

Электроника для любознательных.

Часть 3. Биполярные транзисторы.

Транзисторы являются важнейшими полупроводниковыми приборами. Их основная особенность заключается в усилении слабых электрических сигналов. Все транзисторы могут быть разделены на две большие: биполярные и полевые.

1. Биполярный транзистор.

▪ Биполярным транзистором называется полупроводниковый прибор с двумя р-п – переходами, предназначенный для усиления, генерирования электрических колебаний и представляющий собой пластину кремния или германия, состоящую из трёх областей (рис. 1).

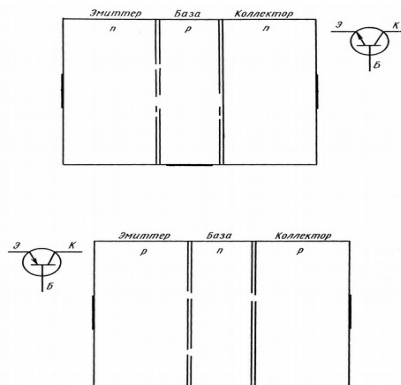


Рис. 1. Биполярные транзисторы.

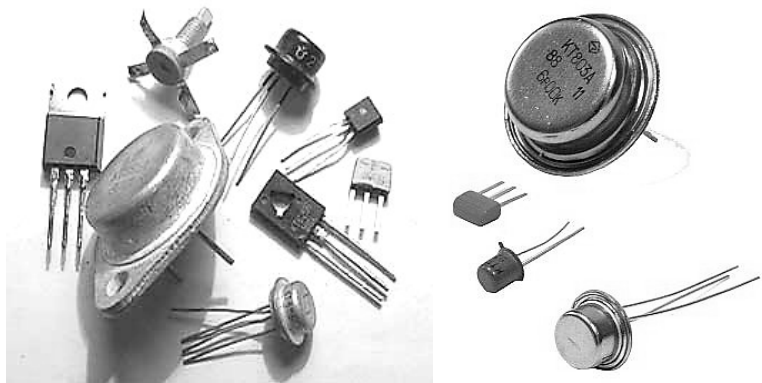


Рис. 2. Общий вид биполярных транзисторов.

Две крайние области всегда имеют одинаковый тип проводимости, а средняя – противоположный тип проводимости.

▪ Транзисторы, у которых крайние области обладают электронной проводимостью, а средний – дырочной, называются транзисторами **n-p-n** типа или **обратными** (рис. 1, а).

▪ Транзисторы, у которых крайние области обладают дырочной, а средняя электронной проводимостями, называются транзисторами **p-n-p** типа или **прямыми** (рис. 1, б).

Обозначения на схемах этих двух типов транзисторов представлены на рис. 1.

Общий вид биполярных транзисторов представлен на рис. 2.

На рис. 3 показано устройство маломощных биполярных транзисторов.

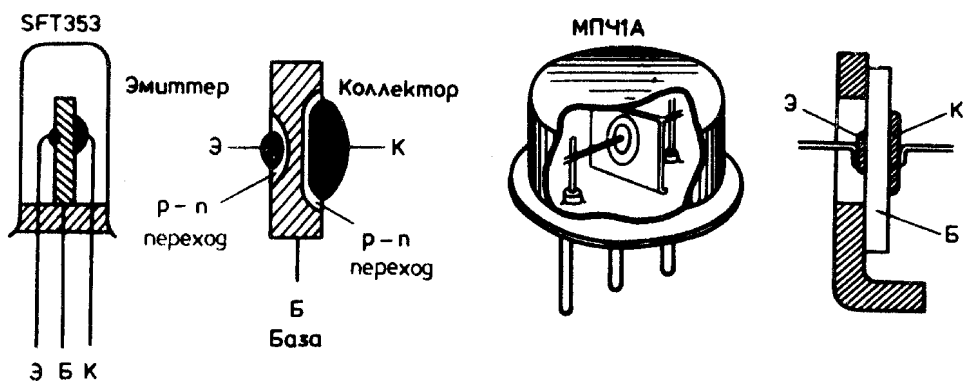


Рис. 3. Устройство маломощных биполярных транзисторов.

Основную часть транзистора представляет маленький кристаллик, называемый **базой (Б)**, на котором сделаны две спайки, называемые **эмиттер (Э)** и **коллектор (К)**.

При образовании этих спаек между эмиттером и базой, и между коллектором и базой образуются два **p-n** перехода. Очень важно запомнить, что площадь коллекторного перехода больше площади эмиттерного и, кроме этого, оба перехода находятся очень близко друг к другу, т. е., база очень тонкая, примерно **1 – 20 мкм**.

Для предохранения от внешних влияний транзистор герметически закрыт в металлическом или пластмассовом корпусе.

В транзисторах оба перехода расположены очень близко друг к другу и между ними имеется взаимодействие. Это взаимодействие называется ещё **транзисторным эффектом** и ему обязаны усилительными свойствами биполярные транзисторы (**рис. 3**).

2. Работа биполярного транзистора.

Транзистор состоит из двух переходов. Один **p-n** переход эмиттер – база (его ещё называют **управляющим**) включён в **прямом направлении**.

Другой **p-n** переход (его называют **управляемым**) включён в **обратном направлении** (**рис. 4**).

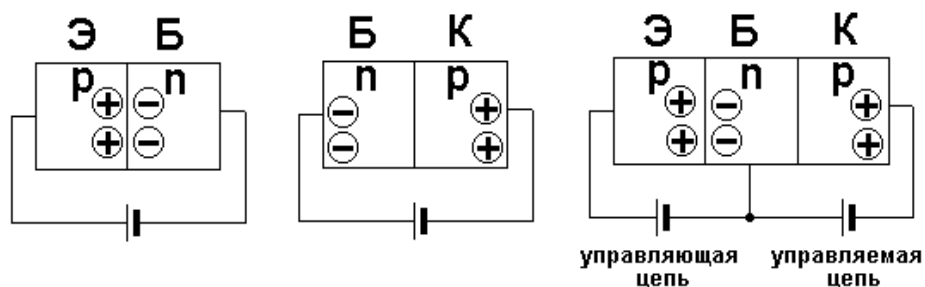


Рис. 4. Совмещение двух p-n переходов в один транзистор.

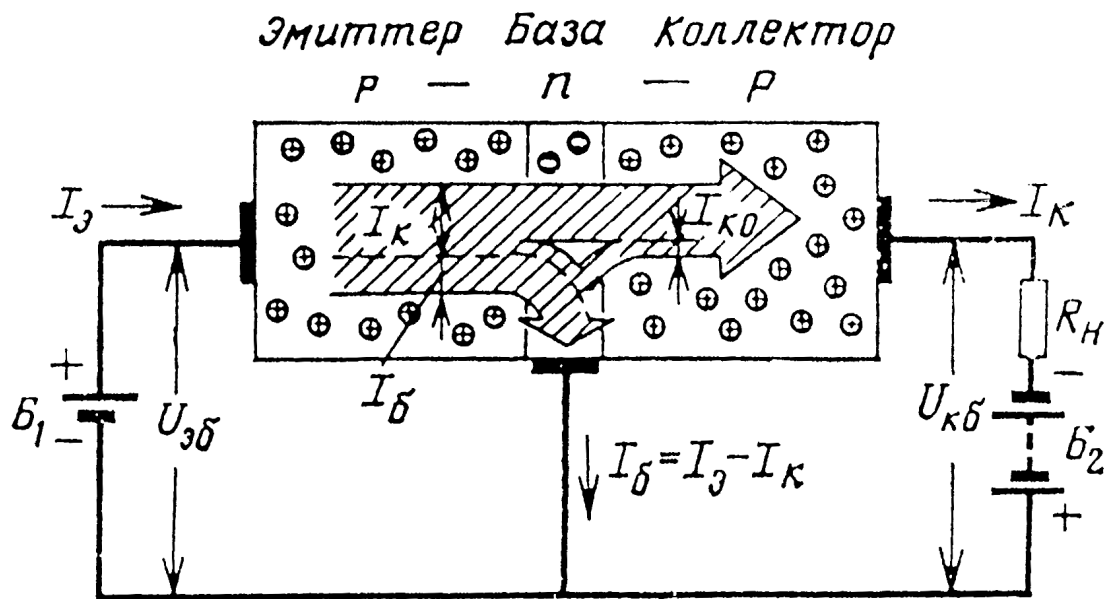


Рис. 5. Работа транзистора.

- **Напряжение между эмиттером и базой ($U_{эб}$)** – для маломощных транзисторов не превышает нескольких долей вольта **0,1 – 0,4 В** в германиевых, **0,4 – 0,8 В** в кремниевых, иначе эмиттерный переход будет разрушен.

- **Напряжение между коллектором и базой ($U_{кб}$)** – для маломощных транзисторов **6 – 24 В**, так как, коллекторный переход включён в обратном направлении (сопротивление перехода большое) и через переход идёт небольшой обратный ток.

Рассмотрим работу транзистора (рис. 5).

В первом **p-n** переходе (эмиттер – база) соотношение концентрации примесей в полупроводнике, из которого выполнена эмиттерная **p-область** и базовая **n-область**, выбирается таким образом, чтобы количество дырок в единице объёма в **p-области** значительно превосходило количество электронов в **n-области**.

Во второй **p-области** «дырки» под действием электрического поля, созданного напряжением источника, перешли от **p-n** перехода в противоположную сторону. Значит, область около перехода зарядится отрицательно (рис. 5).

В «p» и «n» областях имеется много нейтральных атомов, которые под действием тепла могут терять свои электроны, становясь «дырками». Значит в **p-области** имеются свободные электроны, а в **n-области** — «дырки», которые движутся в противоположном направлении, чем основные носители.

Такие заряды, как вы уже знаете, называются **неосновными**.

Эти неосновные заряды создают так называемые **обратные токи**, которые значительно меньше, чем прямой ток, так как, количество неосновных носителей небольшое.

При включении транзистора (рис. 5.) дырки (**основные носители**) устремляются в **n-область**, так как, электронов в **n-области** значительно

меньше, то небольшая часть нейтрализуется и уходит в цепь питания (I_b – ток базы). Основная же масса захватывается полем последней **p-области** (отрицательный заряд) и попадает в коллектор ($I_c = I_e - I_b$).

Однако, так как, второй **p-n** переход включён в обратном направлении, то к коллекторному току добавляется ток из неосновных носителей, который называется **обратным коллекторным током** ($I_{к0}$) и который течёт в направлении противоположном основному коллекторному (**рис. 5**).

3. Схемы включения биполярных транзисторов.

Чтобы подключить любую схему нужно иметь два входных проводника и два выходных. Всего 4 вывода. У транзистора 3 вывода и для подключения его в схему нужно один какой-нибудь вывод подключить как на вход, так и на выход. Тогда у транзистора будет 4 вывода.

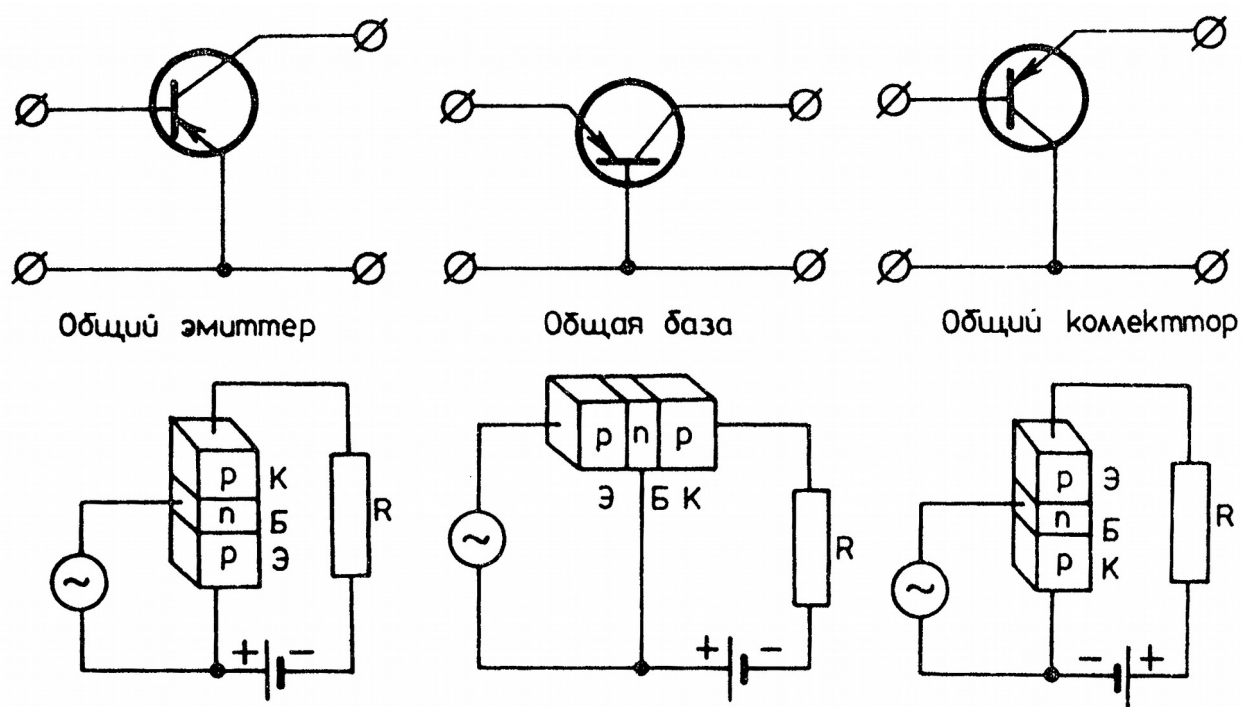


Рис. 6. Три основные схемы включения биполярного транзистора.

Такой вывод и называется **общим выводом: общая база (ОБ), общий эмиттер (ОЭ) и общий коллектор (ОК)**.

При всех таких включениях транзистор усиливает, однако, имеются и особенности (**рис. 6**).

Качество электронных усилителей зависит не только от того, во сколько раз он усиливает, но и от его **входного** и **выходного сопротивления** (этот вопрос мы рассмотрим попозже).

Каждая из схем включения транзистора имеет свои достоинства и недостатки.

ОЭ	ОБ	ОК
Входной сигнал действует между базой и эмиттером, а нагрузка между коллектором и эмиттером.	Входной сигнал действует между эмиттером и базой, а нагрузка включена между коллектором и базой.	Эмиттерный повто-ритель. Входной сигнал поступает на управляющий переход эмиттер – база, проходя через нагрузку, а сама нагрузка включается между эмиттером и коллектором.
Эта схема усиливает и по напряжению и по току. Её входное и выходное сопротивления не очень велики.	Эта схема усиливает только по напряжению и имеет малое входное сопротивление и большое выходное	Эта схема усиливает поток. Её входное сопротивление велико, а выходное мало.

4. Основные параметры биполярных транзисторов.

Основными параметрами являются: **обратный коллекторный ток $I_{КБ0}$** , коэффициент усиления β , коэффициент усиления α .

4.1. Обратный коллекторный ток.

Чтобы измерить обратный коллекторный ток нужно избавиться от прямого коллекторного тока, т. е., отключить эмиттер (**рис. 7**).

Обратный коллекторный ток ещё обозначается $I_{КБ0}$. Этот ток очень мал. Например, в германиевых маломощных транзисторах он равен **1 – 30 мкА**, а кремниевых **1 мкА**.

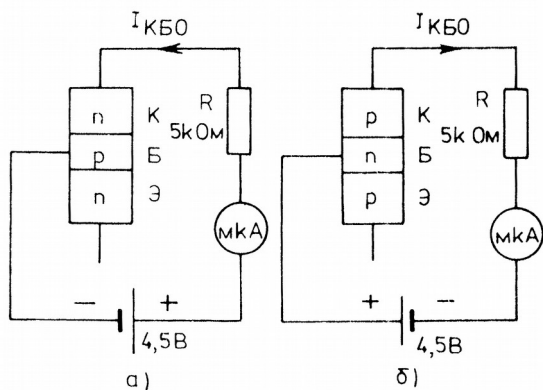


Рис. 7. Обратный коллекторный ток.

Обратный коллекторный ток с повышением температуры сильно возрастает – на каждые **10°C** его величина **удваивается**. Но большая «беда» вызвана не столько его возросшим значением, сколько тем фактором, что часть неосновных носителей попадает в базу и **увеличивает базовый ток**, вызывающий рост коллекторного тока. Это может привести к выходу транзистора из строя.

Для уменьшения температурной нестабильности транзистора применяют следующее:

— Используют транзисторы с наименьшим обратным током. **В этом отношении кремневые транзисторы лучше германиевых.**

— Используют такие схемы, которые отклоняют обратный ток во внешние цепи, а через управляющий переход протекает возможно меньшая часть.

— Используют дополнительные средства (отрицательную обратную связь и прочее), которые улучшают температурную стабильность.

4.2. Коэффициент усиления β .

На рис. 8 представлена схема для определения коэффициента усиления по току β в схеме с ОЭ. Здесь через источник тока E_1 (например, регулируемый выпрямитель) можно подать различный базовый ток и учитывать соответствующий коллекторный ток.

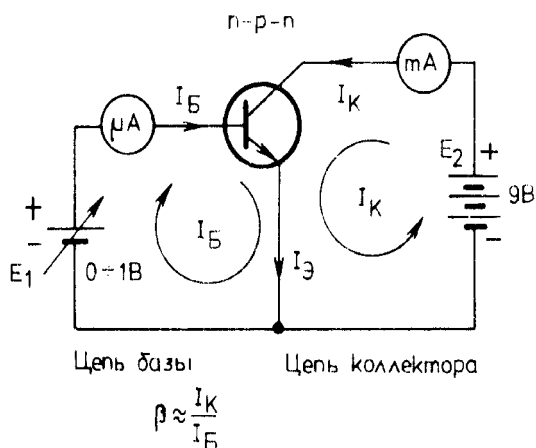


Рис. 8. Коэффициент усиления β .

Число, показывающее во сколько раз коллекторный ток больше базового, обозначается буквой β или $h_{21э}$ и называется коэффициентом усиления по току в схеме с ОЭ.

Следовательно, можем записать:

$$\beta = I_C / I_B$$

Коэффициент β является основным параметром транзисторов и приводится в справочниках. Обычно $\beta = 30 - 300$, но есть и такие, где $\beta = 1000$.

4.3. Коэффициент усиления α .

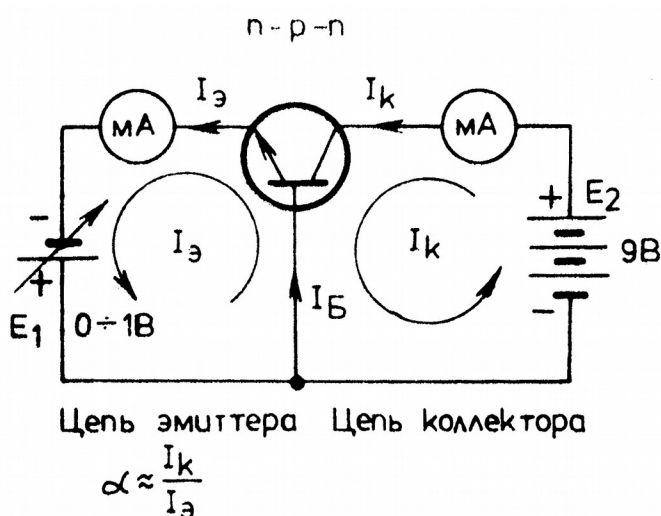


Рис. 9. Коэффициент α .

Свойства схемы с ОБ можно исследовать, собрав схему, показанную на рис. 9. Число, показывающее во сколько раз коллекторный ток больше эмиттерного, обозначается буквой α или $h_{21б}$ и называется коэффициентом усиления по току в схеме с ОБ.

$$\alpha = I_C / I_E$$

Обычно, $\alpha = 0,95 - 0,998$.

4.4. Другие параметры биполярных транзисторов.

Наиболее важные параметры, которые характеризуют свойства транзисторов, и указываются в справочниках, следующие:

1. Вид материала (германий или кремний).
2. Вид проводимости (р-п-р или п-р-п).
3. Статический коэффициент усиления по току β в схеме с ОЭ.
4. Статический коэффициент усиления по току α в схеме с ОБ.
5. Обратный коллекторный ток $I_{кбо}$.

6. Максимально допустимое коллекторное напряжение $U_{кб\ макс}$.

Это наибольшее напряжение между коллектором и базой в обратном направлении, которое может выдержать коллекторный переход продолжительное время при открытом эмиттере без наступления пробоя.

7. Максимальное допустимое коллекторное напряжение $U_{кб\ макс}$.

Это наибольшее напряжение между коллектором и эмиттером, которое может выдержать транзистор при условии, что база связана через определённое сопротивление с эмиттером.

8. Максимальная мощность, рассеиваемая на коллекторе $P_{к\ макс}$.

Это наибольшая мощность, которую транзистор может рассеять в окружающее пространство в виде тепла при максимальном допустимом нагреве (70°C для германиевых и 150°C для кремниевых).

Обратите внимание, что подаваемая на транзистор электрическая мощность $P = U_{к} * I_{к}$ ни в коем случае не должна превышать максимальную мощность $P_{к\ макс}$, которую он может рассеивать.

9. Максимально допустимый коллекторный ток $I_{к\ макс}$.

Это наибольший коллекторный ток, который нельзя превышать ни при каких условиях.

10. Граничная частота транзистора f .

Это частота, при которой транзистор перестает усиливать.

11. Коэффициент шума $F_{ш}$.

Этот коэффициент характеризует собственный шум транзистора.

5. Графические характеристики биполярных транзисторов.

Выражают связь между напряжениями и токами в транзисторе. Они делают наглядным и дают возможность легко и быстро определить величину этих напряжений и токов. По ним легко находят входное и выходное сопротивления транзистора по переменному току, важные для согласования отдельных транзисторных каскадов.

Бывают двух видов характеристики: **входные** и **выходные**.

5.1. Входные характеристики биполярного транзистора.

Как видно из **рис. 10** входные характеристики определяют связь между входным напряжением и входным током. По ним видно, например, напряжение база – эмиттер в германиевых транзисторах не превышает **0,4 В**, а в кремниевых – не превышает **0,8 В**.

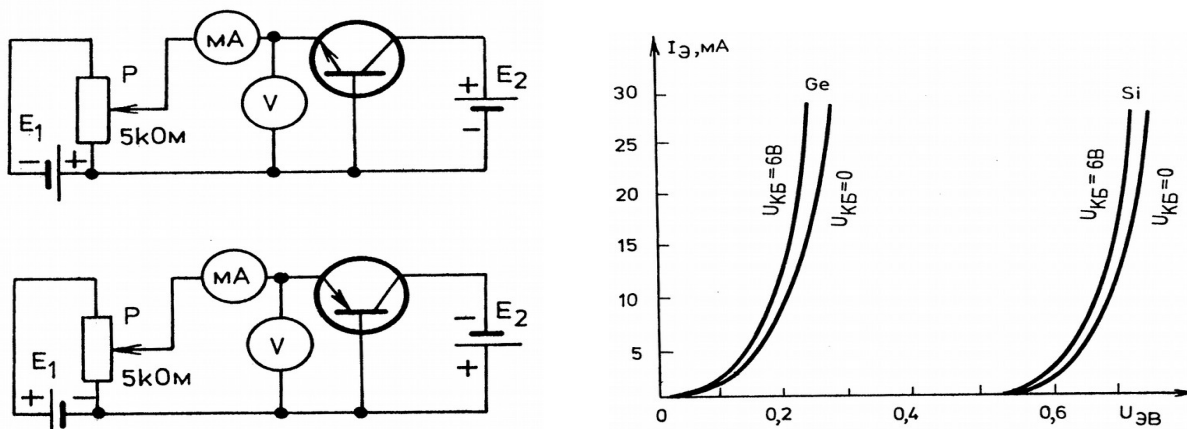


Рис. 10. Входные статические характеристики в схеме с ОБ и схемы для снятия этих характеристик.

При превышении этих входных напряжений токи, проходящие через транзистор, могут стать недопустимо большими и могут привести к неисправности.

Рассмотрим входную характеристику транзистора МП 42Б (**рис. 11**).

В точке **Б** при входном напряжении **0,2 В** ток базы будет **0,12 мА** или **120 мкА** (**рис. 11, а**). По входным характеристикам можно определить **входное сопротивление транзистора по постоянному току**. Для этого используем закон Ома для значений тока и напряжения в данной точке **Б**:

$$R = U/I = 0,2 \text{ В} / 120 \times 10^{-6} \text{ А} = 1 \text{ 666 } \Omega.$$

Для нахождения **входного сопротивления по переменному току** используем закон Ома в так называемой **дифференциальной** форме, где ΔU и ΔI малые приращения напряжения и тока (**рис. 11, б**):

$$\Delta R = \Delta U / \Delta I$$

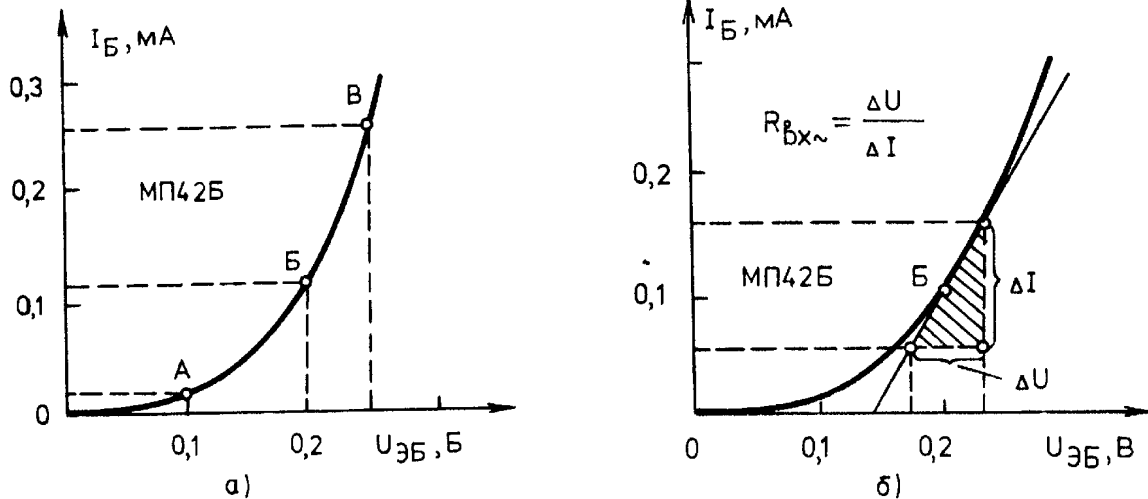


Рис. 11: а). Входная статическая характеристика в схеме с ОЭ;
 б). Определение входного сопротивления транзистора по переменному току в точке Б.

$$\begin{aligned} \Delta U &= 0,225 \text{ В} - 0,175 \text{ В} = 0,05 \text{ В} \\ \Delta I &= 160 \text{ мкА} - 60 \text{ мкА} = 100 \text{ мкА} \\ \Delta R &= 0,05 \text{ В} / 100 \times 10^{-6} \text{ А} = 500 \text{ Ом} \end{aligned}$$

▪ Входное сопротивление транзистора по переменному току зависит от выбранной точки на характеристике (чем круче участок характеристики, тем меньше входное сопротивление по переменному току транзистора).

5.2. Выходные характеристики биполярного транзистора.

Выходные характеристики биполярных транзисторов выражают зависимость коллекторного тока I_k от выходного напряжения U_k (при определённом базовом токе $I_б$).

На рисунке (рис. 12) представлены семейство выходных характеристик транзистора МП 42Б.

Как видно из характеристик коллекторный ток только резко растёт при напряжении $U_{к} = 0,4 - 0,8 \text{ В}$, а после чего растёт незначительно, однако сильно зависит от тока базы.

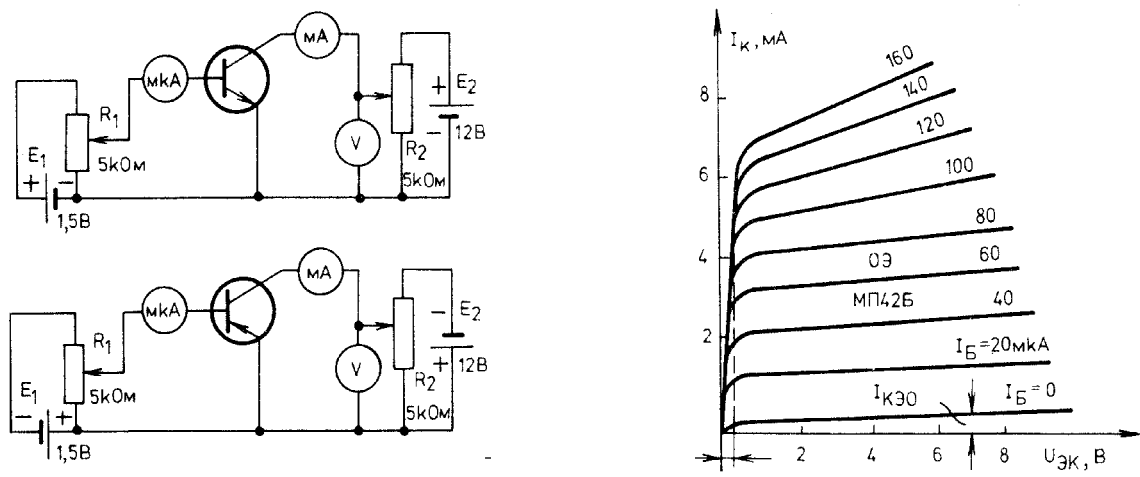
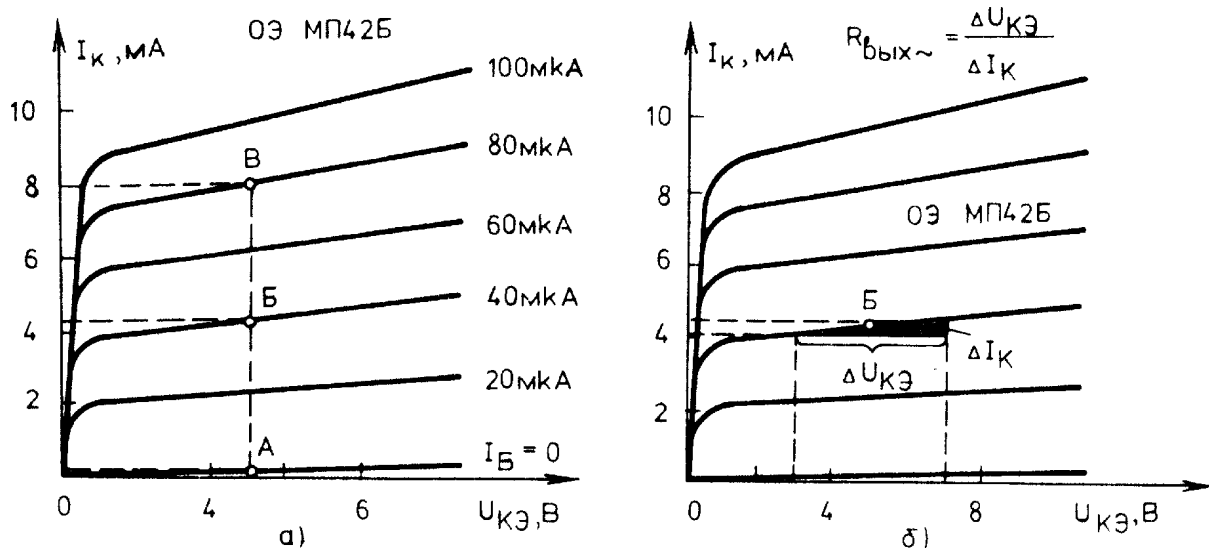


Рис. 12. Выходные статические характеристики в схеме с ОЭ и схемы для снятия этих характеристик.

Точно также можно найти по выходным характеристикам выходное сопротивление транзистора по постоянному (рис. 13, а) и переменному токам (рис. 13, б).



Р

рис. 13: а). В точках А, Б, и В коллекторное напряжение неизменно 4,6 В, а коллекторный ток различен; **б).** Определение выходного сопротивления транзистора по переменному току в точке Б.

В точке **Б**, при $U_{кэ} = 4,6 \text{ В}$ и токе базы 40 мкА , коллекторный ток — $I_{к} = 4,3 \text{ мА}$, а выходное сопротивление по постоянному току будет равно:

$$R = U_{кэ} / I_{к} = 4,6 \text{ В} / 4,3 \times 10^{-3} \text{ А} = 1070 \text{ Ом.}$$

По переменному току (рис. 13, б):

$$\Delta U_{кэ} = 7 - 3 = 4 \text{ В}$$

$$\Delta I_{к} = 4,5 \text{ мА} - 4,4 \text{ мА} = 0,1 \text{ мА}$$

$$\text{Тогда, } \Delta R = \Delta U_{кэ} / \Delta I_{к} = 4 \text{ В} / 0,1 \times 10^{-3} \text{ А} = 40\,000 \text{ Ом}$$

Можно по входным и выходным характеристикам решать и такую задачу. Допустим нам нужно, чтобы какое-то устройство срабатывало от коллекторного тока равного **8 мА**.

Какие нужно подать входное и выходное напряжения, чтобы транзистор выдавал коллекторный ток 8 мА?

По выходной характеристике (**рис. 13, а**) находим коллекторный ток I_k равный **8 мА**. Опускаем перпендикуляр на характеристику и находим точку **В**.

Из точки **В** опускаем перпендикуляр и находим напряжение эмиттер–коллектор равное **4,6 В**. Точка **В** лежит на кривой соответствующей току базы **80 мкА**.

По входной характеристике точно также находим входное напряжение транзистора.