

Лекция 3 Транзисторы.

Биполярные транзисторы. Схему включения диодов транзисторов. Выпрямители. Основные характеристики, условно графические обозначения полупроводниковых приборов.

Биполярный транзистор

Биполярный транзистор — это полупроводниковый прибор, состоящий из трех чередующихся областей полупроводника с различным типом

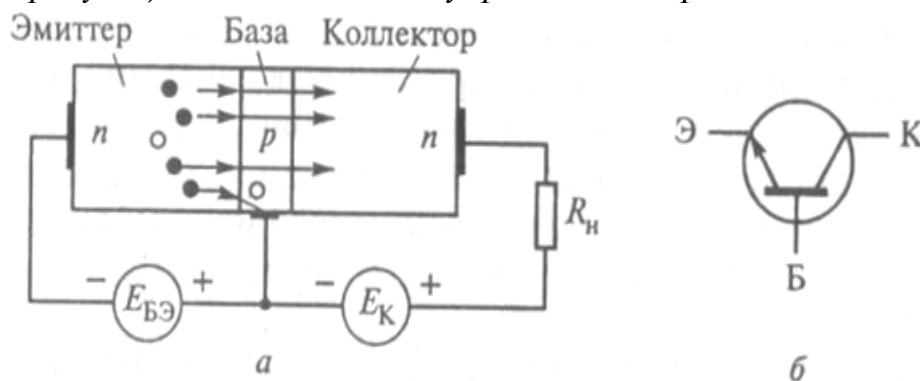


Рис. Биполярный транзистор n-p-n- типа: а- принцип действия; б- условное обозначение

Переход между эмиттером и базой называют первым или эмиттерным переходом. Переход между базой и коллектором называют вторым или коллекторным переходом.

К переходу БЭ прикладывают прямое напряжение $E_{БЭ}$, под действием которого электроны n-области эмиттера устремляются в базу, создавая ток эмиттера. Концентрацию примесей в эмиттере делают во много раз больше, чем в базе, а саму базу по возможности тоньше. Поэтому лишь незначительная часть (1...5%) «испущенных» эмиттером электронов рекомбинируют с дырками базы. Большая же часть электронов, миновав узкую (доли микрона) область базы, «собирается» коллекторным напряжением $E_{К}$, представляющим обратное напряжение для перехода БК, и, устремляясь к плюсу внешнего источника $E_{К}$, создает коллекторный ток, протекающий по нагрузке R_n .

Электроны, рекомбинировавшие с дырками базы, составляют ток базы $I_{Б}$. Ток коллектора, таким образом, определяется током эмиттера за вычетом тока базы:

$$I_{К} = I_{Э} - I_{Б} = \alpha I_{Э},$$

$\alpha = 0,95...0,98$ — коэффициент передачи тока эмиттера.

Конструктивно изготавливают так структуру что бы большее число носителей проходило в коллектор (транзистор n-p-n- типа) т. о. коэффициент передачи тока эмиттера стремиться к единице.

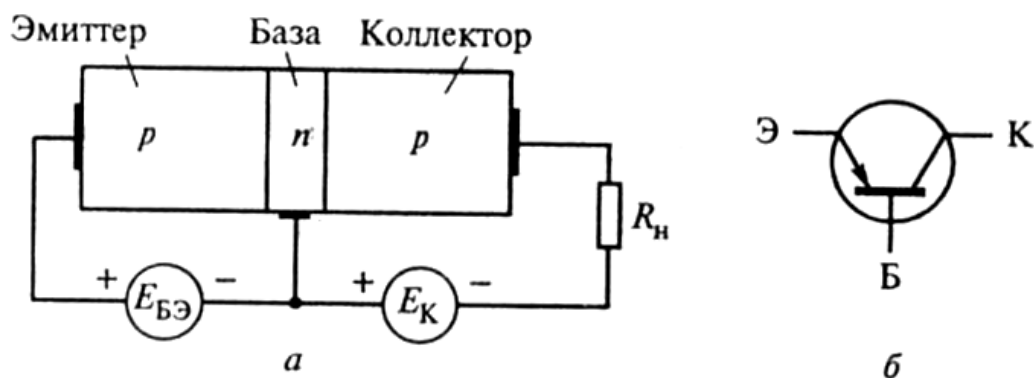


Рис. 6 Биполярный транзистор $p-n-p$ -транзистор а– принцип действия; условное обозначение

Различают три режима работы транзистора:

- 1) режим отсечки — когда оба перехода закрыты;
- 2) режим насыщения — оба перехода открыты;
- 3) Рабочих режима различают два:
 - а) прямой рабочий режим - первый открыт, второй закрыт;
 - б) инверсный режим — первый закрыт, второй открыт.

Схема с общей базой



$$U_{КБ} = E_{К} - U_{вых} = E_{К} - I_{К} R_{н}.$$

Для оценки работы транзистора и его усилительных свойств в различных схемах включения, принято характеризовать его свойства коэффициентами усиления и значением входного сопротивления. Различают три вида коэффициентов усиления:

Коэффициент усиление по току $K_I = \Delta I_{Вых} / \Delta I_{Вх}$

Коэффициент усиление по напряжению $K_U = \Delta U_{Вых} / \Delta U_{Вх}$

Коэффициент усиление по мощности $K_P = K_I K_U$

Для схемы с общей базой входной ток это ток эмиттера, а входное напряжение это напряжение эмиттер база. Выходной ток это ток коллектора, выходное напряжение это напряжение на нагрузке $R_{н}$. Величина входного сопротивления определяется как отношение изменения входного напряжения к изменению входного тока: $R_{Вх} = \Delta U_{Вх} / \Delta I_{Вх}$. Входное сопротивление любого усилителя приводит к искажению входного сигнала. Любой реальный источник сигнала обладает

некоторым внутренним сопротивлением и при подключении его к усилителю образуется делитель напряжения, состоящий из внутреннего сопротивления источника и входного сопротивления усилителя. Поэтому чем выше входное сопротивление усилителя, тем большая часть сигнала будет выделяться на этом сопротивлении и усиливаться и тем меньшая его часть будет падать на внутреннем сопротивлении самого источника.

Так как коэффициент передачи тока эмиттера определяется как $\alpha = I_K / I_E$, то с учетом того, что для схемы с ОБ ток эмиттера является входным током, а ток коллектора — выходным, коэффициент усиления по току будет равен:

$$K_{IB} = \Delta I_{Вых} / \Delta I_{Вх} = \Delta I_K / \Delta I_E = 0,95 \dots 0,99$$

(Индекс «Б» в обозначении K_{IB} показывает, что коэффициент характеризует работу схемы с ОБ.)

Так как входным напряжением является прямое для эмиттерного перехода напряжение $U_{ЭБ}$, а входным током — ток эмиттера, то входное сопротивление определится как

$$R_{вхБ} = \Delta U_{вх} / \Delta I_{вх} = \Delta U_{ЭБ} / \Delta I_E;$$

и составляет обычно единицы — десятки Ом. Очевидно, что чем мощнее транзистор, тем больше будет ток эмиттера и тем меньше его входное сопротивление.

Коэффициент усиления по напряжению в схеме с ОБ равен:

$$K_{УБ} = \frac{\Delta U_{Вых}}{\Delta U_{Вх}} = \frac{\Delta I_{Вых} R_H}{\Delta I_{Вх} R_{вхБ}} \approx \frac{R_H}{R_{вхБ}},$$

т. е. определяется соотношением сопротивлений нагрузки и входного. Таким образом, коэффициент $K_{УБ}$ может достигать 1000.

Коэффициент усиления по мощности определяется как произведение коэффициентов усиления по току и напряжению:

$$K_{PБ} = K_{IB} K_{УБ} = \alpha \frac{R_H}{R_{вхБ}} \approx \frac{R_H}{R_{вхБ}},$$

таким образом, он тоже определяется соотношением сопротивлений. Так как коэффициент усиления схемы с ОБ по току K_{IB} оказывается меньше единицы, она применения не нашла.

Схема с общим эмиттером

Схема с общим эмиттером (ОЭ) представлена на рис.

Транзистор NPN этой схеме работает так же, как и в схеме с ОБ. Характерным признаком схемы с ОЭ является то, что нагрузка располагается в коллекторной

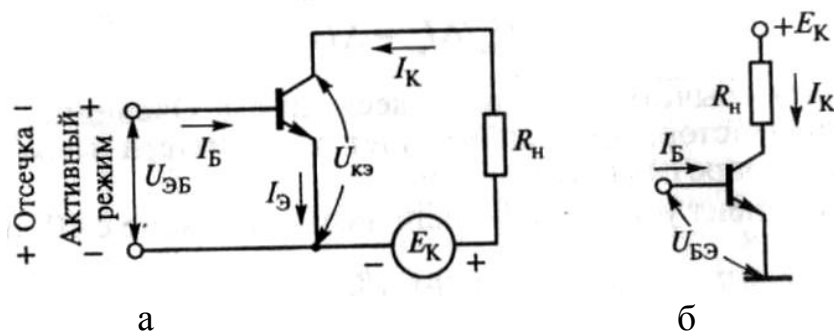


Рис. 1.11. Схема включения транзистора с общим эмиттером (а); типовое изображение в схемах (б)

Для схемы с ОЭ, входным сигналом является ток базы и напряжение между базой и эмиттером, а выходными величинами — коллекторный ток I_K и напряжение на нагрузке $U_{\text{вых.}} = I_K R_n$.

Транзистор в схеме с ОЭ характеризуется коэффициентом передачи тока

$$\beta = \Delta I_K / \Delta I_B,$$

имеющим значения $\beta = 10 \dots 100$, который связан с коэффициентом α для схемы с ОБ соотношением:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Коэффициент β называют коэффициентом передачи тока базы.

Оценим значения коэффициентов усиления схемы с ОЭ (их обозначают индексом «Э»).

Выходным током, как и в схеме с ОБ, является ток I_K , протекающий по нагрузке, а входным током (в отличие от схемы с ОБ) — ток базы I_B , и коэффициент усиления по току схемы с ОЭ равен

$$K_{IЭ} = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \beta.$$

При $\alpha = 0,98$ $K_{IЭ} = 0,98 / (1 - 0,98) = 50$, т.е. несколько десяткам, что многократно превосходит аналогичный коэффициент у схемы с ОБ.

Коэффициент усиления по напряжению в схеме с ОЭ соизмерим с таким же коэффициентом у схемы с ОБ:

$$K_{UЭ} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_K R_n}{\Delta I_B R_{\text{вх}}} = \beta \frac{R_n}{R_{\text{вх}}}.$$

По коэффициенту усиления по мощности схема с ОЭ за счет значительно большего коэффициента усиления по току также многократно превосходит схему с ОБ:

$$K_{PЭ} = K_{UЭ} K_{IЭ} = \beta^2 \frac{R_n}{R_{\text{вх}}}$$

и зависит от коэффициента передачи тока базы и отношения сопротивления нагрузки к входному сопротивлению.

Входное сопротивление в схеме с ОЭ также значительно выше, чем в схеме с ОБ, так как в схеме с ОЭ входным током является ток базы, а в схеме с ОБ — во

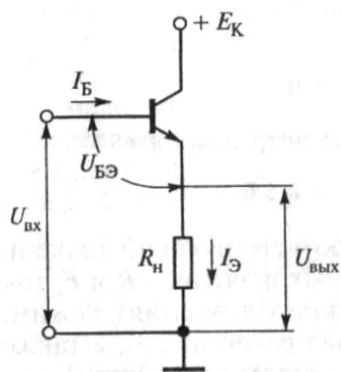
много раз больший ток эмиттера:

$$R_{вх} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}}$$

Величина входного сопротивления в схеме с ОЭ составляет сотни ом. Благодаря отмеченным свойствам схема с ОЭ нашла очень широкое применение.

Схема с общим коллектором

В схеме с общим коллектором (ОК) нагрузка включена не в цепь коллектора, а в цепь эмиттера. Входным в этой схеме является напряжение между базой и корпусом, а выходным — между эмиттером и корпусом (рис.).



Чтобы транзистор мог работать в активном режиме, необходимо, чтобы входное напряжение в этой схеме было выше напряжения на нагрузке на величину напряжения на $U_{БЭ}$:

$$U_{ВХ} = U_{ВЫХ} + U_{БЭ}.$$

В связи с этим значения входных напряжений в схеме с ОК оказываются в сотни раз больше, чем в схемах с ОБ и ОЭ.

Другой особенностью схемы с ОК является отсутствие усиления по напряжению. Как видно из схемы, $U_{ВЫХ}$ отличается от $U_{ВХ}$ на падение напряжения $U_{БЭ}$, которое при открытом транзисторе составляет доли вольт.

Поэтому схема с ОК получила название «эмиттерный повторитель».

Коэффициент усиления по напряжению схемы с ОК

$$K_{УК} \approx 1.$$

Оценим усилительные свойства схемы. Входным током по-прежнему является ток базы $I_{Б}$. Поэтому коэффициент усиления по току с учетом того, что $\beta = \Delta I_{К} / \Delta I_{Б}$, равен:

$$K_{К} = \frac{\Delta I_{Э}}{\Delta I_{Б}} = \frac{\Delta I_{К} + \Delta I_{Б}}{\Delta I_{Б}} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} + 1 = \beta + 1,$$

Оценим величину входного сопротивления схемы с ОК. Входное напряжение для схемы складывается из небольшого падения напряжения на база—эмиттером переходе и падения напряжения на нагрузке, а входным

током является ток базы. Поэтому

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta I_{\text{вх}}} = \frac{\Delta U_{\text{БЭ}} + \Delta I_{\text{Э}} R_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{Б}}}.$$

Поскольку напряжение $U_{\text{БЭ}}$ значительно меньше напряжения на нагрузке, им можно пренебречь. Тогда, учитывая взаимосвязь между током эмиттера и током базы $I_{\text{Э}} = \beta I_{\text{Б}}$, величина входного сопротивления запишется как

$$R_{\text{вх}} \approx \frac{\beta \Delta I_{\text{Б}} R_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = \beta R_{\text{н}}.$$

Таким образом, входное сопротивление схемы с ОК многократно превосходит входное сопротивление схем с ОЭ и ОБ и составляет десятки кОм.

Благодаря отмеченным свойствам эмиттерный повторитель используют в качестве выходного каскада устройств для усиления сигнала по мощности, когда усиление его по напряжению уже достигнуто предыдущими каскадами. Схема с ОК обеспечивает усиление по мощности т.е. в десятки раз.

$$K_{\text{ПК}} = K_{\text{УК}} K_{\text{ПК}} \approx (\beta + 1) \approx \beta,$$

Выходной каскад предназначен для отдачи заданной мощности в нагрузку, сопротивление которой тоже задано. Так как мощность поступает от источника питания усилителя через выходной каскад, его КПД должен быть высоким, иначе устройство будет неэкономичным, а габаритные размеры (поверхность охлаждения) раздутыми для отвода выделяющейся в каскаде теплоты. Если у входных каскадов нелинейность транзистора не оказывает влияния ввиду малости усиливаемых сигналов, то у выходных каскадов диапазон изменения сигнала большой и нелинейность транзистора необходимо учитывать. С этой целью строят так называемую передаточную характеристику. Передаточная характеристика — это зависимость выходного тока каскада (тока коллектора или эмиттера) от входного напряжения. В ней учитываются нелинейность **входной** и **выходной** характеристик транзистора и изменения напряжения, падающего на самом транзисторе в зависимости от выходного тока.

Параметры основных схем включения транзисторов.

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
k_I	Десятки — сотни	Немного меньше единицы	Десятки — сотни
k_H	Десятки — сотни	Десятки — сотни	Немного меньше единицы
k_P	Сотни — десятки тысяч	Десятки — сотни	Десятки — сотни
$R_{вх}$	Сотни ом — единицы килоом	Единицы — десятки ом	Десятки — сотни килоом
$R_{вых}$	Единицы — десятки килоом	Сотни килоом — единицы мегаом	Сотни ом — единицы килоом
Фазовый сдвиг между $U_{вых}$ и $U_{вх}$	180°	0	0

Входные и выходные характеристики схемы с ОЭ

Работу схемы обычно описывают с помощью входных и выходных характеристик транзистора в той или иной схеме включения. Для схемы с ОЭ входная характеристика — это зависимость входного тока от напряжения на входе схемы, т. е. $I_B = f(U_{БЭ})$ при фиксированных значениях напряжения коллектор — эмиттер ($U_{КЭ} = const$).

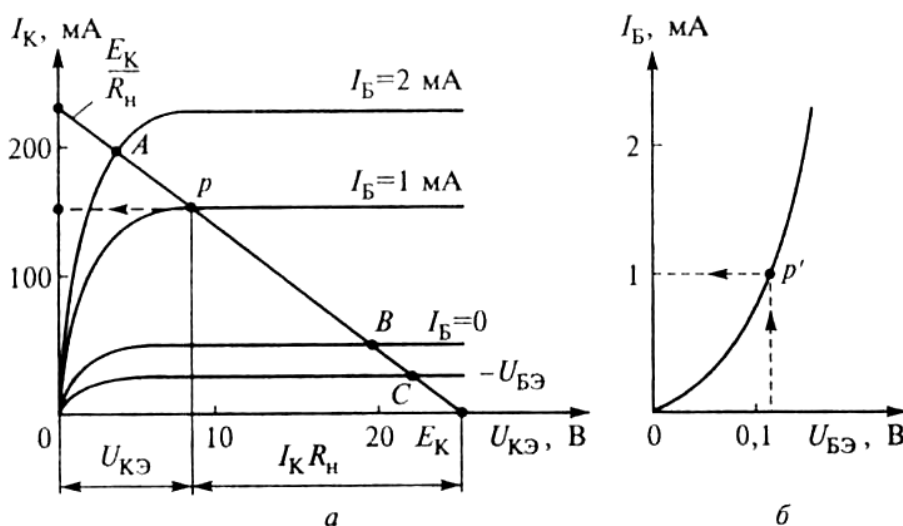


Рис.. Выходные (а) и входная (б) характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером

Выходные характеристики — это зависимости выходного тока, т. е. тока коллектора, от падения напряжения между коллектором и эмиттером транзистора $I_K = f(U_{БЭ})$ при токе базы $I_B = const$.

Входная характеристика по существу повторяет вид характеристики диода при подаче прямого напряжения (рис. б). С ростом напряжения $U_{БЭ}$ входная характеристика будет незначительно смещаться вправо. Прямая на графиках носит название нагрузочной и строится по точкам короткого замыкания и холостого хода используя источник ЭДС и сопротивления коллектора.

Входные и выходные характеристики схемы с ОБ

Для схемы с ОБ входная характеристика — это зависимость входного тока от напряжения на входе схемы, т. е. $I_Э = f(U_{ЭБ})$ при фиксированных значениях напряжения коллектор — эмиттер ($U_{КБ} = \text{const}$).

Выходные характеристики — это зависимости выходного тока, т. е. тока коллектора, от падения напряжения между коллектором и базой транзистора $I_К = f(U_{КБ})$ при токе базы $I_Э = \text{const}$.

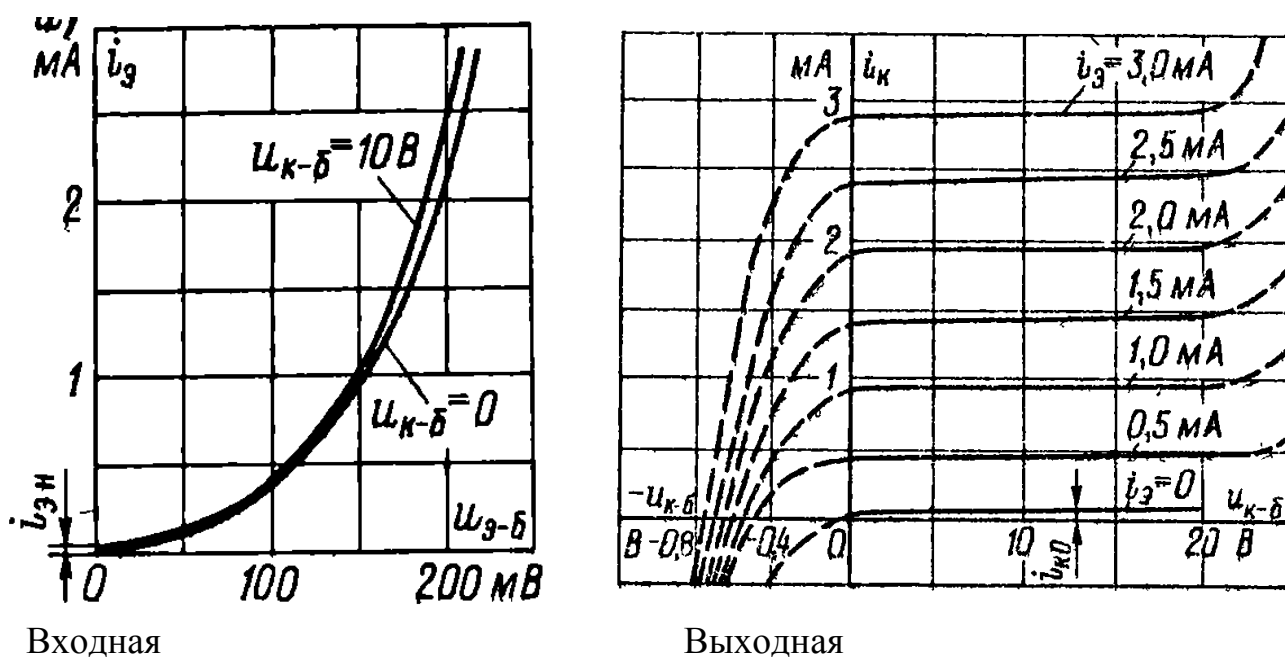


Рис. Вольтамперные характеристики транзистора в схеме с ОБ

Как видно зависимости похожи на характеристики с ОЭ. В выходных только имеется участок с отрицательным напряжением.

Пример графического анализа усиления транзистора используя входные и выходные характеристики.

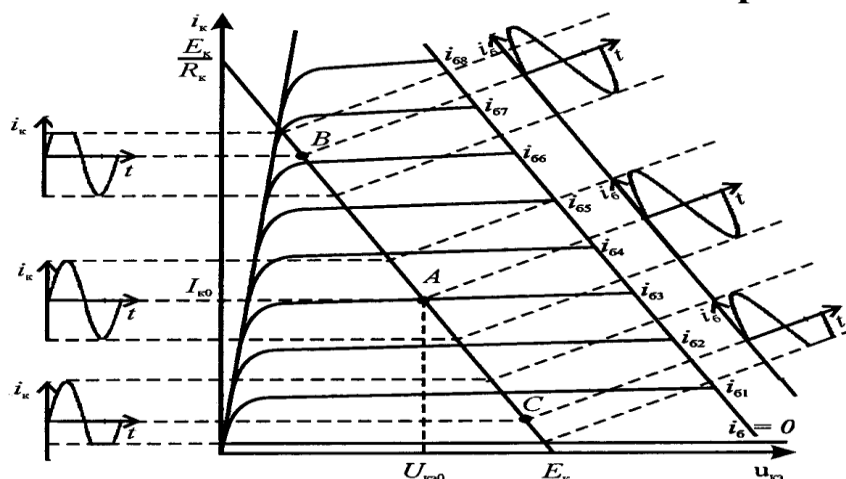


Рис. Графический анализ режима усиления транзистора.

Справа приведены графики входного тока базы (синусоиды тока) при разных рабочих точках A, B, C.

И слева форма выходного тока коллектора (синусоиды тока) для этих точек. Видно, что при смещении в точках B и C появляются искажения.

Различают в зависимости от выбора рабочей точки транзистора несколько режимов работы усилителей. Это режимы A, B, C и D.

Остановимся более подробно на режимах A и B. Режим C и D — это режимы, свойственные для работы соответственно генераторов и цифровых ключей.

Режим A — это режим, при котором исходная рабочая точка располагается

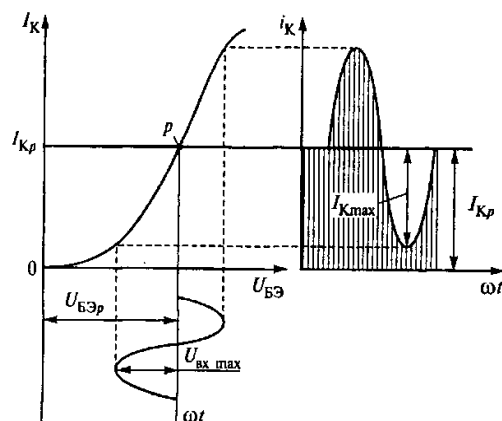


Рис. Режим A работы

примерно на середине линейного участка характеристики

Но КПД каскада составляет лишь 20—30%, нелинейные искажения минимальны

Режим B — это режим, при котором исходная рабочая точка совпадает с началом координат

КПД достигает 60—70%,

форма усиливаемого сигнала слишком искажена.

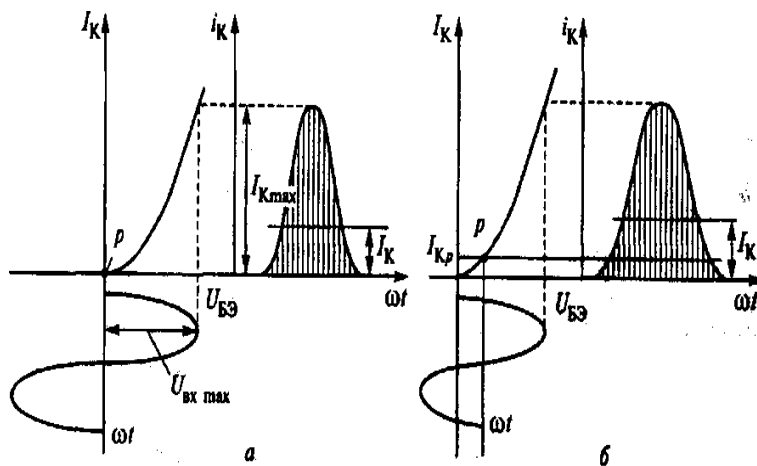


Рис. Режимы работы усилительного каскада: *a* — режим В; *б* — режим

Пример реализации усилителя в режиме В, это двухтактный эмиттерный повторитель. В схеме два транзистора с разной полярностью каждый из которых усиливает лишь одну часть полуволны. За счёт того что смещение на транзисторы подано близко к нулю, при отсутствии сигнала потребление будет отсутствовать или мало. Отсюда и высокое КПД работы этого режима.

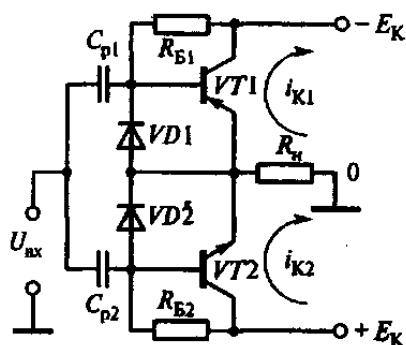
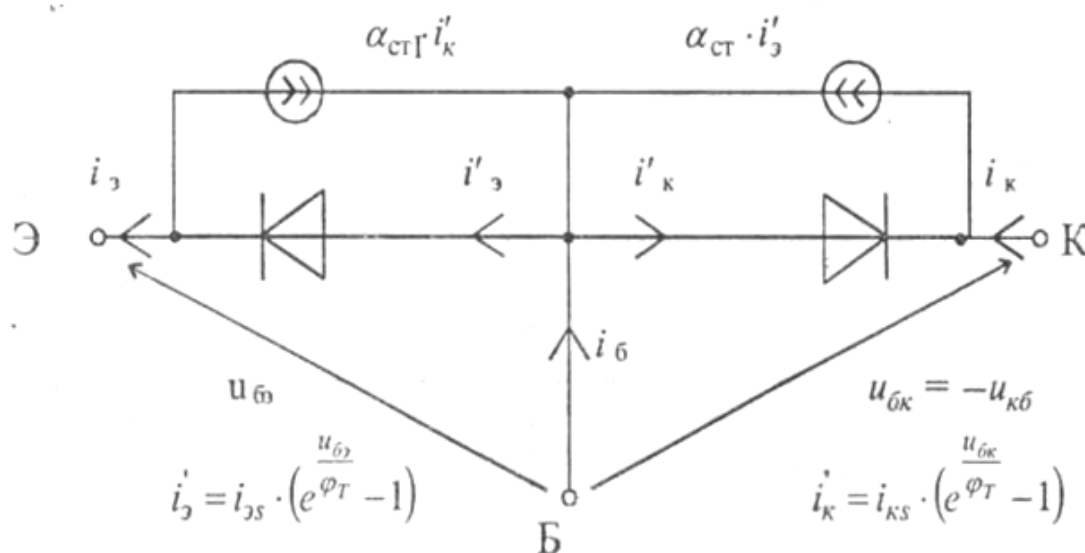


Рис. Двухтактный эмиттерный повторитель.

Математические модели биполярного транзистора

Приведем пример простейшей математической модели биполярного транзистора - модель Эберса—Молла с двумя источниками. На схеме указаны зависимости источников тока $i'_э$ и $i'_к$.



Используя первый закон Кирхгофа, можно записать:

$$i_э = i_{эс} \cdot \left(e^{\frac{u_{бэ}}{\varphi_T}} - 1 \right) - \alpha_{CTI} \cdot i_{кс} \cdot \left(e^{\frac{u_{бк}}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

$$i_к = \alpha_{CT} \cdot i_{эс} \cdot \left(e^{\frac{u_{бэ}}{\varphi_T}} - 1 \right) - i_{кс} \cdot \left(e^{\frac{u_{бк}}{\varphi_T}} - 1 \right).$$