

## ЛЕКЦИЯ 3. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

### 3.1. Общие сведения

В числе электропреобразовательных полупроводниковых приборов, т. е. приборов, служащих для преобразования электрических величин, важное место занимают транзисторы. Они представляют собой полупроводниковые приборы, пригодные для усиления мощности и имеющие три вывода или больше. В транзисторах может быть разное число переходов между областями с различной электропроводностью. Наиболее распространены транзисторы с двумя  $p$ - $n$ -переходами, называемые биполярными, так как их работа основана на использовании носителей заряда обоих знаков.

Устройство плоскостного биполярного транзистора показано схематически на рис. 3.1. Он представляет собой пластину германия, или кремния, или другого полупроводника, в которой созданы три области с различной электропроводностью. Для примера взят транзистор типа  $n$ - $p$ - $n$ , имеющий среднюю область с дырочной, а две крайние области – с электронной электропроводностью. Широко применяются также транзисторы типа  $p$ - $n$ - $p$ , в которых дырочной электропроводностью обладают две крайние области, а средняя имеет электронную электропроводность.

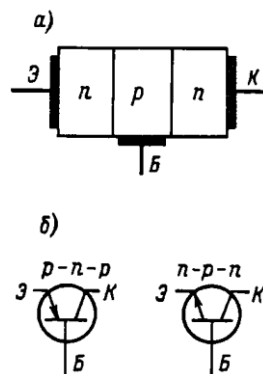


Рис. 3.1. Принцип устройства (а) и условное графическое обозначение (б) транзистора.

Средняя область транзистора называется базой, одна крайняя область – эмиттером, другая – коллектором. Таким образом, в транзисторе имеются два  $n$ - $p$ -перехода: эмиттерный – между эмиттером и базой, и коллекторный – между базой и коллектором. Расстояние между ними должно быть очень малым, не более единиц микрометров, т. е. область базы должна быть очень тонкой. Это является условием хорошей работы транзистора. Кроме того, концентрация примесей в базе всегда значительно меньше, чем в коллекторе и эмиттере. От базы, эмиттера и коллектора сделаны выводы.

Для величин, относящихся к базе, эмиттеру и коллектору, применяют в качестве индексов буквы «б», «э» и «к». Токи в проводах базы, эмиттера и коллектора обозначают соответственно  $i_b, i_e, i_k$ . Напряжения между электродами обозначают двойными индексами, например напряжение между базой и эмиттером  $u_{бэ}$ , между коллектором и базой  $u_{кб}$ . На условном графическом обозна-

чении транзисторов  $p-n-p$  и  $n-p-n$  стрелка показывает условное направление тока в проводе эмиттера при прямом напряжении на эмиттерном переходе.

Транзистор может работать в трех режимах в зависимости от напряжения на его переходах. При работе в активном режиме на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном – обратное. Режим отсечки, или запираения, достигается подачей обратного напряжения на оба перехода. Если же на обоих переходах напряжение прямое, то транзистор работает в режиме насыщения. Активный режим является основным. Он используется в большинстве усилителей и генераторов. Поэтому мы подробно рассмотрим работу транзистора в активном режиме. Режимы отсечки и насыщения характерны для импульсной работы транзистора и также будут рассмотрены в дальнейшем.

В схемах с транзисторами обычно образуются две цепи. Входная, или управляющая, цепь служит для управления работой транзистора. В выходной, или управляемой, цепи получаются усиленные колебания. Источник усиливаемых колебаний включается во входную цепь, а в выходную включается нагрузка. Для величин, относящихся к входной и выходной цепи, применяют соответственно индексы «вх» и «вых» или 1 и 2.

### 3.2. Физические процессы

Рассмотрим прежде всего, как работает транзистор, для примера типа  $n-p-n$ , в режиме без нагрузки, когда включены только источники постоянных питающих напряжений  $E_1$  и  $E_2$  (рис. 3.2, а). Полярность их такова, что на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном – обратное. Поэтому сопротивление эмиттерного перехода мало и для получения нормального тока в этом переходе достаточно напряжения  $E_1$  в десятые доли вольта. Сопротивление коллекторного перехода велико, и напряжение  $E_2$  обычно составляет единицы или десятки вольт.

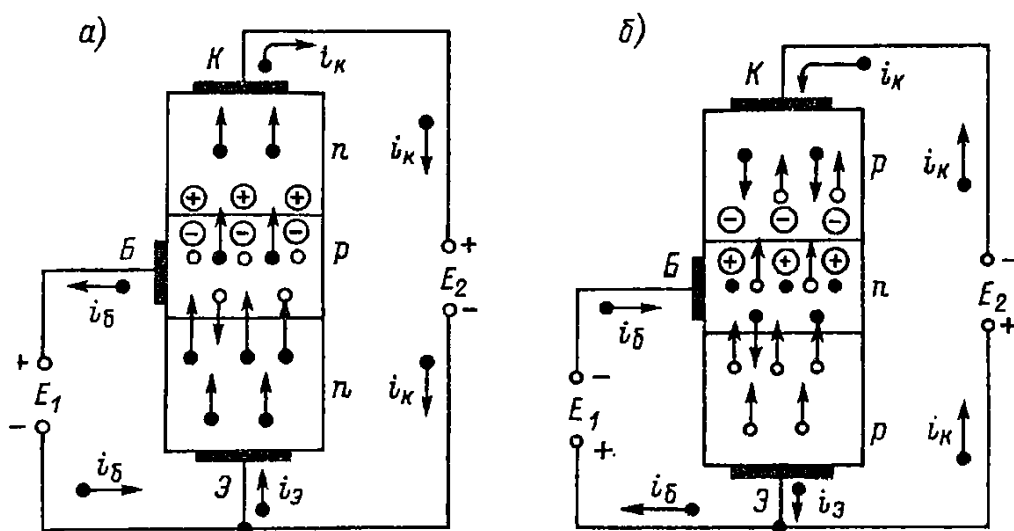


Рис. 3.2. Движение электронов и дырок в транзисторах типа *n-p-n* и *p-n-p*.

Из схемы на рис. 3.2, а видно, что напряжения между электродами транзистора связаны простой зависимостью

$$u_{кэ} = u_{кб} + u_{бэ}. \quad (3.1)$$

При работе транзистора в активном режиме обычно всегда  $u_{бэ} \ll u_{кб}$  и, следовательно,  $u_{кэ} \approx u_{кб}$ .

Вольт-амперная характеристика эмиттерного перехода представляет собой характеристику полупроводникового диода при прямом токе. А вольт-амперная характеристика коллекторного перехода подобна характеристике диода при обратном токе.

Принцип работы транзистора заключается в том, что прямое напряжение эмиттерного перехода, т. е. участка база – эмиттер ( $u_{бэ}$ ), существенно влияет на токи эмиттера и коллектора: чем больше это напряжение, тем больше токи эмиттера и коллектора. При этом изменения тока коллектора лишь незначительно меньше изменений тока эмиттера. Таким образом, напряжение  $u_{бэ}$ , т. е. входное напряжение, управляет током коллектора. Усиление электрических колебаний с помощью транзистора основано именно на этом явлении.

Физические процессы в транзисторе происходят следующим образом. При увеличении прямого входного напряжения  $u_{бэ}$  понижается потенциальный барьер в эмиттерном переходе и соответственно возрастает ток через этот переход – ток эмиттера  $i_э$ . Электроны этого тока инжектируются из эмиттера в базу и благодаря диффузии проникают сквозь базу в коллекторный переход, увеличивая ток коллектора. Так как коллекторный переход работает при обратном напряжении, то в этом переходе возникают объемные заряды, показанные на рисунке кружками со знаками «+» и «-». Между ними возникает электрическое поле. Оно способствует продвижению (экстракции) через коллекторный переход электронов, пришедших сюда из эмиттера, т. е. поле втягивает электроны в область коллекторного перехода.

Если толщина базы достаточно мала и концентрация дырок в ней невелика, то большинство электронов, пройдя через базу, не успевает рекомбинировать с дырками базы и достигает коллекторного перехода. Лишь небольшая часть электронов рекомбинирует в базе с дырками. В результате рекомбинации возникает ток базы. Действительно, в установившемся режиме число дырок в базе должно быть неизменным. Вследствие рекомбинации каждую секунду сколько-то дырок исчезает; но столько же новых дырок возникает за счет того, что из базы уходит в направлении к плюсу источника  $E_1$  такое же число электронов. Иначе говоря, в базе не может накапливаться много электронов. Если некоторое число инжектированных в базу из эмиттера электронов не доходит до коллектора, а остается в базе, рекомбинируя с дырками, то точно такое же число электронов должно уходить из базы в виде тока  $i_б$ . Поскольку ток коллектора получается меньше тока эмиттера, то в соответствии с первым законом Кирхгофа всегда

существует следующее соотношение между токами:

$$i_{\text{э}} = i_{\text{к}} + i_{\text{б}}. \quad (3.2)$$

Ток базы является бесполезным и даже вредным. Желательно, чтобы он был как можно меньше. Для того, чтобы ток  $i_{\text{б}}$  был как можно меньше, базу делают очень тонкой и уменьшают в ней концентрацию примесей, которая определяет концентрацию дырок. Тогда меньшее число электронов будет рекомбинировать в базе с дырками.

Когда к эмиттерному переходу напряжение не приложено, то практически можно считать, что в этом переходе нет тока. В этом случае область коллекторного перехода имеет большое сопротивление постоянному току, так как основные носители зарядов удаляются от этого перехода и по обе стороны от границы создаются области, обедненные этими носителями. Через коллекторный переход протекает лишь очень небольшой обратный ток, вызванный перемещением навстречу друг другу неосновных носителей, т. е. электронов из  $p$ -области и дырок из  $n$ -области.

Но если под действием входного напряжения возник значительный ток эмиттера, то в область базы со стороны эмиттера инжектируются электроны, которые для данной области являются неосновными носителями. Не успевая рекомбинировать с дырками при диффузии через базу, они доходят до коллекторного перехода. Чем больше ток эмиттера, тем больше электронов приходит к коллекторному переходу и тем меньше становится его сопротивление. Соответственно увеличивается ток коллектора. Иначе говоря, с увеличением тока эмиттера в базе возрастает концентрация неосновных носителей, инжектированных из эмиттера, а чем больше этих носителей, тем больше ток коллекторного перехода, т. е. ток коллектора  $i_{\text{к}}$ .

По рекомендуемой терминологии эмиттером следует называть область транзистора, назначением которой является инжекция носителей заряда в базу. Коллектором называют область, назначением которой является экстракция носителей заряда из базы. А базой является область, в которую инжектируются эмиттером неосновные для этой области носители заряда.

Следует отметить, что эмиттер и коллектор можно поменять местами (так называемый инверсный режим). Но в транзисторах, как правило, коллекторный переход делается со значительно большей площадью, нежели эмиттерный, так как мощность, рассеиваемая в коллекторном переходе, гораздо больше, чем рассеиваемая в эмиттерном. Поэтому если использовать эмиттер в качестве коллектора, то транзистор будет работать, но его можно применять только при значительно меньшей мощности, что нецелесообразно.

Мы рассмотрели физические явления в транзисторе типа  $n-p-n$ . Подобные же процессы происходят в транзисторе типа  $p-n-p$ , но в нем меняются ролями электроны и дырки, а также изменяются полярности напряжений и направления токов (рис. 3.2, б). В транзисторе типа  $p-n-p$  из эмиттера в базу инжектируются не электроны, а дырки, которые являются для базы неосновными носителями. С увеличением тока эмиттера больше таких дырок проникает через базу к коллекторному переходу. Это вызывает уменьшение его сопротивления и возрастание тока коллектора.

Работу транзистора можно наглядно представить с помощью потенциальной диаграммы, которая приведена на рис. 3.3 для транзистора типа  $n-p-n$ . Эту диаграмму удобно использовать для создания механической модели транзистора.

Потенциал эмиттера принят за нулевой. В эмиттерном переходе имеется небольшой потенциальный барьер. Чем больше напряжение  $u_{бэ}$ , тем ниже этот барьер. Коллекторный переход имеет значительную разность потенциалов, ускоряющую электроны. В механической модели шарики, аналогичные электронам, за счет своих собственных скоростей поднимаются на барьер, аналогичный эмиттерному переходу, проходят через область базы, а затем ускоренно скатываются с горки, аналогичной коллекторному переходу.

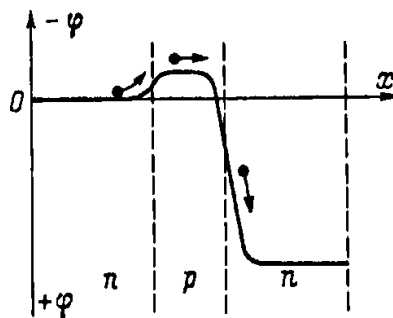


Рис. 3.3. Потенциальная диаграмма транзистора.

Существенно влияет на работу транзисторов сопротивление базы  $r_{б0}$ , т. е. сопротивление, которое база оказывает току базы  $i_б$ . (Ноль в индексе здесь означает, что данная величина относится к постоянному току.) Этот ток протекает к выводу базы в направлении, перпендикулярном направлению эмиттер — коллектор. Так как база очень тонкая, то в направлении от эмиттера к коллектору, т. е. для тока  $i_k$ , ее сопротивление очень мало и не принимается во внимание. А в направлении к выводу базы сопротивление базы  $r_{б0}$  (его называют поперечным) достигает сотен Ом, так как в этом направлении база аналогична очень тонкому проводнику. Напряжение на эмиттерном переходе всегда меньше, чем напряжение  $u_{бэ}$  между выводами базы и эмиттера, так как часть подводимого напряжения теряется на сопротивлении базы. С учетом сопротивления  $r_{б0}$  можно изобразить эквивалентную схему транзистора для постоянного тока так, как это сделано на рис. 3.4.

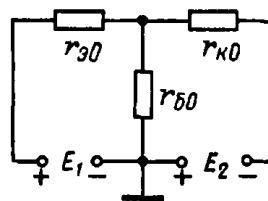


Рис. 3.4. Эквивалентная схема транзистора для постоянного тока.

На этой схеме  $r_{э0}$  — сопротивление эмиттера, в которое входят сопротивление эмиттерного перехода и эмиттерной области. Значение  $r_{э0}$  у маломощных транзисторов достигает десятков Ом.

Это вытекает из того, что напряжение на эмиттерном переходе не превышает десятые долей вольта, а ток эмиттера в таких транзисторах составляет единицы миллиампер. У более мощных транзисторов  $i_{э0}$  больше и  $r_{э0}$  соответственно меньше. Сопротивление  $r_{э0}$  определяется формулой (в Омах)

$$r_{э0} \approx \frac{25}{i_э} \quad (3.3)$$

где ток  $i_э$  выражается в миллиамперах.

Сопротивление коллектора  $r_{к0}$  представляет собой практически сопротивление коллекторного перехода и составляет единицы и десятки килоом. В него входит также сопротивление коллекторной области, но оно сравнительно мало и им можно пренебречь.

При повышении напряжения на коллекторном переходе в нем происходит лавинное размножение носителей заряда (главным образом результат ударной ионизации). Это явление и туннельный эффект способны вызвать электрический пробой, который при возрастании тока может перейти в тепловой пробой перехода. Электрический и тепловой пробой коллекторного перехода в транзисторе происходит в основном так же, как и в диоде. Но в транзисторе при чрезмерном коллекторном токе может возникать тепловой пробой без предварительного электрического пробоя, т. е. без повышения напряжения на коллекторном переходе до пробивного. Это явление, связанное с перегревом коллекторного перехода в какой-то его части, получило название вторичного пробоя.

Изменение напряжений на коллекторном и эмиттерном переходах сопровождается изменением толщины этих переходов. В результате изменяется толщина базы. Такое явление называют модуляцией толщины базы. Его особенно надо учитывать при повышении напряжения коллектор – база, так как тогда толщина коллекторного перехода возрастает, а толщина базы уменьшается. При очень тонкой базе может произойти эффект смыкания («прокол» базы) – соединение коллекторного перехода с эмиттерным. В этом случае область базы исчезает и транзистор перестает нормально работать.

При увеличении инжекции носителей из эмиттера в базу происходит накопление неосновных носителей заряда в базе, т. е. увеличение концентрации и суммарного заряда этих носителей. Наоборот, при уменьшении инжекции происходит уменьшение концентрации и суммарного заряда неосновных носителей в ней. Этот процесс называют рассасыванием неосновных носителей заряда в базе.

Установим соотношения между токами в транзисторе. Ток эмиттера управляется напряжением на эмиттерном переходе, но до коллектора доходит несколько меньший ток, который можно назвать управляемым коллекторным током  $i_{к\text{упр}}$ . Часть инжектированных из эмиттера в базу носителей рекомбинирует. Поэтому

$$i_{к\text{упр}} = \alpha \cdot i_э \quad (3.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент передачи тока эмиттера, являющийся основным параметром транзистора;

при нормальных токах может иметь значения от 0,950 до 0,998.

Чем слабее рекомбинация инжектированных носителей в базе, тем ближе  $\alpha$  к 1. Через коллекторный переход всегда проходит очень небольшой (не более единиц микроампер) неуправляемый обратный ток  $i_{k0}$  (рис. 3.5), называемый еще начальным током коллектора. Он неуправляем потому, что не проходит через эмиттерный переход.

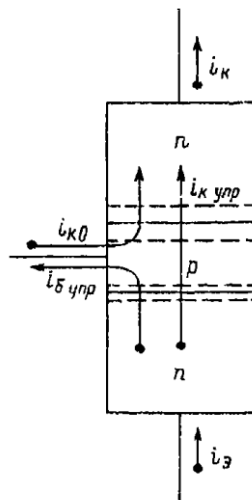


Рис. 3.5. Токи в транзисторе.

Таким образом, полный коллекторный ток

$$i_k = \alpha \cdot i_э + i_{k0}. \quad (3.5)$$

Во многих случаях  $i_{k0} \ll i_э$  и можно считать, что  $i_k \approx \alpha \cdot i_э$ .

Преобразуем выражение (3.5) так чтобы выразить зависимость тока  $i_k$  от тока базы  $i_б$ .

Заменим  $i_э$  суммой  $i_k + i_б$

$$i_k = \alpha \cdot (i_k + i_б) + i_{k0}.$$

Решим это уравнение относительно  $i_k$ . Тогда получим

$$i_k = \frac{\alpha}{1-\alpha} i_б + \frac{i_{k0}}{1-\alpha}.$$

Обозначим

$$\frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta \quad \text{и} \quad \frac{i_{k0}}{1-\alpha} = i_{kэ0},$$

и напишем окончательное выражение

$$i_k = \beta \cdot i_б + i_{kэ0}. \quad (3.6)$$

Здесь  $\beta$  - коэффициент передачи тока базы, он составляет несколько десятков. Например,

если  $\alpha = 0,95$ , то  $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{0,95}{0,05} = 19$ , а если  $\alpha = 0,99$ , то  $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{0,99}{0,01} = 99$ , т.е.

увеличивается в пять с лишним раз!

Таким образом, незначительные изменения  $\alpha$  приводят к большим изменениям  $\beta$ . Если известен  $\beta$ , то можно определить  $\alpha$  по формуле

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}. \quad (3.7)$$

Следует заметить, что коэффициент  $\alpha$  не является строго постоянным. Он зависит от режима работы транзистора, в частности от тока эмиттера. При малых и больших токах  $\alpha$  уменьшается, а при некотором среднем значении тока достигает максимума. В пределах рабочих значений тока эмиттера  $\alpha$  изменяется сравнительно мало.

Коэффициент  $\beta$  изменяется в зависимости от режима работы транзистора гораздо больше, нежели коэффициент  $\alpha$ . При некотором среднем значении тока эмиттера коэффициент  $\beta$  максимален, а при меньших и больших токах он снижается, причем иногда в несколько раз.

Ток  $i_{кэ0}$  называют начальным сквозным током, так как он протекает сквозь весь транзистор (через три его области и через оба  $n$ - $p$ -перехода) в том случае, если  $i_b = 0$ , т. е. оборван провод базы. Сквозной ток составляет десятки или сотни микроампер и значительно превосходит начальный ток коллектора  $i_{к0}$ . Ток  $\frac{i_{к0}}{1 - \alpha} = i_{кэ0}$ , и, зная, что  $\frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta$ , нетрудно найти  $i_{кэ0} = (\beta + 1)i_{к0}$ . А так как  $\beta \gg 1$ , то

$$i_{кэ0} \approx \beta \cdot i_{к0} \quad (3.8)$$

Сравнительно большой ток  $i_{кэ0}$  объясняется тем, что некоторая часть напряжения  $u_{кэ}$  приложена к эмиттерному переходу в качестве прямого напряжения. Вследствие этого возрастает ток эмиттера, а он в данном случае и является сквозным током.

При значительном повышении напряжения  $u_{кэ}$  ток  $i_{кэ0}$  резко возрастает и происходит электрический пробой.

### 3.3. Основные схемы включения транзисторов

Применяют три основные схемы включения транзисторов в усилительные или иные каскады. В этих схемах один из электродов транзистора является общей точкой входа и выхода каскада. Во избежание ошибок при этом надо помнить, что под входом (выходом) понимают точки, между которыми действует входное (выходное) переменное напряжение. Не следует рассматривать вход и выход по постоянному напряжению.

Основные схемы включения транзисторов называются соответственно схемами с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК). Принцип усиления колебаний во всех этих каскадах, конечно, одинаков, но свойства схем различны, и поэтому надо рассмотреть их более подробно.

#### 3.3.1. Схема с общим эмиттером (ОЭ)

Эта схема, изображенная на рис. 3.6, является наиболее распространенной, так как она дает наибольшее усиление по мощности.



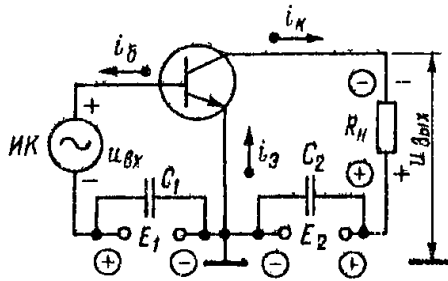


Рис. 3.6. Схема включения с общим эмиттером.

Коэффициент усиления по току  $k_i$  такого каскада представляет собой отношение амплитуд (или действующих значений) выходного и входного переменного тока, т. е. переменных составляющих токов коллектора и базы:

$$k_i = \frac{I_{m\text{ Вых}}}{I_{m\text{ Вх}}} = \frac{I_{m\text{ К}}}{I_{m\text{ Б}}}. \quad (3.9)$$

Поскольку ток коллектора в десятки раз больше тока базы, то  $k_i$  составляет десятки единиц.

Усилительные свойства транзистора при включении его по схеме ОЭ характеризует один из главных его параметров – известный нам статический коэффициент усиления по току (или коэффициент передачи тока) для схемы ОЭ, обозначаемый  $\beta$ . Поскольку он должен характеризовать только сам транзистор, то его определяют в режиме без нагрузки ( $R_H = 0$ ), т. е. при постоянном напряжении участка коллектор – эмиттер:

$$\beta = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B} \text{ при } u_{КЭ} = \text{const.} \quad (3.10)$$

Коэффициент  $\beta$  бывает равен десяткам и даже сотням, а реальный коэффициент усиления по току каскада  $k_i$  всегда меньше, чем  $\beta$ , так как при включении нагрузки  $R_H$  ток  $i_K$  уменьшается.

Коэффициент усиления каскада по напряжению  $k_u$  равен отношению амплитудных или действующих значений выходного и входного переменного напряжения. Входным является переменное напряжение база – эмиттер  $U_{m\text{ БЭ}}$ , а выходным – переменное напряжение на резисторе нагрузки  $u_R$  или, что все равно, между коллектором и эмиттером –  $U_{m\text{ КЭ}}$ :

$$k_u = \frac{U_{m\text{ Вых}}}{U_{m\text{ Вх}}} = \frac{U_{mR}}{U_{m\text{ БЭ}}} = \frac{U_{m\text{ КЭ}}}{U_{m\text{ БЭ}}} \quad (3.11)$$

Напряжение база – эмиттер не превышает десятых долей вольта, а выходное напряжение при достаточном сопротивлении резистора нагрузки и напряжении источника  $E_2$  достигает единиц, а в некоторых случаях и десятков вольт. Поэтому  $k_u$  имеет значение от десятков до сотен.

Отсюда следует, что коэффициент усиления каскада по мощности  $k_p$  получается равным сотням, или тысячам. Этот коэффициент представляет собой отношение выходной мощности к

входной. Каждая из этих мощностей определяется половиной произведения амплитуд соответствующих токов и напряжений:

$$P_{\text{ВЫХ}} = 0,5 I_{m \text{ Вых}} \cdot U_{m \text{ Вых}} = 0,5 I_{m R} \cdot U_{m \text{ КЭ}}; \quad (3.12)$$

$$P_{\text{ВХ}} = 0,5 I_{m \text{ ВХ}} \cdot U_{m \text{ ВХ}} = 0,5 I_{m \text{ Б}} \cdot U_{m \text{ БЭ}}; \quad (3.13)$$

Поэтому

$$k_p = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{m \text{ Вых}} \cdot U_{m \text{ Вых}}}{I_{m \text{ ВХ}} \cdot U_{m \text{ ВХ}}} = k_i \cdot k_u. \quad (3.14)$$

Важная величина, характеризующая транзистор – его входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$ . Для схемы ОЭ

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{m \text{ ВХ}}}{I_{m \text{ ВХ}}} = \frac{U_{m \text{ БЭ}}}{I_{m \text{ Б}}}. \quad (3.15)$$

и составляет от сотен Ом до единиц килоом. Это существенный недостаток биполярных транзисторов. Выходное сопротивление транзистора при включении его по схеме ОЭ, как будет показано далее, составляет от единиц до десятков килоом.

Каскад по схеме ОЭ при усилении переворачивает фазу напряжения, т. е. между выходным и входным напряжением имеется фазовый сдвиг  $180^\circ$ .

Достоинство схемы ОЭ – удобство питания ее от одного источника, поскольку на коллектор и базу подаются питающие напряжения одного знака.

Недостатки данной схемы – худшие по сравнению со схемой ОБ частотные и температурные свойства. С повышением частоты усиление в схеме ОЭ снижается в значительно большей степени, нежели в схеме ОБ. Режим работы схемы ОЭ сильно зависит от температуры.

### 3.3.2. Схема с общей базой (ОБ)

Хотя эта схема (рис. 3.7) дает значительно меньшее усиление по мощности и имеет еще меньшее входное сопротивление, чем схема ОЭ, все же ее иногда применяют, так как по своим частотным и температурным свойствам она значительно лучше схемы ОЭ.

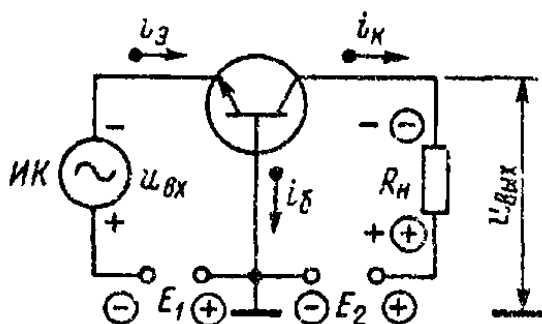


Рис. 3.7. Включение транзистора по схеме с общей базой.

Коэффициент усиления по току каскада ОБ всегда несколько меньше единицы :

$$k_i = \frac{I_{m \text{ Вых}}}{I_{m \text{ ВХ}}} = \frac{I_{m \text{ К}}}{I_{m \text{ Э}}} \approx 1, \quad (3.16)$$

так как ток коллектора всегда лишь немного меньше тока эмиттера.

Как мы знаем, важнейший параметр транзисторов – статический коэффициент усиления по току  $\alpha$ . Он определяется для режима без нагрузки ( $R_H = 0$ ), т. е. при постоянном напряжении участка коллектор – база:

$$\alpha = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_E} \text{ при } u_{КБ} = \text{const.} \quad (3.17)$$

Коэффициент  $\alpha$  всегда меньше 1, и чем ближе он к 1, тем лучше транзистор. Коэффициент усиления по току  $k_i$  для каскада ОБ всегда немного меньше  $\alpha$ , так как при включении  $R_H$  ток коллектора уменьшается.

Коэффициент усиления по напряжению определяется формулой

$$k_u = \frac{U_{mКБ}}{U_{mЭБ}}; \quad (3.18)$$

он получается таким же, как и в схеме ОЭ, т. е. равным десяткам или сотням.

Поскольку коэффициент усиления по мощности  $k_p$  равен произведению  $k_i \cdot k_u$ , то  $k_p$  примерно равен  $k_u$ , т. е. десяткам или сотням.

Входное сопротивление для схемы ОБ

$$R_{вх} = \frac{U_{mЭБ}}{I_{mЭ}}; \quad (3.19)$$

оно получается в десятки раз меньшим, чем в схеме ОЭ.

Такое малое  $R_{вх}$  является существенным недостатком схемы ОБ. Выходное сопротивление, как будет показано далее, в этой схеме получается до сотен килоом.

Для схемы ОБ фазовый сдвиг между выходным и входным напряжением отсутствует, т. е. фаза напряжения при усилении не переворачивается.

Следует отметить, что каскад по схеме ОБ вносит при усилении меньшие искажения, нежели каскад по схеме ОЭ.

### 3.3.3. Схема с общим коллектором (ОК)

В этой схеме (рис. 3.8) коллектор является общей точкой входа и выхода, поскольку источники питания  $E_1$  и  $E_2$  всегда шунтированы конденсаторами большой емкости и для переменного тока могут считаться короткозамкнутыми.

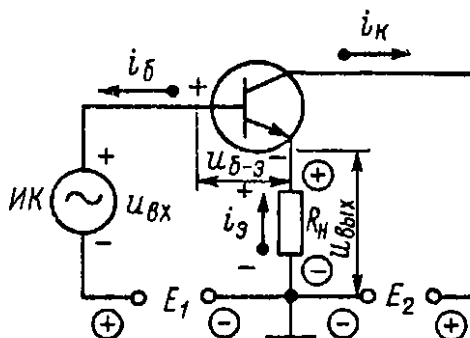


Рис. 3.8. Включение транзистора по схеме с общим коллектором.

Особенность этой схемы в том, что входное напряжение полностью передается обратно на вход, т. е. очень сильна отрицательная обратная связь. Нетрудно видеть, что входное напряжение равно сумме переменного напряжения база – эмиттер и выходного напряжения:

$$u_{\text{ВХ}} = u_{\text{бэ}} + u_{\text{ВЫХ}}. \quad (3.20)$$

Коэффициент усиления по току каскада ОК почти такой же, как и в схеме ОЭ, т. е. равен нескольким десяткам. Действительно,

$$k_i = \frac{I_{\text{мэ}}}{I_{\text{мб}}} = \frac{I_{\text{мк}} + I_{\text{мб}}}{I_{\text{мб}}} = \frac{I_{\text{мк}}}{I_{\text{мб}}} + 1; \quad (3.21)$$

а отношение  $\frac{I_{\text{мк}}}{I_{\text{мб}}}$  есть коэффициент усиления по току для схемы ОЭ.

Однако коэффициент усиления по напряжению близок к единице, причем всегда меньше ее:

$$k_u = \frac{U_{\text{мВЫХ}}}{U_{\text{мВХ}}} = \frac{U_{\text{мВЫХ}}}{U_{\text{мВЫХ}} + U_{\text{мбэ}}} < 1. \quad (3.22)$$

Напряжение  $U_{\text{мбэ}}$  не более десятых долей вольта, а  $U_{\text{мВЫХ}}$  при этом составляет единицы вольт, т. е.  $U_{\text{мбэ}} \ll U_{\text{мВЫХ}}$ , следовательно,  $k_u \approx 1$ . Коэффициент усиления по мощности  $k_p$ , очевидно, равен примерно  $k_i$  т. е. нескольким десяткам.

Рассмотрев полярность переменных напряжений в схеме, можно установить, что фазового сдвига между  $u_{\text{ВЫХ}}$  и  $u_{\text{ВХ}}$  нет. Таким образом, выходное напряжение совпадает по фазе с входным и почти равно ему. Иначе говоря, выходное напряжение повторяет входное. Именно поэтому данный каскад обычно называют эмиттерным повторителем. Эмиттерным потому, что резистор нагрузки включен в провод эмиттера и выходное напряжение снимается с эмиттера (относительно корпуса).

Входное сопротивление каскада по схеме ОК составляет десятки килоом, что является важным достоинством схемы. Действительно,

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{мВХ}}}{I_{\text{мВХ}}} = \frac{U_{\text{мВЫХ}} + U_{\text{мбэ}}}{I_{\text{мб}}}. \quad (3.23)$$

Отношение  $\frac{U_{\text{мбэ}}}{I_{\text{мб}}}$  есть входное сопротивление самого транзистора для схемы ОЭ, которое,

как известно, достигает единиц килоом. А так как  $U_{\text{мВЫХ}}$  в десятки раз больше  $U_{\text{мбэ}}$ , то и  $R_{\text{ВХ}}$  в десятки раз превышает входное сопротивление схемы ОЭ. Выходное сопротивление в схеме ОК, наоборот, получается сравнительно небольшим, обычно единицы килоом или сотни Ом.

### 3.4. Статические характеристики транзистора

Зависимости между токами и напряжениями в транзисторах выражаются статическими характеристиками транзисторов, снятыми при постоянном токе и отсутствии нагрузки в выходной цепи. Характеристики необходимы для рассмотрения свойств транзисторов и для практических расчетов транзисторных схем.

Рассмотрим, прежде всего, характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ.

На рис. 3.9, а даны входные характеристики  $i_b = f(u_{бэ})$  при постоянных выходных напряжениях ( $u_{кэ} = \text{const}$ ). Характеристика при  $u_{кэ} = 0$  идет из начала координат, так как, если все напряжения равны нулю, нет никакого тока.

Из схемы рис. 3.9, б видно, что при  $u_{кэ} = 0$ , т. е. когда коллектор и эмиттер замкнуты накоротко, к обоим переходам приложено прямое напряжение  $u_{бэ} = E_1$ . Ток базы при этом является суммой прямых токов эмиттерного и коллекторного переходов, но получается небольшим, так как прямое напряжение эмиттерного перехода составляет всего лишь десятые доли вольта, а поперечное сопротивление базы  $r_{б0}$  – сотни Ом.

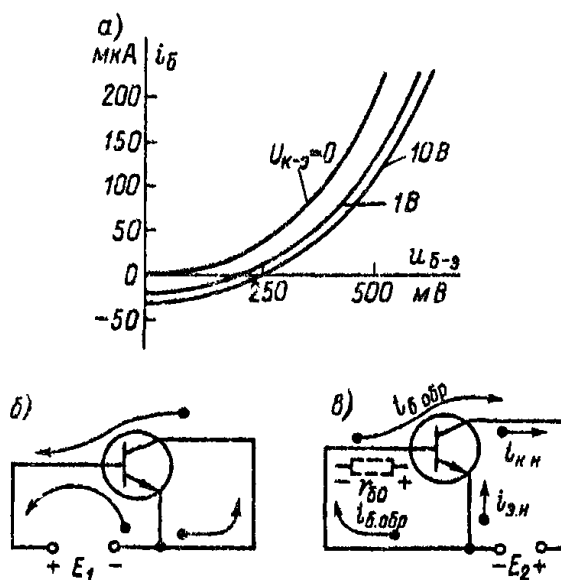


Рис. 3.9. Входные характеристики транзистора при включении его по схеме с ОЭ.

В транзисторах небольшой мощности ток базы составляет десятки или сотни микроампер. Рассматриваемая характеристика подобна обычной характеристике для прямого тока полупроводникового диода. При  $u_{кэ} > 0$  характеристика сдвигается вправо, ток базы уменьшается и при малых  $u_{бэ}$  становится отрицательным. Это объясняет рис. 3.9, в, на котором показана схема ОЭ при  $u_{бэ} = 0$ , т. е. при отсутствии источника  $E_1$ . В этом случае источник  $E_2$  кроме начального тока эмиттера  $i_{эн}$  создает еще в цепи базы ток  $i_{б обр}$  обратного по сравнению с обычным током базы направления. Оба этих тока, складываясь, образуют начальный ток коллектора  $i_{кн} = i_{эн} + i_{б обр}$ .

Следует отметить, что ток  $i_{бобр}$  создает на сопротивлении базы  $r_{б0}$  небольшое падение напряжения, которое является прямым для эмиттерного перехода и несколько увеличивает начальный ток эмиттера  $i_{эн}$ . Если теперь включить источник  $E_1$  и постепенно увеличивать его напряжение, то он будет действовать в цепи базы навстречу источнику  $E_2$ . Ток  $i_{бобр}$  уменьшится и при некотором значении  $u_{бэ}$  (когда действие источников  $E_1$  и  $E_2$  в цепи базы уравнивается) станет равным нулю. При дальнейшем увеличении  $u_{бэ}$  будет возрастать положительный ток базы, составляющий, как обычно, часть тока эмиттера.

Уменьшение тока базы при повышении  $u_{кэ}$  происходит еще и вследствие явления модуляции толщины базы. Чем выше  $u_{кэ}$ , тем больше напряжение на коллекторном переходе  $u_{кб}$ . Толщина этого перехода увеличивается, а толщина базы уменьшается и ее сопротивление  $r_{б0}$  возрастает. Однако изменение  $u_{кэ}$  (например, с 1 до 10 В, как показано на рис. 3.9, а) мало влияет на ток базы. Входные характеристики при разных значениях  $u_{кэ}$  расположены очень близко друг к другу. В справочниках обычно приводится лишь одна входная характеристика для рекомендуемого значения  $u_{кэ}$ . Иногда дается и характеристика при  $u_{кэ} = 0$ .

Семейство выходных характеристик  $i_k = f(u_{кэ})$  показано на рис. 3.10, а. Как правило, эти характеристики даются при различных постоянных токах базы. Это объясняется тем, что вследствие сравнительно малого входного сопротивления транзистора источник входного переменного напряжения, имеющий часто большое внутреннее сопротивление, работает в режиме генератора тока. Таким образом, обычно бывает задан входной ток транзистора и удобно вести расчеты с помощью семейства выходных характеристик, связывающих выходной ток и напряжение с входным током.

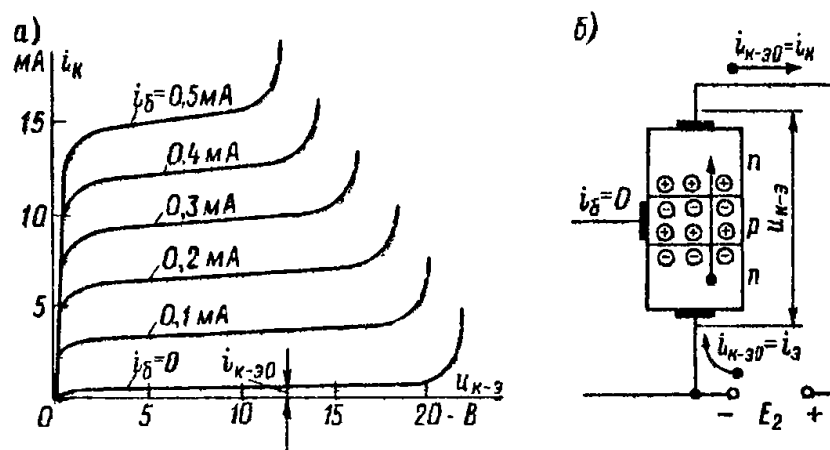


Рис. 3.10. Выходные характеристики транзистора при включении его по схеме с ОЭ.

Первая характеристика при  $i_б = 0$  выходит из начала координат и весьма напоминает обычную характеристику для обратного тока полупроводникового диода. Условие  $i_б = 0$  соответствует разомкнутой цепи базы. При этом через весь транзистор от эмиттера к коллектору

проходит известный нам сквозной ток  $i_{кэ0}$  (рис. 3.10, б).

Если  $i_б > 0$ , то выходная характеристика расположена выше, чем при  $i_б = 0$ , и тем выше, чем больше ток  $i_б$ . Увеличение тока базы означает, что за счет повышения напряжения  $u_{бэ}$  соответственно увеличился ток эмиттера, частью которого является ток  $i_б$ . Следовательно, пропорционально возрастает и ток коллектора. Благодаря линейной зависимости между токами пологие участки соседних выходных характеристик расположены приблизительно на одинаковых расстояниях друг от друга.

Выходные характеристики показывают, что при увеличении  $u_{кэ}$  от нуля до небольших значений (десятые доли вольта) ток коллектора резко возрастает, а при дальнейшем увеличении  $u_{кэ}$  характеристики идут с небольшим подъемом, что означает сравнительно малое влияние  $u_{кэ}$  на ток коллектора. Характеристики на рис. 3.10, а показывают, что чем больше токи  $i_к$ , тем раньше, т. е. при меньших значениях  $u_{кэ}$  наступает электрический пробой. Область пробоя, как правило, нерабочая область транзистора, за исключением некоторых специальных типов.

Иногда применяются выходные характеристики  $i_к = f(u_{кэ})$ , снятые при различных постоянных напряжениях  $u_{бэ}$ . Эти характеристики удобны в том случае, если на входе задано напряжение, т. е. если источник усиливаемых колебаний имеет малое внутреннее сопротивление (во много раз меньше входного сопротивления транзистора) и, следовательно, работает в режиме генератора напряжения. Семейство таких характеристик показано на рис. 3.11. Их особенность в том, что расстояние между соседними характеристиками различно. При малых  $u_{бэ}$  характеристики расположены ближе друг к другу. Это следствие нелинейной зависимости между током  $i_к$  и напряжением  $u_{бэ}$ .

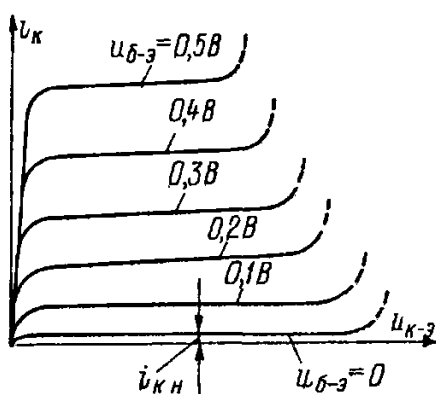


Рис. 3.11. Выходные характеристики транзистора при постоянном напряжении база – эмиттер.

Хотя для расчета схем с транзисторами достаточно иметь входные и выходные характеристики, иногда пользуются еще характеристиками управления – зависимостью  $i_к = f(i_б)$  при  $u_{кэ} = \text{const}$  (рис. 3.12, а) или  $i_к = f(u_{бэ})$  при  $u_{кэ} = \text{const}$  (рис. 3.12, б). Эти характеристики наглядно показывают, что между токами  $i_к$  и  $i_б$  существует зависимость, близкая к линейной, а

зависимость  $i_k$  от входного напряжения  $u_{бэ}$  нелинейна.

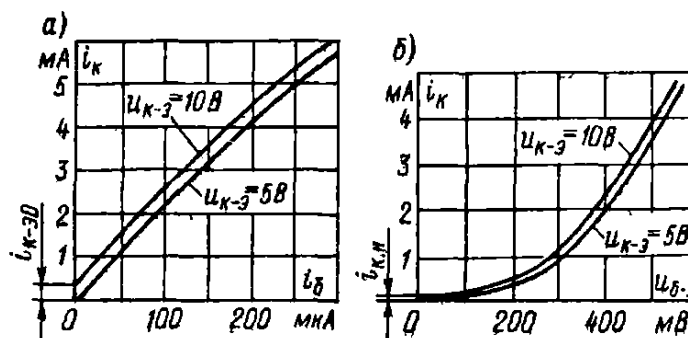


Рис. 3.12. Характеристики управления при включении транзистора по схеме с ОЭ.

Изменение напряжения  $u_{кэ}$  мало влияет на  $i_k$ , и характеристики управления для различных  $u_{кэ}$  расположены очень близко друг к другу.

Перейдем к характеристикам транзистора, включенного по схеме ОБ.

Входные характеристики  $i_э = f(u_{эб})$  при  $u_{кб} = \text{const}$  (рис. 3.13) аналогичны характеристике для прямого тока диода, поскольку ток эмиттера является именно таким током.

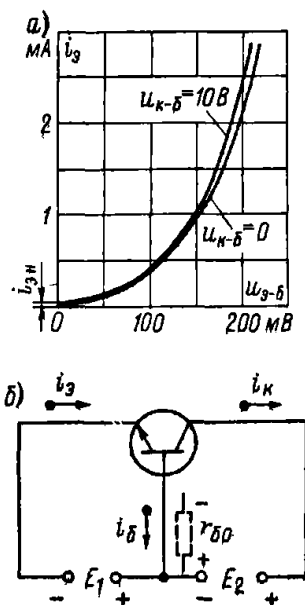


Рис. 3.13. Входные характеристики транзистора при включении его по схеме с ОБ.

При  $u_{кб} = 0$  характеристика идет из начала координат, так как ток равен нулю. А если  $u_{кб} > 0$ , то характеристика проходит немного выше, т. е. возникает ток эмиттера, и при  $u_{эб} = 0$  протекает небольшой начальный ток  $i_{эн}$ . Условие  $u_{эб} = 0$  соответствует короткому замыканию эмиттера и базы. Характеристики, для различных  $u_{кб}$  расположены очень близко друг к другу, и в справочниках обычно приводится только одна характеристика для некоторого  $u_{кб}$ .

Малое влияние напряжения  $u_{кб}$  на ток эмиттера объясняется тем, что поле, создаваемое напряжением  $u_{кб}$ , сосредоточено в коллекторном переходе. Но все же с увеличением  $u_{кб}$  ток  $i$ ,



несколько возрастает;, что объясняется влиянием поперечного сопротивления базы гб0.

На рис. 3.14, а показано семейство выходных характеристик  $i_k = f(u_{кб})$  при  $i_э = \text{const}$ .

При  $i_э = 0$  характеристика проходит через начало координат, так как без тока  $i_э$  и при  $u_{кб} = 0$  не может быть и коллекторного тока. Эта обычная характеристика обратного тока  $n$ - $p$ -перехода. Условие  $i_э = 0$  соответствует разомкнутой цепи эмиттера, а это означает, что включен только коллекторный переход, к которому приложено обратное напряжение. В этом, случае протекает известный нам начальный ток коллектора  $i_{к0}$ .

При некотором значении  $u_{кб}$  начинается электрический пробой коллекторного перехода, и ток коллектора резко возрастает.

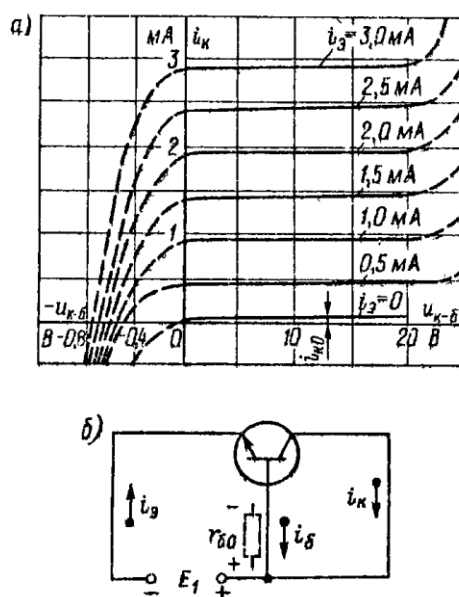


Рис. 3.14. Выходные характеристики транзистора при включении его по схеме с ОБ.

Рабочие участки выходных характеристик для различных  $i_э$  представляют собой прямые линии, идущие с очень небольшим наклоном, что означает малое влияние напряжения  $u_{кб}$  на ток коллектора. Действительно, для увеличения тока  $i_k$  надо увеличивать ток эмиттера, чтобы из эмиттера в базу инжектировалось больше носителей. Но если  $i_э = \text{const}$ , то коллекторный ток при возрастании  $u_{кб}$  увеличивается главным образом только за счет уменьшения толщины базы, в результате чего в базе снижается рекомбинация инжектированных носителей с основными носителями базы. Следовательно, больше инжектированных носителей достигает коллектора, ток  $i_k$  увеличивается, а ток базы уменьшается.

Особенность выходных характеристик в том, что при  $u_{кб} = 0$  и  $i_э > 0$  ток коллектора довольно велик – почти такой же, как и при  $u_{кб} > 0$ . Это объясняется тем, что благодаря сопротивлению базы  $r_{б0}$  в данном режиме на коллекторном переходе имеется некоторое

напряжение. Оно представляет собой напряжение, созданное на  $r_{б0}$  током базы (рис. 3.14, б). У многих транзисторов выходные характеристики имеют вид прямых линий, начиная от  $u_{кб} = 0$ . Зависимость между токами  $i_k$  и  $i_3$  почти линейна. Поэтому выходные характеристики при одинаковом изменении тока  $i_3$  располагаются почти на одном и том же расстоянии друг от друга. Чем больше токи, тем быстрее, т. е. при меньших  $u_{кб}$ , произойдет переход к электрическому пробую.

На рис. 3.14, а штриховыми линиями показано, что при перемене знака напряжения  $u_{кб}$  уже при небольших его значениях ток коллектора резко уменьшается, а затем изменяет свое направление и быстро возрастает. Это объясняется тем, что напряжение  $u_{кб}$  другого знака по сравнению с обычным является для коллекторного перехода прямым. При увеличении его на десятки доли вольта сначала компенсируется то небольшое напряжение, которое (как было объяснено) возникло на коллекторном переходе за счет падения напряжения от тока  $i_б$  на сопротивлении базы. Затем напряжение на коллекторном переходе становится прямым и ток  $i_k$  резко возрастает в обратном направлении.

Характеристики управления для схемы ОБ показывают почти линейную зависимость между токами  $i_k$  и  $i_3$  (рис. 3.15, а). Следует отметить, что линейность в данном случае значительно лучше, нежели у зависимости  $i_k$  от  $i_б$ . Для разных  $u_{кб}$  эти характеристики располагаются очень близко друг от друга, что подчеркивает малое влияние  $u_{кб}$  на ток коллектора. В справочниках обычно приводят лишь одну характеристику управления для среднего значения  $u_{кб}$ . При  $i_3$  характеристики должны показывать ток  $i_{к0}$ , но обычно ток этот настолько мал, что кривые изображают идущими из начала координат. Характеристики на рис. 3.15, б в отличие от предыдущих показывают нелинейную зависимость тока  $i_k$  от входного напряжения. Эти характеристики используются редко.

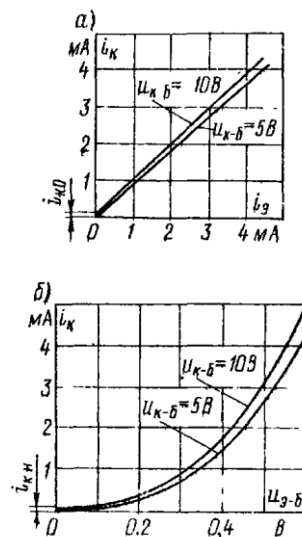


Рис. 3.15. Характеристики управления при включении транзистора по схеме ОБ.

### 3.5. Параметры и эквивалентные схемы

Параметры транзисторов являются величинами, характеризующими их свойства. С помощью параметров можно сравнивать качество транзисторов, решать задачи, связанные с применением транзисторов в различных схемах, и рассчитывать эти схемы.

Для транзисторов предложено несколько различных систем параметров и эквивалентных схем, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Все параметры можно разделить на собственные (или первичные) и вторичные. Собственные параметры характеризуют свойства самого транзистора независимо от схемы его включения, а вторичные параметры для различных схем включения различны.

В качестве собственных параметров помимо знакомого нам коэффициента усиления по току  $\alpha$  принимают некоторые сопротивления в соответствии с эквивалентной схемой транзистора для переменного тока (рис. 3.16). Эта схема, называемая Т-образной, отображает электрическую структуру транзистора и учитывает его усилительные свойства. Как в этой, так и в других эквивалентных схемах следует подразумевать, что на вход включается источник усиливаемых колебаний, создающий входные напряжения с амплитудой  $U_{m1}$ , а на выход – нагрузка  $R_H$ . Здесь и в дальнейшем для переменных токов и напряжений будут, как правило, указаны их амплитуды. Во многих случаях они могут быть заменены действующими, а иногда и мгновенными значениями.

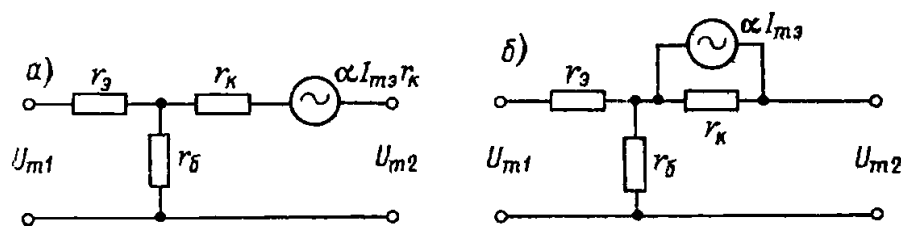


Рис. 3.16. Эквивалентные Т-образные схемы транзистора по схеме ОБ с генераторами ЭДС (а) и тока (б).

Основными первичными параметрами являются сопротивления  $r_3$ ,  $r_k$  и  $r_6$ , т. е. сопротивления эмиттера, коллектора и базы переменному току. Сопротивление  $r_3$  представляет собой сумму сопротивлений эмиттерного перехода и эмиттерной области. Подобно этому  $r_k$  является суммой сопротивлений коллекторного перехода и коллекторной области. Последнее очень мало по сравнению с сопротивлением перехода, поэтому им можно пренебречь. А сопротивление  $r_6$  есть поперечное сопротивление базы.

В схеме же на рис. 3.16, а усиленное переменное напряжение на выходе получается от некоторого эквивалентного генератора ЭДС  $\alpha \cdot I_{m3} \cdot r_k$ , включенного в цепь коллектора. ЭДС этого генератора пропорциональна току эмиттера  $I_{m3}$ .

Эквивалентный генератор надо считать идеальным, а роль его внутреннего сопротивления выполняет сопротивление  $r_k$ .

Вместо генератора ЭДС можно ввести в схему генератор тока. Тогда получается наиболее часто применяемая эквивалентная схема (рис. 3.16, б). В ней генератор тока создает ток, равный  $\alpha \cdot I_{m\varepsilon}$ . Значения первичных параметров примерно следующие. Сопротивление  $r_3$ , составляет десятки Ом,  $r_6$  – сотни Ом, а  $r_k$  – сотни килоОм и даже единицы мегаОм. Обычно к трем сопротивлениям в качестве четвертого собственного параметра добавляют еще  $\alpha$ . Рассмотренная эквивалентная схема транзистора пригодна только для низших частот. На высоких частотах необходимо учитывать еще емкость эмиттерного и коллекторного перехода, что приводит к усложнению схемы. В данном параграфе будут рассмотрены только низкочастотные эквивалентные схемы и параметры.

Эквивалентная схема с генератором тока для транзистора, включенного по схеме ОЭ, показана на рис. 3.17. В ней генератор дает ток  $\beta \cdot I_{m6}$  а сопротивление коллекторного перехода по сравнению с предыдущей схемой значительно уменьшилось и равно  $r_k(1-\alpha)$  или, приближенно,  $r_k/\beta$ , если учесть, что  $\beta = \alpha/(1-\alpha)$  и  $\alpha \approx 1$ .

Переход от эквивалентной схемы ОБ к схеме ОЭ можно показать следующим образом. Напряжение, создаваемое любым генератором, равно разности между ЭДС и падением напряжения на внутреннем сопротивлении. Для схемы по рис. 3.16, а это будет

$$U_m = \alpha \cdot I_{m\varepsilon} \cdot r_k - I_{mk} \cdot r_k.$$

Заменим здесь  $I_{m\varepsilon}$  на сумму  $I_{mk} + I_{m6}$ . Тогда получим

$$U_m = \alpha \cdot (I_{mk} + I_{m6}) \cdot r_k - I_{mk} \cdot r_k = \alpha \cdot I_{mk} \cdot r_k + \alpha \cdot I_{m6} \cdot r_k - I_{mk} \cdot r_k = \alpha \cdot I_{m6} \cdot r_k - (1-\alpha)I_{mk} \cdot r_k.$$

В этом выражении первое слагаемое  $\alpha \cdot I_{m6} \cdot r_k$  представляет собой ЭДС, а второе слагаемое есть падение напряжения от тока  $I_{mk}$  на сопротивлении  $(1-\alpha) \cdot r_k$ , которое является сопротивлением коллекторного перехода. Ток короткого замыкания, создаваемый эквивалентным генератором тока, равен отношению ЭДС к внутреннему сопротивлению, т. е.  $\alpha \cdot I_{m6} \cdot r_k / (1-\alpha) \cdot r_k = \beta \cdot I_{m6}$ .

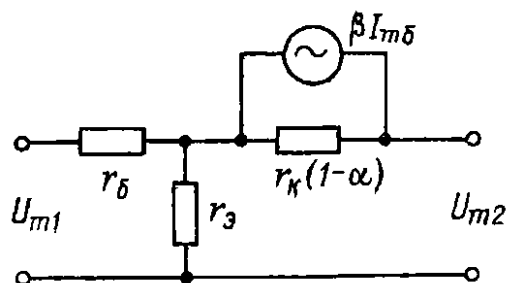


Рис. 3.17. Эквивалентная Т-образная схема транзистора, включенного по схеме ОЭ.

Рассмотренные Т-образные эквивалентные схемы являются приближенными, так как на самом деле эмиттер, база и коллектор соединены друг с другом внутри транзистора не в одной точке. Тем не менее, использование этих схем для решения теоретических и практических задач не

дает значительных погрешностей.

Все системы вторичных параметров основаны на том, что транзистор рассматривается как четырехполюсник, т. е. прибор, имеющий два входных и два выходных зажима. Вторичные параметры связывают входные и выходные переменные токи и напряжения и справедливы только для данного режима транзистора и для малых амплитуд. Поэтому их называют низкочастотными малосигнальными параметрами. Вследствие нелинейности транзистора вторичные параметры изменяются при изменении его режима и при больших амплитудах.

В настоящее время основными считаются смешанные (или гибридные) параметры, обозначаемые буквой  $h$  или  $H$ . Название «смешанные» дано потому что среди них имеются два безразмерных коэффициента, одно сопротивление и одна проводимость. Именно  $h$ -параметры приводятся во всех справочниках. Параметры системы  $h$  удобно измерять. Это весьма важно, так как в справочниках содержатся усредненные параметры, полученные в результате измерений параметров нескольких транзисторов данного типа.

Зависимость между переменными токами и напряжениями в транзисторе при использовании  $h$ -параметров можно выразить следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} U_{m1} &= h_{11}I_{m1} + h_{12}U_{m2}; \\ I_{m2} &= h_{21}I_{m1} + h_{22}U_{m2}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

В систему  $h$ -параметров входят следующие величины:

1. Входное сопротивление

$$h_{11} = \frac{U_{m1}}{I_{m1}} \text{ при } U_{m2} = 0 \quad (3.25)$$

представляет собой сопротивление транзистора переменному входному току (между входными зажимами) при коротком замыкании на выходе, т. е. при отсутствии выходного переменного напряжения ( $U_{m2} = 0$ ).

2. Коэффициент обратной связи по напряжению

$$h_{12} = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} \text{ при } I_{m1} = 0 \quad (3.26)$$

показывает, какая доля выходного переменного напряжения передается на вход транзистора вследствие обратной связи в нем.

3. Коэффициент усиления по току (коэффициент передачи тока)

$$h_{21} = \frac{I_{m2}}{I_{m1}} \text{ при } U_{m2} = 0 \quad (3.27)$$

показывает усиление переменного тока транзистором в режиме работы без нагрузки.

4. Выходная проводимость

$$h_{22} = \frac{I_{m2}}{U_{m2}} \text{ при } I_{m1} = 0 \quad (3.28)$$

представляет собой внутреннюю проводимость для переменного тока между выходными

зажимами транзистора.

Уравнениям (3.24) соответствует эквивалентная схема, изображенная на рис. 3.18.

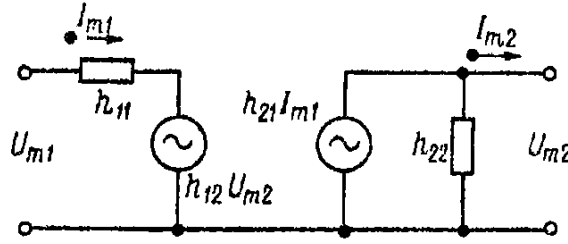


Рис. 3.18. Эквивалентная схема транзистора с использованием  $h$ -параметров.

В ней генератор ЭДС показывает наличие напряжения обратной связи во входной цепи. Сам генератор надо считать идеальным, т. е. не имеющим внутреннего сопротивления. Генератор тока в выходной цепи учитывает эффект усиления тока,  $h_{22}$  является внутренней проводимостью этого генератора. Хотя и входная и выходная цепи кажутся не связанными друг с другом, на самом деле эквивалентные генераторы учитывают взаимосвязь этих цепей.

В зависимости от того, к какой схеме относятся параметры, дополнительно к цифровым индексам ставятся буквы: «э» – для схемы ОЭ, «б» – для схемы ОБ и «к» – для схемы ОК.

Рассмотрим  $h$ -параметры для схем ОЭ и ОБ и приведем их выражения для транзисторов небольшой мощности.

Для схемы ОЭ (рис. 3.17) учтем, что  $i_1 = i_б; i_2 = i_к; u_1 = u_бэ; u_2 = u_кэ$ , и поэтому  $h$ -параметры определяются по следующим формулам: входное сопротивление

$$\begin{aligned} h_{11э} &= \left. \frac{U_{m1}}{I_{m1}} \right|_{U_{m2}=0} = \left. \frac{U_{мбэ}}{I_{мб}} \right|_{U_{мкэ}=0} = \frac{I_{мб} \cdot r_б + I_{мэ} \cdot r_э}{I_{мб}} = \frac{I_{мб} \cdot r_б + (I_{мб} + I_{мк}) \cdot r_э}{I_{мб}} = \\ &= \frac{I_{мб} \cdot r_б + (I_{мб} + \beta I_{мб}) \cdot r_э}{I_{мб}} = \frac{I_{мб} \cdot r_б + I_{мб}(1 + \beta) \cdot r_э}{I_{мб}} = r_б + (1 + \beta) \cdot r_э = r_б + \frac{r_э}{1 - \alpha} \end{aligned} \quad (3.29)$$

и получается от сотен Ом до единиц килоОм.

Проделав аналогичные вычисления для остальных  $h$ -параметров, можно получить

$$h_{12э} = \left. \frac{U_{m1}}{U_{m2}} \right|_{I_{m1}=0} \approx \frac{r_э}{r_к(1 - \alpha)}; h_{21э} = \left. \frac{I_{m2}}{I_{m1}} \right|_{U_{m2}=0} = \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}; h_{22э} = \left. \frac{I_{m2}}{U_{m2}} \right|_{I_{m1}=0} = \frac{1}{r_к(1 - \alpha)}. \quad (3.30)$$

Для схемы с общей базой (рис. 3.16)  $h$ -параметры определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} h_{11б} &= \left. \frac{U_{мэб}}{I_{мэ}} \right|_{U_{мкб}=0} = r_э + (1 - \alpha) \cdot r_б; h_{12б} = \left. \frac{U_{мэб}}{U_{мкб}} \right|_{I_{мэ}=0} = \frac{r_б}{r_б + r_к} \approx \frac{r_б}{r_к}; \\ h_{21б} &= \left. \frac{I_{мк}}{I_{мэ}} \right|_{U_{мкб}=0} = -\alpha; h_{22б} = \left. \frac{I_{мк}}{U_{мкб}} \right|_{I_{мэ}=0} = \frac{1}{r_к + r_б} \approx \frac{1}{r_к}. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Кроме системы  $h$ -параметров пользуются также системой параметров в виде проводимостей, или  $y$ -параметрами.