

## Лекция 3

## БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

## План

1. Устройство и принцип действия биполярного транзистора.
2. Вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов.
3. Определение рабочей точки транзистора.
4. Выводы.

## 1. Устройство и принцип действия биполярного транзистора

Биполярный транзистор – трёхполюсный полупроводниковый прибор с двумя  $p-n$ -переходами. Он состоит из чередующихся областей полупроводника, имеющих электропроводность различных типов.

В зависимости от последовательности чередования  $n$ - и  $p$ -областей различают транзисторы  $n-p-n$ - и  $p-n-p$ -типов. На практике используются транзисторы обоих типов; принцип действия их одинаков. Основными носителями заряда в транзисторе  $n-p-n$ -типа являются электроны, а в  $p-n-p$ -транзисторе – дырки. Так как в кремнии электроны обладают большей подвижностью, чем дырки, то чаще используют транзисторы  $n-p-n$ -типа.

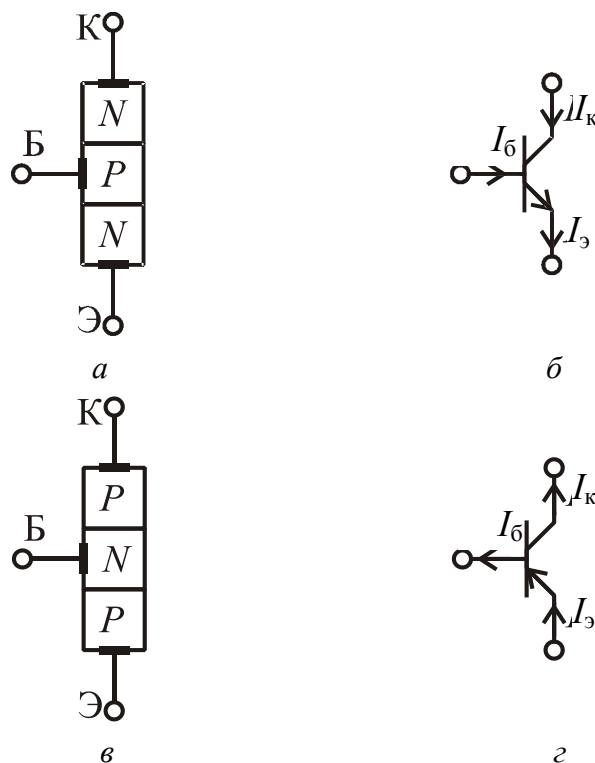


Рис. 3.1

На рис. 3.1, *а* изображена идеализированная структура биполярного  $n$ - $p$ -транзистора. На рис. 3.1, *б* приведено его условное графическое обозначение. На рис. 3.1, *в*, *г* показаны структура и условное графическое обозначение  $p$ - $n$ - $p$ -транзистора. Заметим, что  $n$ - $p$ - $n$ - и  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторы имеют обратные полярности напряжений. Соответственно противоположные направления имеют и токи.

Центральная область транзистора, называемая *базой*, заключена между *коллектором* и *эмиттером*. Толщина базы мала и не превышает нескольких микрон. Переход между базой и эмиттером называется *эмиттерным*, а между базой и коллектором – *коллекторным*.

Симметричные структуры биполярных транзисторов, показанные на рис. 3.1, являются идеальными. Структура реального транзистора несимметрична (рис. 3.2). Площадь коллекторного перехода значительно больше, чем эмиттерного.

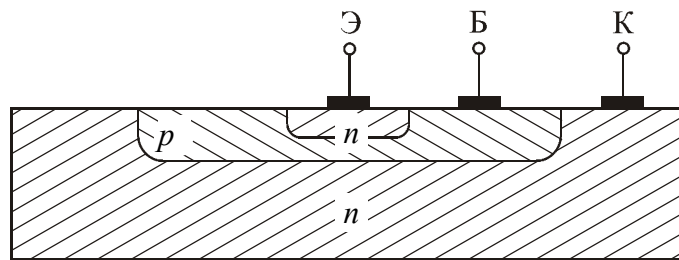


Рис. 3.2

Каждый из  $p$ - $n$ -переходов транзистора может быть смещён либо в прямом, либо в обратном направлениях. В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора:

- 1) **активный (усиления)**. Эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный – в обратном;
- 2) **отсечки**. Оба перехода смещены в обратном направлении;
- 3) **насыщения**. Оба перехода смещены в прямом направлении;
- 4) **инверсный**. Эмиттерный переход смещён в обратном направлении, а коллекторный – в прямом.

Рассмотрим подробнее каждый из режимов работы транзистора на примере прибора  $n$ - $p$ - $n$ -типа.

**Активный режим.** Так как эмиттерный переход смещён в прямом направлении, происходит инжекция носителей из эмиттера в базу. Поскольку область эмиттера легирована сильнее, чем область базы, поток электронов преобладает над потоком дырок. Из-за малой толщины базы почти все электроны, пройдя базу, достигают коллектора. Только малая доля электронов рекомбини-

рует в базе с дырками. Коллекторный переход смещён в обратном направлении, поэтому электроны, достигшие коллекторного перехода, втягиваются полем перехода в коллектор. Происходит *экстракция* электронов в коллектор.

Токи транзистора, работающего в активном режиме, связаны соотношениями:

$$I_{\kappa} = \alpha I_{\text{э}}; \quad (12.1a)$$

$$I_{\text{э}} = I_{\kappa} + I_{\sigma}. \quad (12.1б)$$

Множитель  $\alpha$  называют *коэффициентом передачи тока эмиттера*. У интегральных транзисторов  $\alpha = 0.99\text{--}0.995$ . Из равенств (12.1) следует, что

$$I_{\kappa} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_{\sigma} = \beta I_{\sigma}.$$

Множитель  $\beta$  называют *коэффициентом усиления тока базы*. Так как величина  $\alpha$  близка к 1, то  $\beta$  может принимать большие значения. Для интегральных *n-p-n*-транзисторов оно составляет от 50 до 200.

Связь между напряжением эмиттерного перехода и током эмиттера имеет экспоненциальную форму:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{э}0} e^{U_{\text{э}}/V_T}.$$

Обратный ток эмиттерного перехода  $I_{\text{э}0}$  обратно пропорционален ширине базы и прямо пропорционален площади эмиттерного перехода. Последнее свойство часто используется разработчиками интегральных схем при конструировании источников постоянного тока. В зависимости от размеров транзистора величина  $I_{\text{э}0}$  составляет от  $10^{-12}$  до  $10^{-18}$  А. Ток  $I_{\text{э}0}$  зависит от температуры, удваиваясь при увеличении температуры примерно на  $7^\circ\text{C}$ .

Таким образом, работа биполярного транзистора в активном режиме основана на сочетании процессов инжекции носителей через один переход и собирания их на другом переходе. Концентрация примесей в эмиттере значительно больше, чем в базе и коллекторе. Поэтому электронная составляющая тока *n-p-n*-транзистора является преобладающей. В активном режиме ток коллектора управляется током эмиттера (или напряжением эмиттерного перехода) и почти не зависит от напряжения на коллекторном переходе, поскольку последний смещен в обратном направлении. Активный режим является основным, если транзистор используется для усиления сигналов.

**Режим отсечки.** Инжекция основных носителей в область базы наблюдается в том случае, если эмиттерный переход смещён в прямом направлении. Если напряжение  $U_{бэ}$  меньше пороговой величины (0,6 В для кремниевых транзисторов), заметной инжекции носителей в базу не наблюдается. При этом  $I_э = I_б = 0$ . Следовательно, ток коллектора также равен нулю. Таким образом, для режима отсечки справедливы условия:  $U_{бэ} < 0,6$  В или  $I_б = 0$ .

**Режим насыщения.** Если оба перехода смещены в прямом направлении, носители инжектируются в базу как из эмиттера, так и из коллектора. В этом режиме ток коллектора не зависит от тока базы. Коллекторный переход отпирается, если напряжение коллектор-база  $U_{кб} < -0,4$  В. При этом напряжение коллектор-эмиттер не превышает напряжение насыщения:  $U_{кэ} \leq U_{кэнас}$ . Значение  $U_{кэнас}$  находится в пределах 0,2–0,3 В.

Режимы отсечки и насыщения биполярных транзисторов являются основными, когда они работают в ключевых и логических схемах.

**Инверсный режим.** Биполярный транзистор является симметричным прибором в том смысле, что область полупроводника с одним типом проводимости располагается между двумя областями с другим типом проводимости. Поэтому транзистор можно включить так, что коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный – в обратном. При этом эмиттер играет роль коллектора, а коллектор – эмиттера. Такой режим работы биполярного транзистора называют *инверсным*. Однако коллектор и эмиттер изготавливают неодинаковыми (см. рис. 12.2), с тем, чтобы наибольшее усиление достигалось в активном режиме. В инверсном режиме усиление транзистора невелико. Такой режим используют в некоторых цифровых схемах.

## 2. Вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов

Рассмотрим транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером (рис. 12.3). Название «схема с общим эмиттером» объясняется тем, что эмиттер является общим для входной и выходной цепей. Входными величинами являются напряжение база-эмиттер  $U_{бэ}$  и ток базы  $I_б$ , а выходными – напряжение коллектор-эмиттер  $U_{кэ}$  и ток коллектора  $I_к$ .

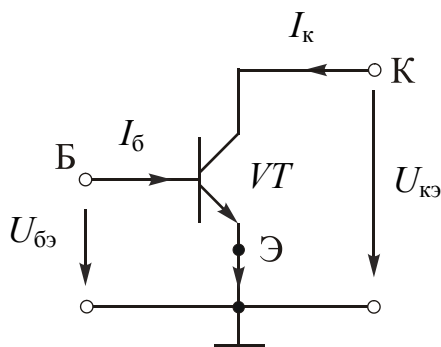


Рис. 12.3

Рассмотрим вольт-амперные характеристики биполярного транзистора и укажем на них области отсечки, насыщения и усиления.

*Входная характеристика* биполярного транзистора – это зависимость тока базы  $I_б$  от

напряжения база-эмиттер  $U_{бэ}$  при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер  $U_{кэ}$ :

$$I_{б} = f(U_{бэ})U_{кэ} = \text{const}.$$

Входная характеристика кремниевого биполярного транзистора показана на рис. 12.4, а. Если эмиттерный переход смещён в прямом направлении, то входная характеристика похожа на прямую ветвь ВАХ диода.

*Выходной характеристикой* называют зависимость тока коллектора  $I_{к}$  от напряжения коллектор-эмиттер  $U_{кэ}$  при фиксированном токе базы:

$$I_{к} = f(U_{кэ})I_{б} = \text{const}.$$

Выходная характеристика показана на рис. 12.4, б. Область отсечки лежит ниже кривой  $I_{б} = 0$ . В области насыщения величина напряжения  $U_{кэ}$  столь мала, что становится недостаточной для создания обратного смещения на коллекторном переходе. В режиме насыщения ток коллектора не зависит от тока базы и все ветви выходной характеристики сливаются в одну.

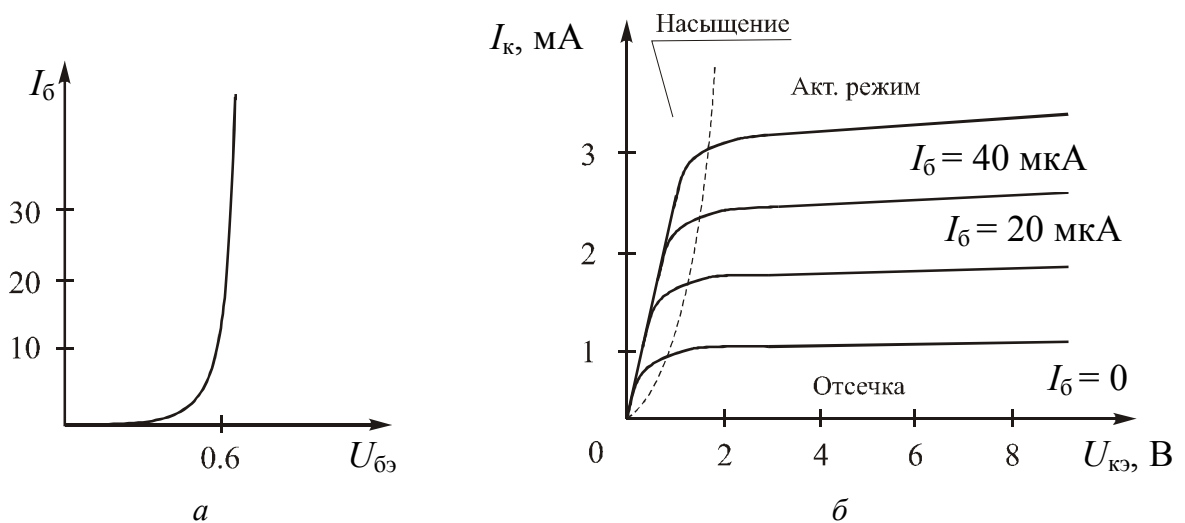


Рис. 12.4

В активной области ток коллектора очень слабо зависит от напряжения коллектор-эмиттер и пропорционален току базы, а ветви выходной характеристики расположены почти горизонтально. Это объясняется тем, что коллекторный переход смещён в обратном направлении. Таким образом, в активном режиме биполярный транзистор ведёт себя как источник тока, управляемый током базы.

Как видно из рис. 12.4, *a*, ток эмиттера и напряжение база-эмиттер связаны экспоненциальной зависимостью, описывающей вольт-амперную характеристику диода, смещенного в прямом направлении:

$$I_{э} = I_{э0} e^{U_{бэ}/Vt} . \quad (12.2)$$

Здесь  $I_{э0}$  – обратный ток эмиттерного перехода. Подставляя выражение (12.2) в формулу (12.1а), получаем связь между током коллектора и напряжением база-эмиттер:

$$I_{к} = \alpha I_{э0} e^{U_{бэ}/Vt} . \quad (12.3)$$

Равенство (12.3) справедливо для активного режима.

Определим теперь, какие предельные значения могут принимать токи и напряжения биполярного транзистора. При рассеянии электрической энергии температура транзистора повышается, что приводит к необходимости ограничивать допустимые уровни токов и напряжений. Величина максимальной мощности ограничивается максимально допустимой температурой прибора (для кремниевых транзисторов 150–200 °С). Она зависит от размеров транзистора, его конструкции и температуры окружающей среды.

В транзисторе, работающем в режиме усиления, подавляющая часть рассеиваемой мощности выделяется в области коллекторного перехода. Ее можно определить по формуле  $P = U_{кэ} I_{к}$ .

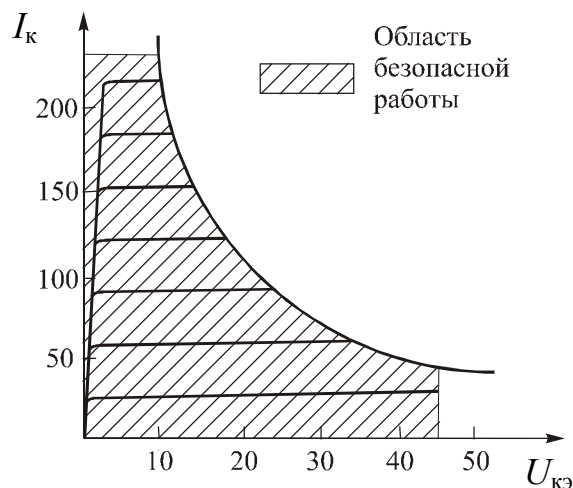


Рис. 12.5

Если рассеиваемую мощность положить равной максимально допустимой, то максимально допустимые значения напряжения тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер можно определить из соотношения:

$$U_{кэ} I_{к} \leq P_{\max} \cdot \quad (12.4)$$

Неравенству (12.4) соответствует гипербола, ограничивающая область допустимых значений  $U_{кэ}$  и  $I_{к}$  (рис. 12.5). Если рабочая точка находится за пределами этой области, возможен тепловой пробой транзистора. При выборе транзистора для конкретной схемы нужно определить, какие величины токов и напряжений следует ожидать в этой схеме, а затем убедиться в том, что найденные значения лежат в области безопасной работы.

Из условия (12.4) можно определить только произведение  $U_{кэ}$  и  $I_{к}$ , а не их предельные значения. Тем не менее существуют ограничения на максимальные значения этих величин. В паспортных данных транзистора указывается максимальный ток  $I_{к\max}$ , превышать который не разрешается. Максимально допустимое значение  $U_{кэ}$  определяется напряжением, при котором происходит лавинный пробой коллекторного перехода.

### 3. Определение рабочей точки транзистора

Рассмотрим схему с общим эмиттером (рис. 12.6). Входным током является ток базы  $I_{б}$ , а выходным – ток коллектора  $I_{к}$ .

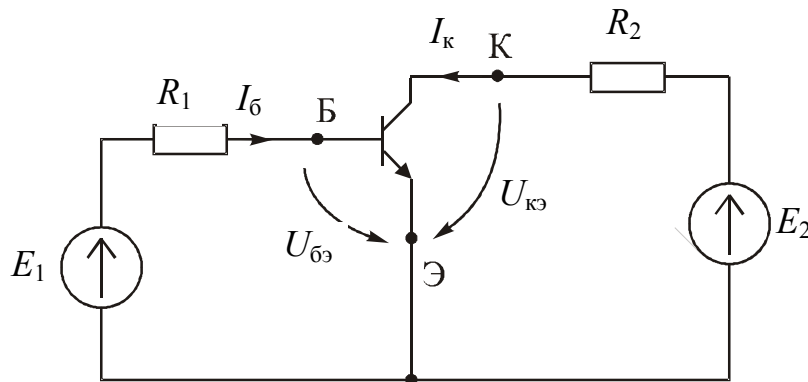


Рис. 12.6

Для определения напряжений и токов транзистора воспользуемся графическим методом. Рабочая точка на входе транзистора (рис. 12.7, а) определяется пересечением нагрузочной прямой линейного двухполюсника, образованного резистором  $R_1$  и источником  $E_1$ , и входной характеристики транзистора  $I_{б} = f(U_{бэ})$ . На рис. 12.7, а пунктиром показаны нагрузочные прямые для случая, когда  $R_1 = 20$  кОм, а напряжение источника  $E_1$  принимает значения 0.4, 0.8, 1.2 и 1.6 В. При увеличении  $E_1$  изменяется и положение рабочей точки. Ток базы увеличивается от 0 до 50 мкА.

Рабочая точка выходной цепи транзистора представляет пересечение нагрузочной прямой двухполюсника  $E_2, R_2$  с ветвью выходной характеристики транзистора  $I_{\text{э}} = f(U_{\text{э-й}})$ , соответствующей определенной величине тока базы (рис. 12.7, б).

Рассмотрим, как изменяется напряжение  $U_{\text{кэ}}$  в зависимости от изменения напряжения источника  $E_1$ . Если  $E_1 < 0.6$  В, ток базы  $I_{\text{б}} \approx 0$  и транзистор находится в режиме отсечки. Рабочая точка определяется пересечением нагрузочной прямой с ветвью выходной характеристики, соответствующей току базы  $I_{\text{б}} = 0$ . Точка пересечения имеет координаты  $I_{\text{к}} = 0$ ,  $U_{\text{кэ}} \approx E_2$  и соответствует режиму отсечки транзистора.

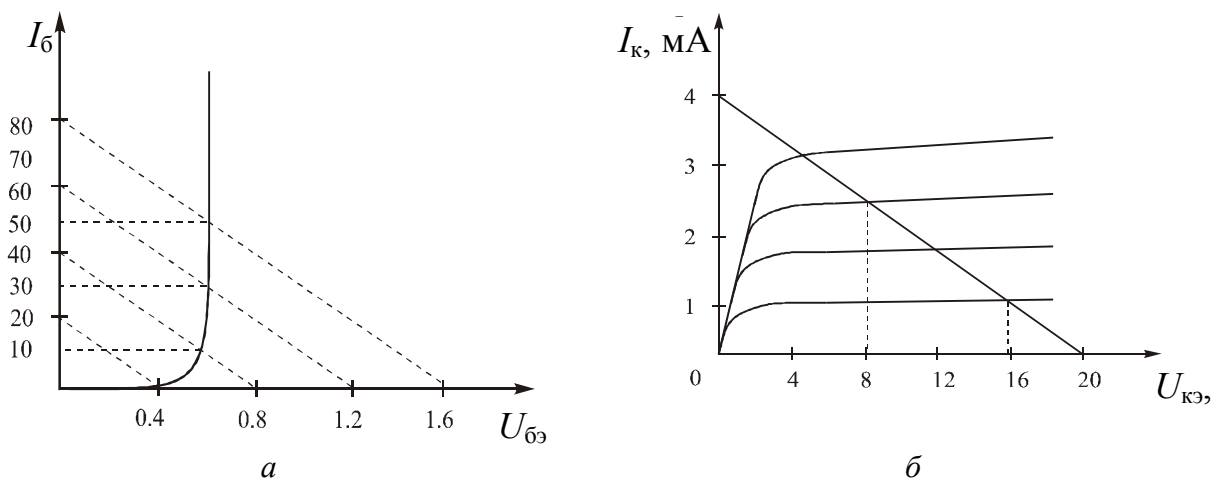


Рис. 12.7

Рабочую точку на выходе цепи найдем на рис. 12.7, б. При увеличении  $I_{\text{б}}$  напряжение коллектор-эмиттер  $U_{\text{кэ}}$  уменьшается до тех пор, пока рабочая точка не попадет в область насыщения, где  $U_{\text{кэ}}$  не зависит от напряжения на входе.

Предположим теперь, что входное напряжение равно сумме постоянной и переменной составляющих:

$$E_1 = E_0 + E_m \sin \omega t.$$



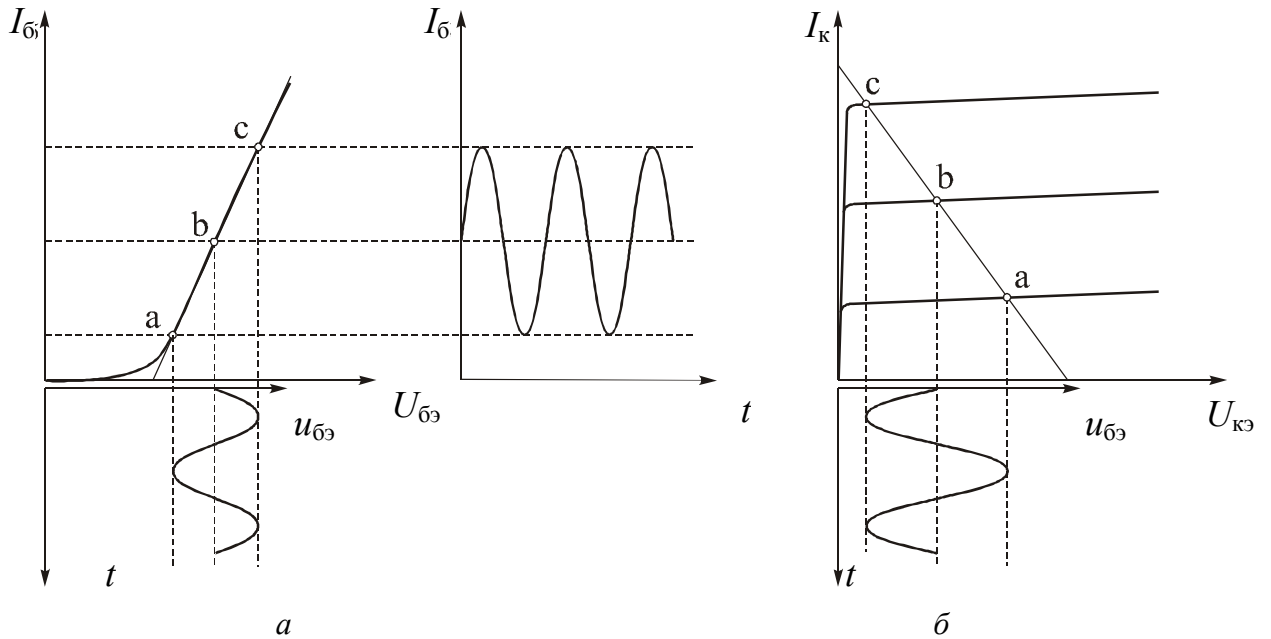


Рис. 12.8

Графики входного и выходного напряжений показаны на рис. 12.8, *а*, *б*. Точки *а*, *б*, *с* на входной характеристике соответствуют точкам *а*, *б*, *с* выходной характеристике. Увеличение входного напряжения вызывает уменьшение выходного, т. е. схема является инвертирующим усилителем.

#### 4. Выводы

1. Биполярный транзистор – трехполюсный полупроводниковый прибор с двумя  $p$ - $n$ -переходами. Он состоит из чередующихся областей полупроводника, имеющих электропроводность различных типов.

2. В зависимости от последовательности чередования  $n$ - и  $p$ -областей различают транзисторы  $n$ - $p$ - $n$ - и  $p$ - $n$ - $p$ -типов. Основными носителями заряда в транзисторе  $n$ - $p$ - $n$ -типа являются электроны, а в  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторе – дырки.

3. Каждый из  $p$ - $n$ -переходов транзистора может быть смещён либо в прямом, либо в обратном направлениях. В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора: активный, отсечки, насыщения и инверсный.

4. Входной характеристикой биполярного транзистора называют зависимость тока базы  $I_{\text{б}}$  от напряжения база-эмиттер  $U_{\text{бэ}}$  при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер.

5. Выходной характеристикой называют зависимость тока коллектора  $I_{\text{к}}$  от напряжения коллектор-эмиттер  $U_{\text{кэ}}$  при фиксированном токе базы.