

получается, что мощность, рассеиваемая на транзисторе, работающем в ключевом режиме, а следовательно и нагрев транзистора, в основном определяется длительностью фронтов  $t_{\phi 1}$  и  $t_{\phi 2}$  и частотой следования импульсов  $f = \frac{1}{T}$ . Потери мощности на транзисторе, обусловленные указанными причинами, называются *динамическими потерями* или *потерями на переключение*. С целью снижения этих потерь следует уменьшать длительностью фронтов нарастания и спада тока транзистора. Для этого служат так называемые *форсирующие цепи*, которые принудительно ускоряют процесс нарастания и спада тока.

В ключевом режиме КПД оказывается очень высоким, близким к 100 %. Этот режим преимущественно используется в силовых транзисторах, работающих в схемах бесконтактных прерывателей постоянного и переменного тока.

#### **Выводы:**

1. КПД усилительного каскада определяется режимом работы транзистора и связан с углом отсечки.
2. Различают режимы работы транзистора с отсечкой выходного тока (AB, B, C, D) и без отсечки (A), когда выходной ток протекает в течение всего периода входного сигнала.
3. Усилительный каскад, работающий с отсечкой выходного тока, имеет наибольший КПД.

### **3.12 Влияние температуры на работу усилительных каскадов**

Транзисторы, установленные в электронной аппаратуре, во время работы подвергаются нагреванию как за счет собственного тепла, выделяющегося при протекании по ним тока, так и за счет внешних источников тепла, например, расположенных рядом нагреваемых деталей. Как уже указывалось выше, изменение температуры оказывает значительное влияние на работу полупроводниковых приборов. В этом отношении не составляют исключения и транзисторы. В качестве иллюстрации этого приведем пример изменения под действием температуры входных и выходных статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (рисунок 3.41).

Расчеты показывают, что при таком значительном изменении характеристик, а с ними и параметров, работа усилительного каскада в условиях меняющейся температуры может стать совершенно неудовлетворительной. Для устранения этого недостатка в схемы усилителей вводится температурная стабилизация. В первую очередь это касается стабилизации положения начальной рабочей точки. Наибольшее распространение для этой цели получили две схемы стабилизации: эмиттерная стабилизация и коллекторная стабилизация.

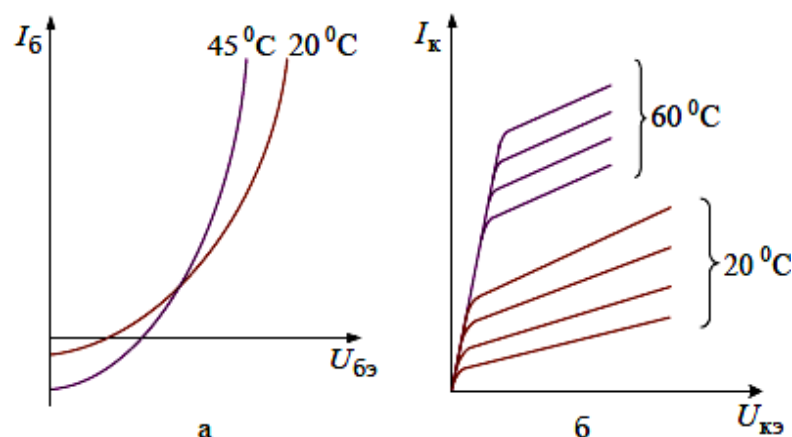


Рисунок 3.41 – Влияние температуры на статические характеристики транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером

### 3.12.1 Схема эмиттерной стабилизации

В схеме усилительного каскада на рисунке 3.42 в цепь эмиттера включено сопротивление  $R_э$ , шунтированное конденсатором  $C_э$ . Для создания смещения здесь используется делитель напряжения  $R1 - R2$ .

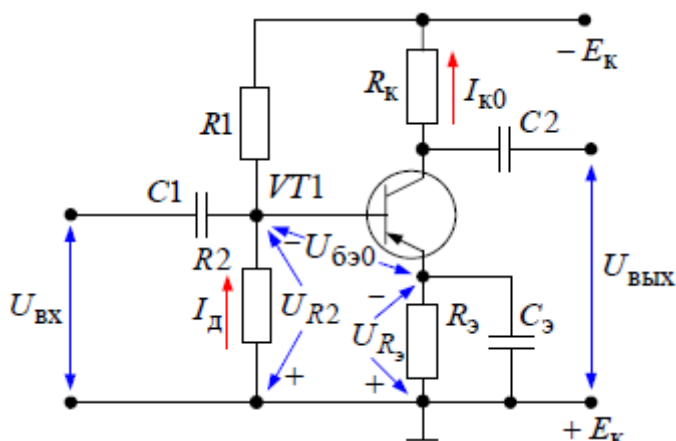


Рисунок 3.42 – Схема эмиттерной стабилизации положения рабочей точки

В соответствии с выбранным положением начальной рабочей точки, определяемой напряжением смещения, в коллекторной цепи транзистора протекает начальный коллекторный ток  $I_{к0}$ . Этот ток создает на эмиттерном сопротивлении  $R_э$  падение напряжения:

$$U_{R_э} = I_{к0} R_э. \quad (3.58)$$

Полярность этого падения напряжения направлена навстречу падению напряжения на сопротивлении  $R2$  делителя напряжения, создающего напряже-

ние смещения. Поэтому результирующее напряжение, определяющее смещение рабочей точки составляет:

$$U_{\delta\approx 0} = U_{R_2} - U_{R_3} = I_{\delta} \cdot R_2 - I_{\kappa 0} \cdot R_3. \quad (3.59)$$

При повышении температуры транзистора его начальный коллекторный ток  $I_{\kappa 0}$  возрастает, и, следовательно, возрастает второе слагаемое в (3.59). Это приводит к снижению величины напряжения на базе  $U_{\delta\approx 0}$  и к уменьшению тока базы смещения  $I_{\delta_{см}}$  и к снижению начального коллекторного тока  $I_{\kappa 0}$ . То есть в данной схеме имеет место передача части энергии усиливаемого сигнала из выходной цепи усилителя во входную, что называется *обратной связью*.

Если подаваемый с выхода на вход усилителя сигнал обратной связи находится в противофазе с входным, ослабляет его, то такая обратная связь называется *отрицательной*. А если наоборот, сигнал обратной связи находится в фазе с входным сигналом и усиливает его, то такая обратная часть называется *положительной*.

В нашем случае сигнал обратной связи  $U_{R_3}$  вычитается из напряжения  $U_{R_2}$ , приложенного к входу усилителя, то есть обратная связь здесь отрицательная, а поскольку сигнал обратной связи  $U_{R_3} = I_{\kappa 0} \cdot R_3$  пропорционален выходному (коллекторному) току, то такая обратная связь называется *обратной связью по току*. Легко показать, что отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент усиления усилителя, но зато стабилизирует его начальную рабочую точку. Для того чтобы усиливаемый полезный сигнал (сигнал переменного тока) не ослаблялся под действием вводимой обратной связи, параллельно сопротивлению обратной связи  $R_3$  включается конденсатор  $C_3$ . Имея малое сопротивление по переменной составляющей, он пропускает ее через себя, а постоянная составляющая  $I_{\kappa 0}$  протекает через  $R_3$ . Поэтому в сигнале обратной связи нет падения напряжения от переменной составляющей, и следовательно не будет уменьшаться коэффициент усиления.

### 3.12.2 Схема коллекторной стабилизации

В этой схеме (рисунок 3.43, а) стабилизация осуществляется введением отрицательной обратной связи по напряжению. Действительно, при повышении температуры возрастает начальный ток коллектора  $I_{\kappa 0}$ . Это приводит к увеличению падения напряжения на сопротивлении  $R_{\kappa}$  и к уменьшению напряжения  $U_{\kappa\approx 0}$ :

$$U_{кэ0} = E_{к} - I_{к0} \cdot R_{к}, \quad (3.60)$$

т. е. отрицательный потенциал коллектора относительно эмиттера будет уменьшаться; а поскольку он через резистор  $R_{б}$  приложен к базе транзистора, то и отрицательный потенциал базы относительно эмиттера будет уменьшаться, т. е. будет снижаться начальный базовый ток (ток смещения), а начальный коллекторный ток вернется к прежнему значению.

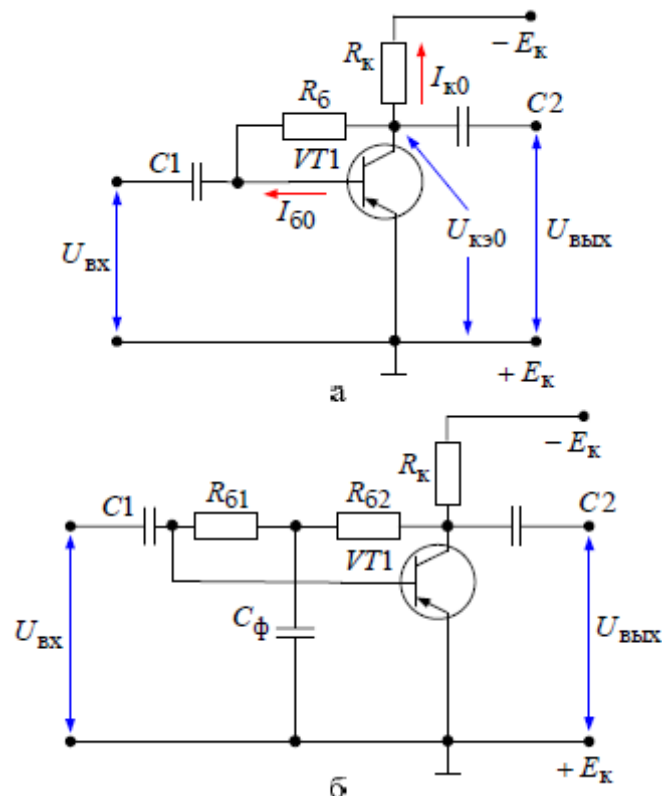


Рисунок 3.43 – Схема коллекторной стабилизации положения рабочей точки

Здесь, так же как и в предыдущей схеме под действием сигнала обратной связи стабилизируется начальный коллекторный ток  $I_{к0}$ . Чтобы при этом не снижать коэффициент усиления по переменной составляющей и не ослаблять полезный сигнал, в схему вводят конденсатор  $C_{ф}$  (рисунок 3.43, б). В этом случае резистор  $R_{б}$  заменяют двумя резисторами  $R_{б1}$  и  $R_{б2}$ . Переменная, составляющая коллекторного напряжения, замыкается через конденсатор  $C_{ф}$  и практически не оказывает влияние на напряжение  $U_{бэ}$  транзистора, а, следовательно, и на коэффициент усиления полезного сигнала.

### 3.13 Составной транзистор

Составным транзистором называется соединение двух и более транзисторов, эквивалентное одному транзистору, но с большим коэффициентом усиления или другими отличительными свойствами.

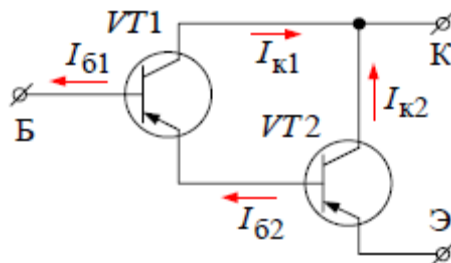


Рисунок 3.44 – Составной транзистор по схеме Дарлингтона

Известно несколько схем составного транзистора.

1. *Схема Дарлингтона.* Она характеризуется тем, что входные цепи всех входящих в нее транзисторов соединены последовательно, а выходные цепи – параллельно (рисунок 3.44). Транзисторы VT1 и VT2, входящие в состав составного транзистора, можно представить в виде одного транзистора с выводами эмиттера (Э), базы (Б) и коллектора (К). Коллекторный ток составного транзистора равен сумме коллекторных токов, входящих в него транзисторов:

$$I_{\kappa} = I_{\kappa 1} + I_{\kappa 2}. \quad (3.61)$$

Коллекторный ток транзистора VT1:

$$I_{\kappa 1} = \beta_1 \cdot I_{\delta 1} = \beta_1 \cdot I_{\delta}, \quad (3.62)$$

где  $\beta_1$  – коэффициент усиления по току транзистора VT1 .

Коллекторный ток транзистора VT2:

$$I_{\kappa 2} = \beta_2 \cdot I_{\delta 2}, \quad (3.63)$$

где  $\beta_2$  – коэффициент усиления по току транзистора VT2 .

$I_{\delta 2}$  – ток базы транзистора VT2.

Учитывая, что  $I_{\delta 2} = I_{\kappa 1} + I_{\delta}$ , получаем

$$I_{\kappa 2} = \beta_2 \cdot (I_{\kappa 1} + I_{\delta}) = \beta_2 \cdot (\beta_1 \cdot I_{\delta} + I_{\delta}) /$$

Коэффициент усиления по току составного транзистора:

$$\beta = \frac{I_{\kappa}}{I_{\sigma}} = \frac{I_{\kappa 1} + I_{\kappa 2}}{I_{\sigma}}. \quad (3.64)$$

Подставляя сюда значения  $I_{\kappa 1}$  и  $I_{\kappa 2}$ , получаем

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_2. \quad (3.65)$$

Входное сопротивление составного транзистора

$$R_{\sigma x} = R_{\sigma x 1} + R_{\sigma x 2} \cdot (\beta_1 + 1). \quad (3.66)$$

где  $R_{\sigma x 1}$  и  $R_{\sigma x 2}$  – входные сопротивления транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ .

Выходное сопротивление составного транзистора

$$R_{\sigma bx} = \frac{R_{\sigma bx 1} \cdot R_{\sigma bx 2}}{R_{\sigma bx 1} + R_{\sigma bx 2}}, \quad (3.67)$$

где  $R_{\sigma bx 1}$  и  $R_{\sigma bx 2}$  – выходные сопротивления транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ , соответственно.

Очевидно, что мощность транзистора  $VT2$  должна быть больше мощности транзистора  $VT1$ , т. к.  $I_{\kappa 2} \gg I_{\kappa 1}$ .

Следует отметить, что в схему составного транзистора Дарлингтона может быть включено и большее количество отдельных транзисторов.

2. *Составной транзистор на комплементарных транзисторах* (рисунок 3.45) – транзисторах противоположных типов электропроводности  $p-n-p$  и  $n-p-n$ .

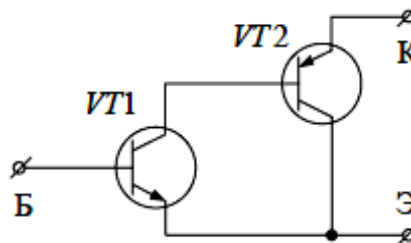


Рисунок 3.45 – Схема на комплементарных транзисторах

Эта схема составного транзистора эквивалентна эмиттерному повторителю – транзистору, включенному по схеме с общим коллектором. Он имеет большое входное сопротивление и малое выходное, что очень важно во входных каскадах усиления.

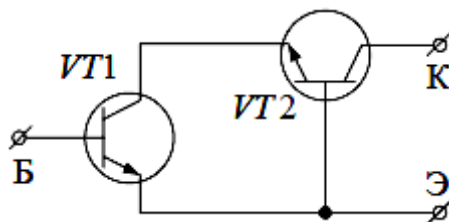


Рисунок 3.46 – Каскадная схема

3. Составной транзистор, выполненный по так называемой *каскадной схеме* (рисунок 3.46). Она характеризуется тем, что транзистор  $VT1$  включен по схеме с общим эмиттером, а транзистор  $VT2$  – по схеме с общей базой. Такой составной транзистор эквивалентен одиночному транзистору, включенному по схеме с общим эмиттером, но при этом он имеет гораздо лучшие частотные свойства и большую неискаженную мощность в нагрузке.

#### **Вывод:**

Соединение из двух или трёх транзисторов – составной транзистор – позволяет получить существенное увеличение коэффициента усиления по току или другие отличительные свойства по сравнению с одиночным транзистором.

### **3.14 Усилители постоянного тока**

Усилителями постоянного тока называют такие устройства, которые могут усиливать медленно изменяющиеся электрические сигналы, то есть они способны усиливать и переменные и постоянные составляющие входного сигнала. Усилители постоянного тока имеют много разновидностей (дифференциальные, операционные, усилители с преобразованием входного сигнала и др.). Поскольку такие устройства пропускают наряду с переменной составляющей еще и постоянную, то отдельные каскады должны быть связаны между собой либо непосредственно, либо через резисторы, но не через разделительные конденсаторы или трансформаторы, которые не пропускают постоянную составляющую. Основную проблему усилителей постоянного тока представляет *дрейф нуля* – отклонение напряжения на выходе усилителя от начального (нулевого) значения при отсутствии входного сигнала. Основной причиной этого явления являются температурная и временная нестабильность параметров активных элементов схемы усилителя, резисторов, а также источников питания. Одним из возможных путей уменьшения дрейфа нуля является использование *дифференциальных усилителей*.