \div 2$ ).

### 1.3 Свойства активных элементов при различных способах включения

Рассмотрим свойства активных элементов при различных способах включения, работающих на средних частотах. Хотя входные и выходные сопротивления зависят от сопротивления нагрузки  $R_H$  и внутреннего сопротивления источника сигнала  $R_{И}$ , эту зависимость учитывать не будем.

Общую точку транзисторных схем обычно заземляют, ее потенциал принимают равным нулю ( $\varphi = 0$ ), потенциалы других точек схемы определяют относительно нулевого потенциала. Увеличение отрицательного потенциала какой-либо точки схемы по модулю означает уменьшение напряжения между этой точкой и точкой с потенциалом, равным нулю; уменьшение отрицательного потенциала какой-либо точки по модулю означает увеличение напряжения.

**Схема с общей базой.** Рассмотрим упрощенную схему усилителя с двумя источниками питания:  $E_0$  во входной цепи для задания смещения  $U_{Э} = f(E_{Э}R_{Э})$  эмиттерного перехода в прямом направлении и  $E_K$  в выходной цепи для задания смещения  $U_K = f(E_K, R_K)$  коллекторного перехода в обратном направлении (рисунок 14).

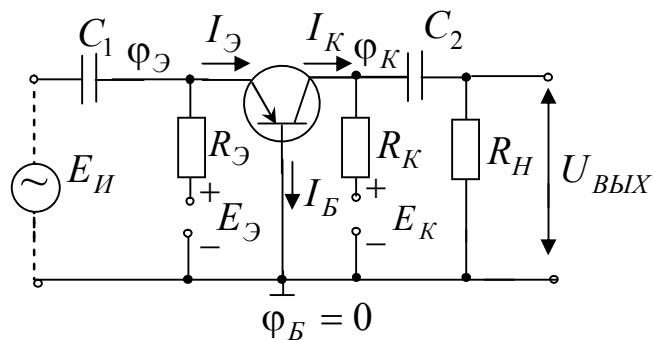


Рисунок 14 – Схема с общей базой

При подаче на вход напряжения положительной полярности напряжение на эмиттерном переходе увеличивается, что приводит к увеличению тока коллектора и возрастанию падения напряжения на резисторе  $R_K$ , т. е.  $U_{ВЫХ}$ . Следовательно, можно заключить, что фазы (полярности) входного и выходного напряжений совпадают. Входное сопротивление  $R_{ВХ} = dU_{Э} / dI_{Э}$  очень мало (от единиц до десятков Ом), так как эмиттерный переход смещен в прямом направлении  $R_{Э} \gg R_{ВХ}$ . Выходное сопротивление  $R_{ВЫХ} = dU_K / dI_K$  велико (от сотен килоОм до единиц мегаОм), так как коллекторный переход смещен в обратном направлении.

Коэффициент усиления по току  $K_I = I_K / I_{Э} < 1$  т. е. усиления по току в схеме с ОБ не происходит. Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{(R_K \parallel R_H) I_K}{(R_H + R_{ВХ}) I_{Э}} \approx \frac{R_K I_K}{R_{ВХ} I_{Э}},$$

и, поскольку  $R_K \gg R_{BX}$ , а  $I_K \approx I_{\mathcal{E}}$ , коэффициент усиления по напряжению велик. Коэффициент усиления по мощности  $K_p = K_P K_U \ll K_U$ .

**Схема с общим эмиттером.** Рассмотрим простейшую схему усилителя на биполярном транзисторе, включенном по схеме ОЭ (рисунок 15)

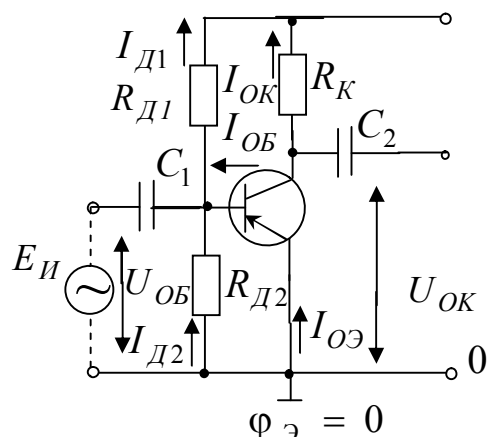


Рисунок 15 – Схема с общим эмиттером

При подаче на вход напряжения положительной полярности уменьшаются напряжение  $U_B$ , а, следовательно, и токи  $I_{\mathcal{E}}$  и  $I_K$ . Падение напряжения на резисторе  $R_K$  уменьшается, т. е. выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$  падает. Таким образом, увеличение входного напряжения вызывает уменьшение выходного напряжения, т. е. полярности напряжений противоположны и происходит сдвиг фаз на  $180^\circ$  между  $U_{ВХ} = U_B$  и  $U_{ВЫХ} = U_K$ . Входное сопротивление  $R_{ВХ} = dU_{ВХ} / dI_{ВХ} = dU_B / dI_B$ .

Если напряжение, подаваемое на вход схем с ОЭ и ОБ, приблизительно одинаково, то за счет того, что  $I_B \ll I_{\mathcal{E}}$ ,  $R_{ВХ}$  для схемы с ОЭ значительно больше, чем для схемы с ОБ. Выходное сопротивление, определяемое всегда со стороны выходных зажимов при отключенной нагрузке и при  $E_{II} = 0$ ,  $R_{ВЫХ} \approx R_K$ .

Коэффициент усиления по току  $K_1 = I_{ВЫХ} / I_{ВХ} = I_K / I_B$ , а так как  $I_B \ll I_K$ , то имеется значительное усиление по току.

При включении по схеме с ОЭ значительно усиление и по напряжению, и по мощности (усиление по току от десятков до сотен, по напряжению — несколько сотен, по мощности — до десятков тысяч). Схемы с ОЭ являются наиболее употребительными, их называют иногда основными.

**Схема с общим коллектором.** Рассмотрим схему усилителя, показанную на рисунке 16. В этой схеме резистор  $R_K$  в цепь коллектора не включен. Резистор  $R_B$  определяет ток в цепи базы в режиме покоя. Знак выходного напряжения, которое снимается с резистора  $R_{\mathcal{E}}$  включенного в цепь эмиттера, зависит от знака переменной составляющей тока эмиттера.

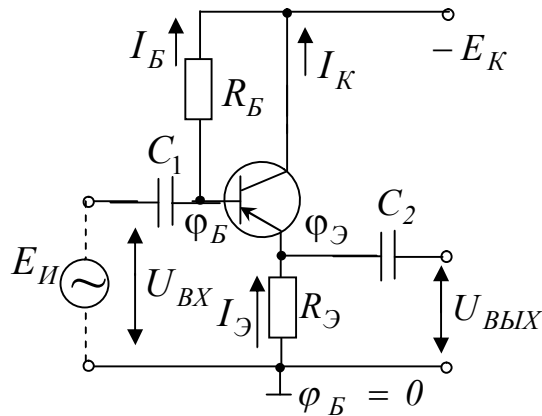


Рисунок 16 – Схема с общим коллектором

Коллектор является общей точкой для входной и выходной цепей. При работе усилителя по переменному току коллектор заземлен через небольшое внутреннее сопротивление источника  $E_K$ . Напряжение  $U_{БЭ} = U_{ВХ} - R_Э I_Э = U_{ВХ} - U_{ВЫХ}$  управляет током транзистора, т. е. в схеме существует последовательная отрицательная ОС по напряжению, которая уменьшает коэффициент усиления, увеличивает входное сопротивление и уменьшает выходное сопротивление. При подаче на вход сигнала положительной (относительно заземленной точки) полярности токи транзистора уменьшаются, уменьшается падение напряжения на резисторе  $R_Э$  и, следовательно,  $U_{ВЫХ}$ . Фаза усиливаемого сигнала не изменяется;  $R_{ВХ} = dU_{ВХ} / dI_{ВХ}$ ,  $U_{ВХ} > U_{ВЫХ}$ ; ток базы мал; входное сопротивление велико и достигает единиц – десятков килоОм:  $R_{ВЫХ} = dU_{ВЫХ} / dI_{ВЫХ}$ .

Выходное напряжение приложено к эмиттерному переходу, при незначительном его увеличении происходит значительное изменение тока эмиттера, поэтому выходное сопротивление невелико (до сотен Ом).

$$\text{Коэффициент усиления по току } K_I = I_Э / I_Б = \frac{I_Э / I_Э}{I_Э / I_Э - I_К / I_Э} = \frac{1}{1 - \alpha},$$

больше, чем в схеме с ОЭ. Коэффициент усиления по напряжению  $K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} < 1$ , так как  $U_{БЭ} = U_{ВХ} - U_{ВЫХ}$ , т. е. входное напряжение должно быть выше выходного. Усиление по мощности в схеме с ОК небольшое, оно значительно меньше, чем в схемах с ОБ и ОЭ.

Поскольку в схеме с ОК  $K_U \approx 1$  и фазы входного и выходного напряжений совпадают, схему с ОК называют эмиттерным повторителем.