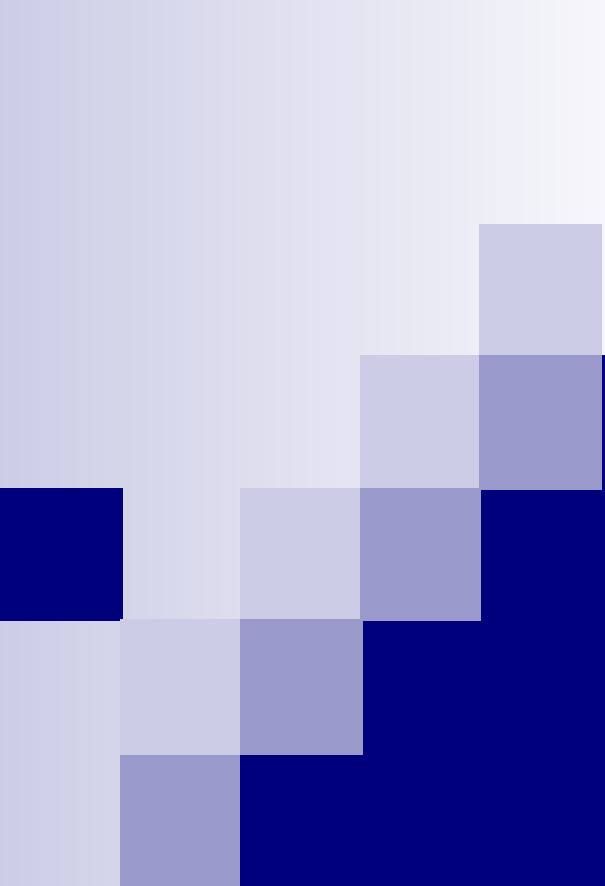
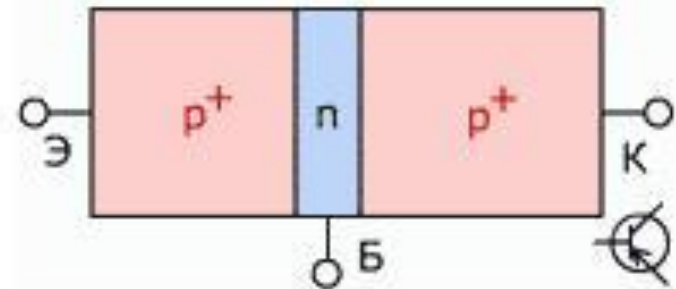




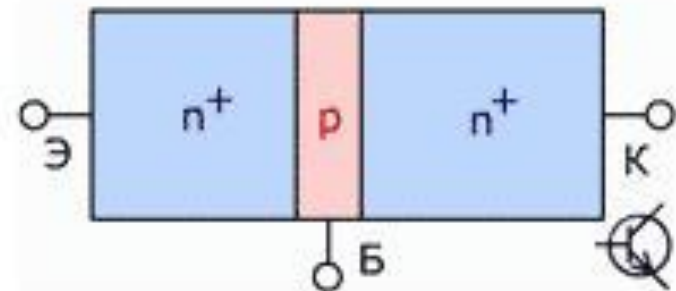
Биполярный транзистор

Введение

- Биполярными транзисторами называются полупроводниковые приборы с двумя очень близко расположенными и взаимодействующими p-n переходами, включенными встречно. В простейшем случае транзистор представляет собой кристалл полупроводника, в котором имеются две сильно легированные области с одноименной проводимостью (эмиттер и коллектор), разделенные узкой областью с противоположной проводимостью (базой).
- В зависимости от последовательности чередования областей проводимости, различают прямые (p-n-p) и обратные (n-p-n) транзисторы.



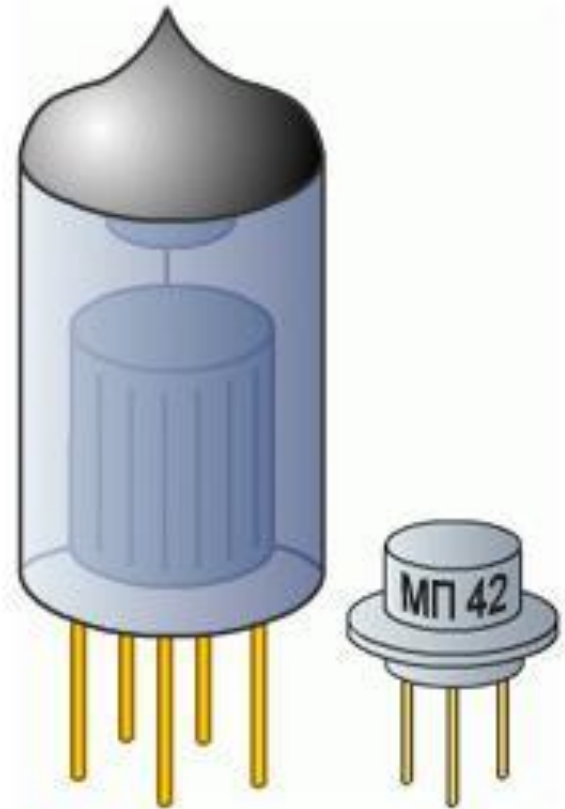
Прямой (p-n-p) транзистор



Обратный (n-p-n) транзистор

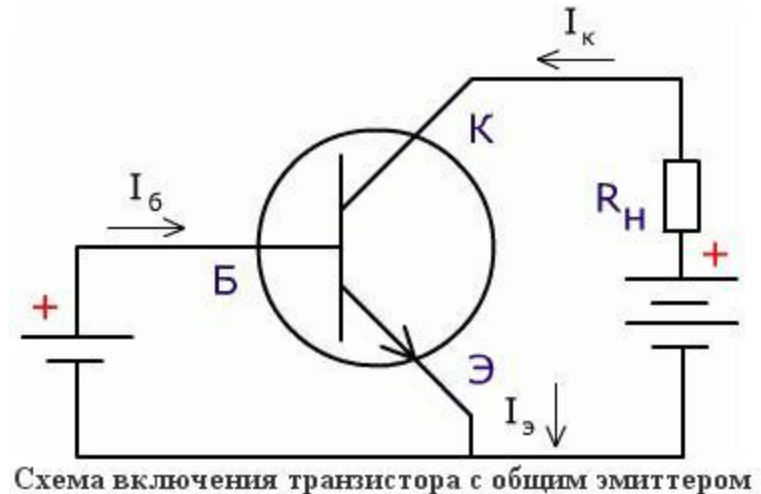
От лампы к транзистору

До изобретения транзистора в радиотехнике в качестве усилительных приборов широко использовались трехэлектродные лампы – триоды. Управляющим элементом в лампах была сетка, которая своим электрическим полем могла замедлять (или ускорять) электроны, испущенные катодом. Таким образом, в лампах напряжение на сетке управляло напряжением на аноде. Лампы были очень громоздкими и потребляли большую мощность (так как для испускания электронов катодом требовался его нагрев) и имели сравнительно короткий срок службы (испарение катода). Поэтому в 1948 году, после изобретения транзисторов, они почти повсеместно были ими вытеснены. Транзисторы были гораздо миниатюрнее ламп, им требовался очень низкий ток для эмиттирования электронов, и служили они гораздо дольше. Транзисторы совершили переворот в мире радиоэлектроники.



Принцип действия биполярного транзистора

Работа биполярного транзистора n-p-n типа (схема с общим эмиттером) происходит следующим образом. Между верхней и нижней областями прикладывается напряжение E_k . При этом вне зависимости от его полярности ток протекать не будет, так как транзистор представляет собой как бы два включенных навстречу друг другу диода, один из которых всегда оказывается включенным в запирающем направлении.



Для того, чтобы через транзистор протекал ток, нужно: или открыть запертый n-p переход, или в верхней n-области создать вблизи перехода избыток дырок, или в средней p-области создать избыток электронов, которые также беспрепятственно смогут преодолеть запертый p-n переход.

Усилительные свойства биполярного транзистора

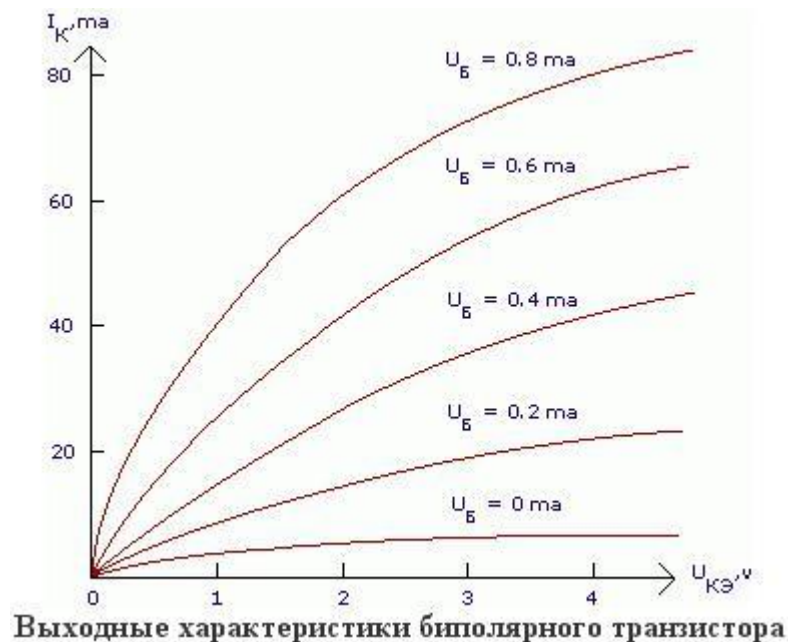
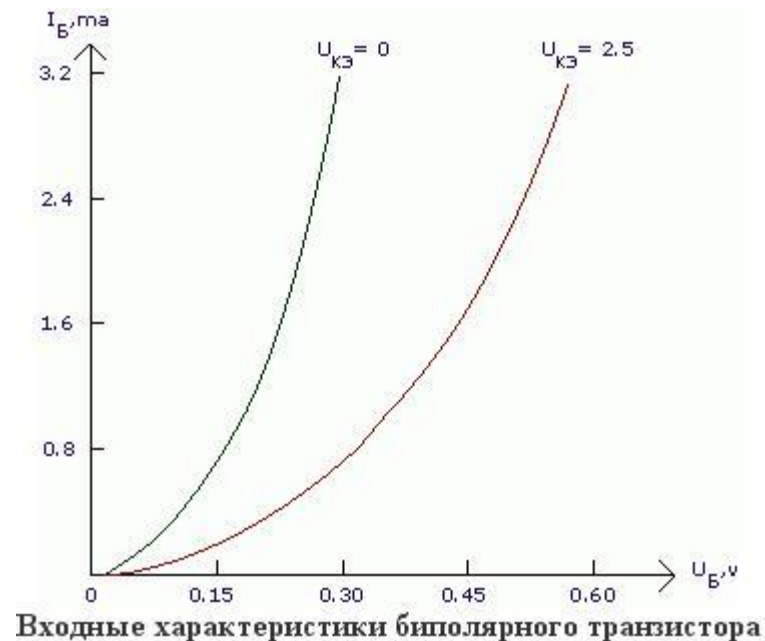
За счет того, что напряжение, необходимое для отпирания транзистора – это напряжение компенсации запирающего действия нижнего р-п перехода мало по сравнению с напряжением между эмиттером и коллектором, а также ток, необходимый для поддержания открытого состояния мал по сравнению с током в цепи эмиттер-коллектор, транзистор может быть использован в качестве усилительного элемента.



Основные характеристики биполярного транзистора

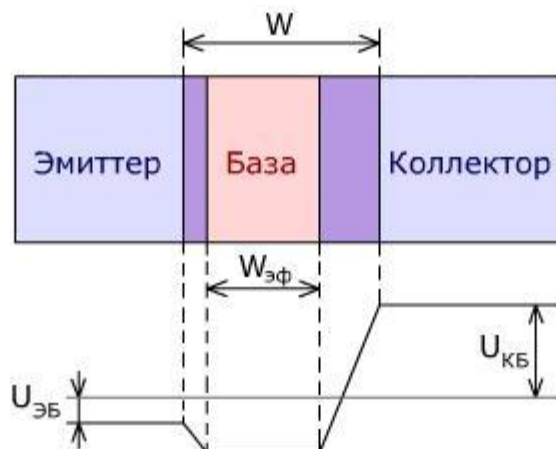
$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}$$

$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$



Эффект Эрли (модуляция ширины базы)

Эмиттер и коллектор в биполярном транзисторе легированы значительно сильнее, чем база. В следствие этого практически вся область пространственного заряда сосредоточена в базовой р-области. Увеличение положительного напряжения на коллекторе расширяет обедненный слой коллекторного перехода и, следовательно, вызывает уменьшение эффективной толщины базы. Модуляция толщины базы объясняет некоторый подъем выходных характеристик при увеличении положительного напряжения коллектор-база. Коллекторный ток при этом увеличивается, так как меньшая часть дырок теряется в базе не пути от эмиттера к коллектору вследствие рекомбинации с электронами.



Эффект Эрли: обедненные слои в транзисторе и потенциальная диаграмма

Схема включения транзистора с общей базой

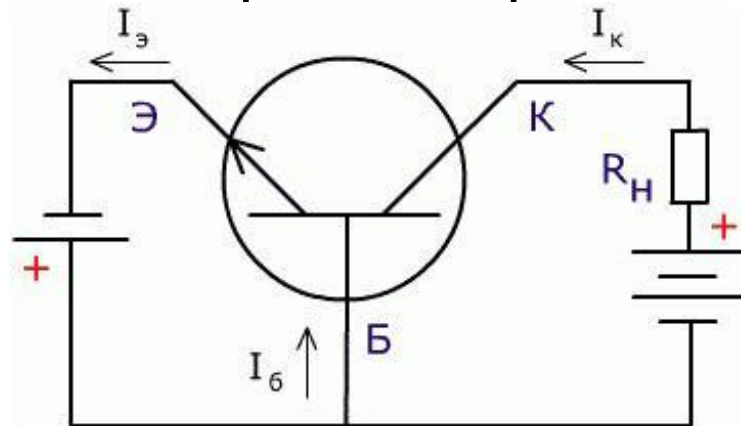


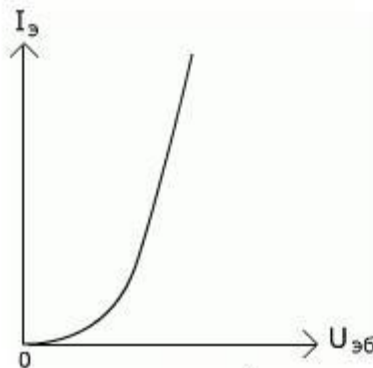
Схема включения биполярного транзистора с общей базой

$$1) \alpha = \frac{dI_K}{dI_E} = \frac{d(I_{nK} + I_{pK})}{d(I_{nE} + I_{pE})}$$

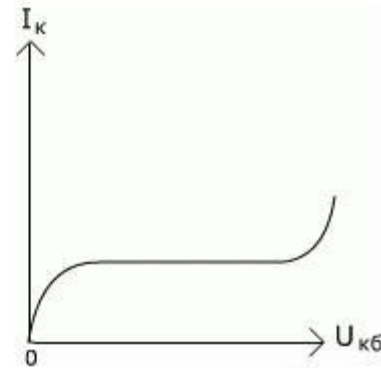
$$2) J_E = \frac{J_{ns}}{\text{sh}(W/L_p)} \left\{ \left\langle \exp\left(\frac{eU_{ЭБ}}{kT}\right) - 1 \right\rangle \text{ch}(W/L_p) - \left\langle \exp\left(\frac{eU_{КБ}}{kT}\right) - 1 \right\rangle \right\} - J_{ps} \left\langle \exp\left(\frac{eU_{ЭБ}}{kT}\right) - 1 \right\rangle$$

Если $U_{КБ} = 0$, то $I_E \approx \left\langle \exp\left(\frac{eU_{ЭБ}}{kT}\right) - 1 \right\rangle$:

$$3) J_E = \frac{J_{ns}}{\text{sh}(W/L_p)} \left\{ \left\langle \exp\left(\frac{eU_{ЭБ}}{kT}\right) - 1 \right\rangle - \left\langle \exp\left(\frac{eU_{КБ}}{kT}\right) - 1 \right\rangle \text{ch}(W/L_p) \right\} - J_{ps} \left\langle \exp\left(\frac{eU_{КБ}}{kT}\right) - 1 \right\rangle$$



Входная характеристика биполярного транзистора в схеме с общей базой при $U_{КБ} = 0$



Выходная характеристика биполярного транзистора в схеме с общей базой при $I_E = 0$

Схема включения транзистора с общим эмиттером

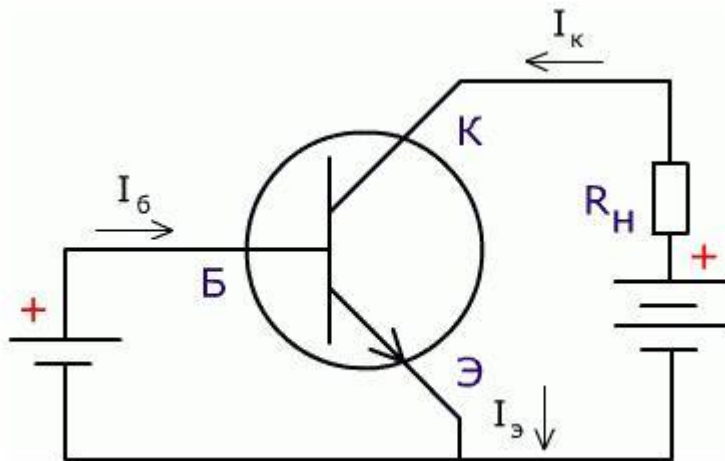


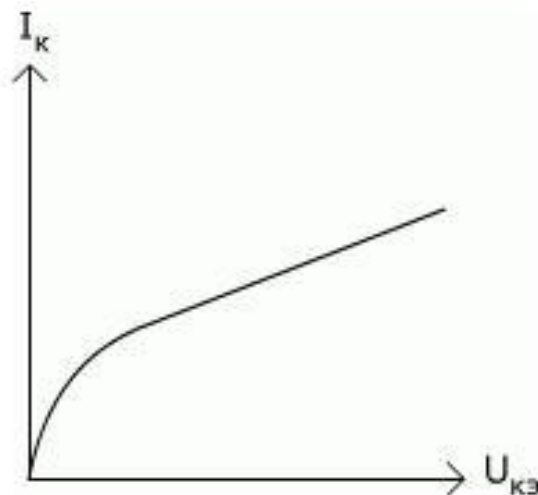
Схема включения биполярного транзистора с общим эмиттером

$$4) \beta = \frac{dI_K}{dI_6}$$

$$5) I_6 = I_Э - I_K$$

$$6) \beta = \frac{dI_K}{dI_Э} / \left\{ 1 - \frac{dI_K}{dI_Э} \right\} = \frac{\alpha}{(1-\alpha)}$$

$$7) I_6 = (1-\alpha) I_Э - I_K$$



Выходная характеристика биполярного транзистора в схеме с общей базой при $I_6=0$

Схема включения транзистора с общим коллектором

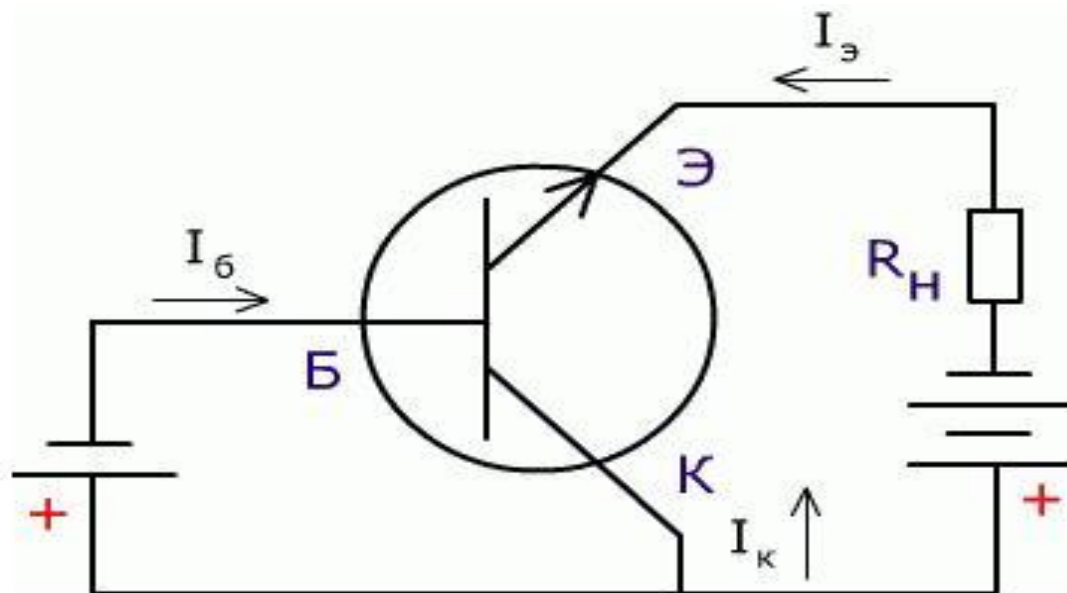


Схема включения биполярного транзистора с общим коллектором

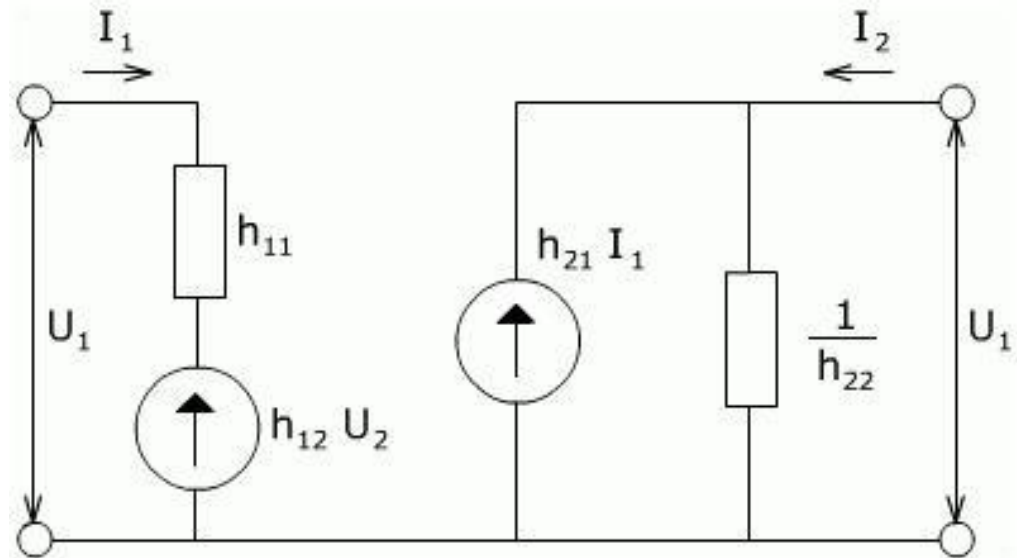
В этой схеме включения также, как в предыдущем случае управляющим (или входным) является ток базы, но роль выходного играет ток эмиттера:

Схема включения биполярного транзистора с общим коллектором

Входной ток в этом случае не зависит от входного напряжения. Выходные характеристики такие же, как и при включении транзистора в схеме с общим эмиттером.

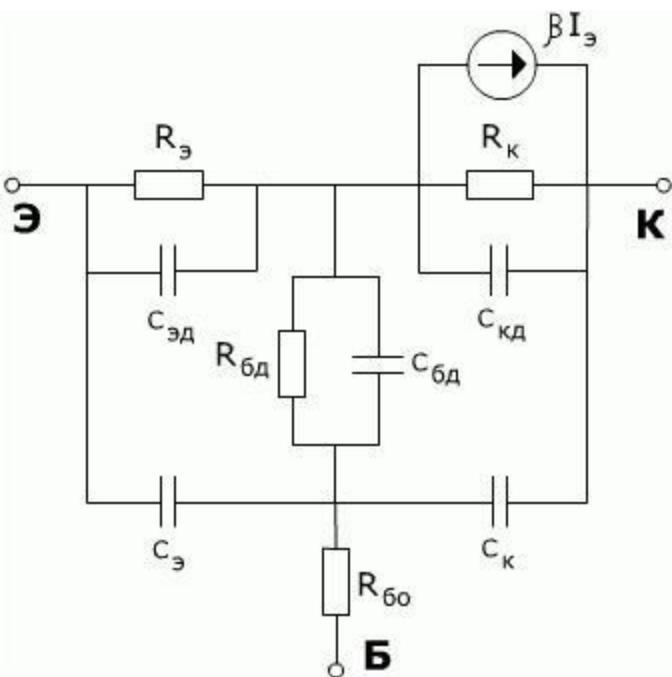
h-параметры

Параметр h_{11} является входным сопротивлением транзистора при его короткозамкнутом выходе для переменного тока. Параметр h_{12} представляет собой коэффициент обратной связи по переменному напряжению. Параметр h_{21} является коэффициентом передачи тока при короткозамкнутом для переменного тока выходе. Наконец, параметр h_{22} равен выходной проводимости транзистора при разомкнутом для переменного тока входе.

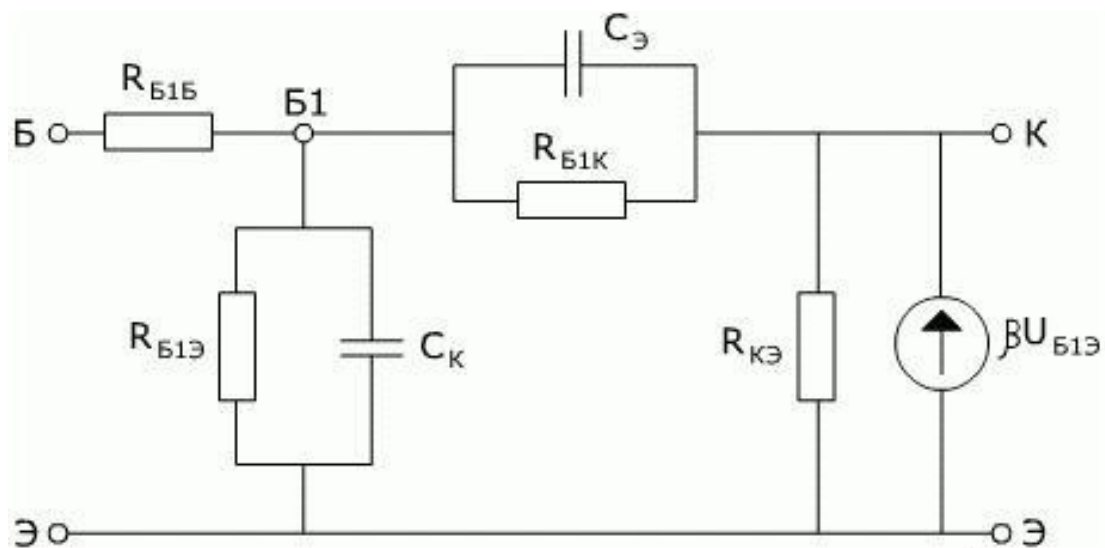


Эквивалентная схема транзистора с h-параметрами

Эквивалентная схема биполярного транзистора



Эквивалентная схема биполярного транзистора (включение с общей базой)



Гибридная Π -образная эквивалентная схема биполярного транзистора (включение с общим эмиттером) – схема Джиаколетто.

Применение биполярного транзистора

Применение биполярных транзисторов повсеместно. Их используют в качестве электронных ключей, в генераторах, усилителях, стабилизаторах. Также они могут применяться в качестве логических элементов в вычислительной технике (особенно это было раньше, до изобретения интегральных схем, когда вся логика была на транзисторах).