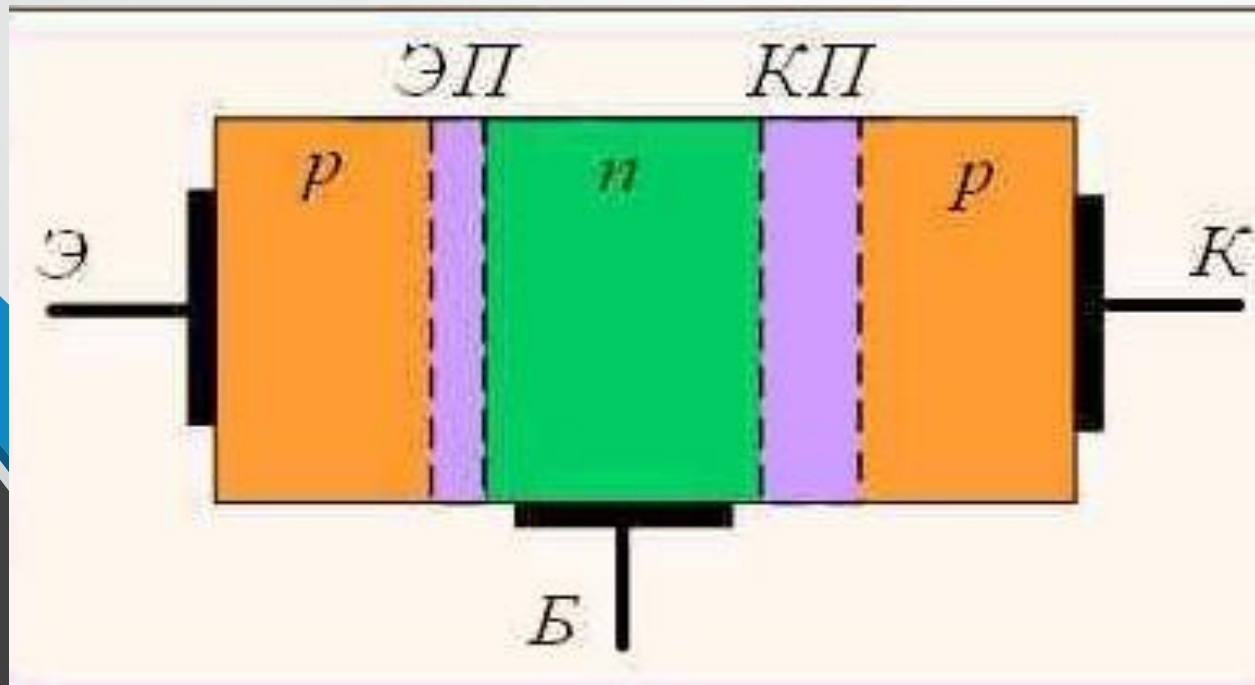


Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор (обычно его называют просто транзистором) – это полупроводниковый прибор с двумя или более взаимодействующими выпрямляющими электрическими переходами.

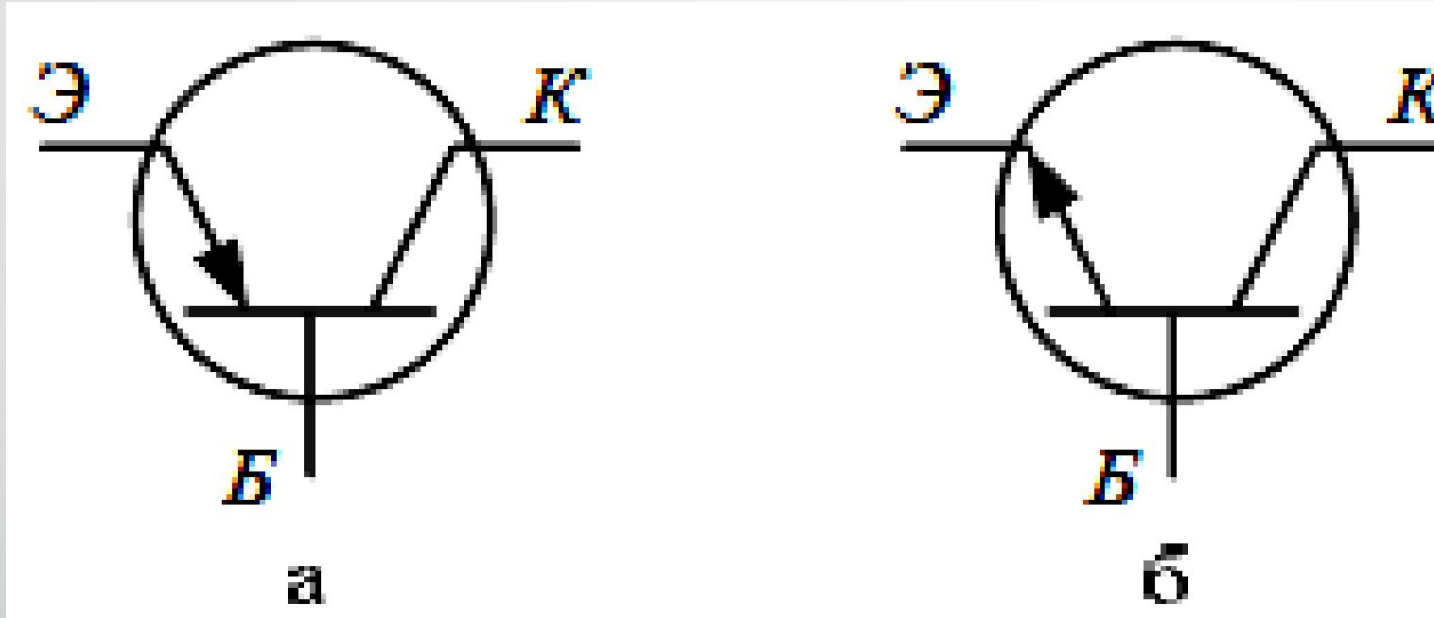


Структура биполярного транзистора

Транзистор (полупроводниковый триод) был создан американскими учеными Дж. Бардином, У. Браттейном и У. Шокли в 1948 году.

Транзисторы p - n - p и n - p - n типа.

Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей заряда в базу, называют эмиттером (Э), а p - n -переход между базой и эмиттером – эмиттерным (ЭП).



а – транзистор p - n - p типа; **б** – транзистор n - p - n типа

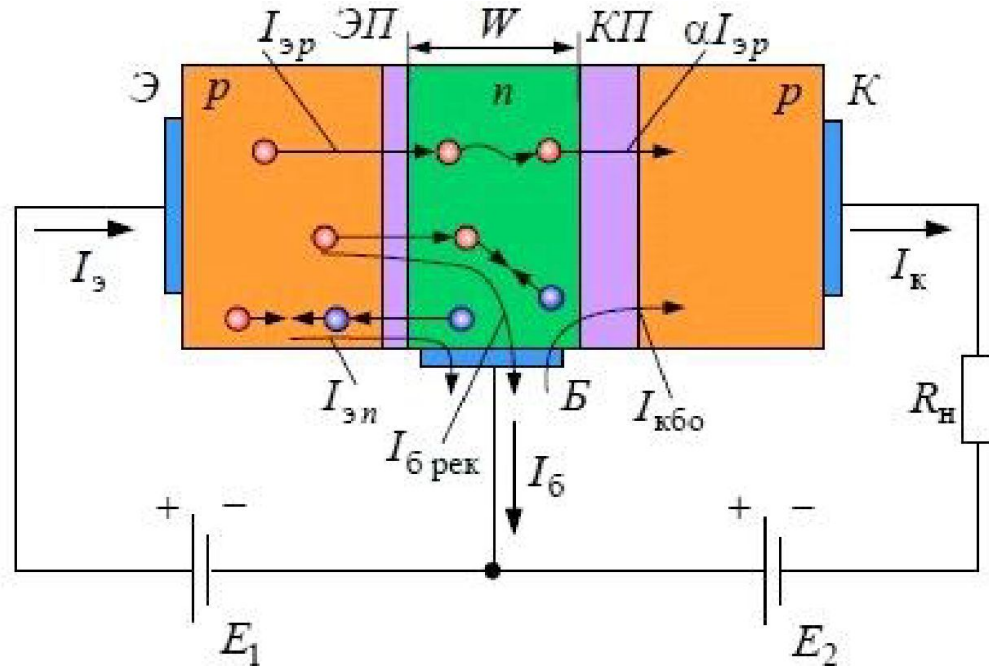
Область транзистора, основным назначением которой является собирание, экстракция носителей заряда из базы, называют коллектором (К), а p - n -переход между базой и коллектором – коллекторным (КП).

В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора, каждый из р-n-переходов может быть смещен в прямом или в обратном направлении, исходя из этого, возможны четыре режима работы транзистора.

Режимы работы биполярного транзистора

Эмиттерный переход	Коллекторный переход	Режим работы транзистора
Прямое	Обратное	Активный (усилительный)
Прямое	Прямое	Насыщения
Обратное	Обратное	Отсечки
Обратное	Прямое	Инверсный

Физические процессы в биполярном транзисторе



Движение носителей заряда и токи в биполярном транзисторе при активном режиме работы

E_1 – ЭДС источника входного сигнала
 E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

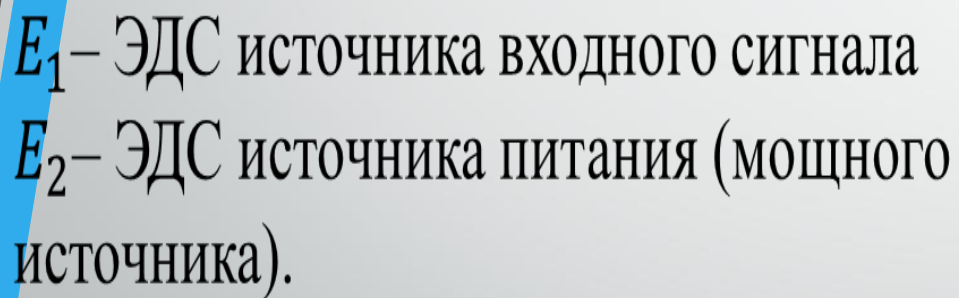
$$U = I_{\kappa} \cdot R_{\kappa}$$

Отношение этих токов характеризует коэффициент передачи по току:

$$\alpha = \frac{I_{\kappa}}{I_{\varepsilon}}.$$

Чтобы увеличить коэффициент передачи по току область базы делают тонкой, чтобы меньшее количество носителей рекомбинировало в ней.

Чтобы улучшить процесс экстракции носителей из базы площадь коллекторного перехода делают больше площади эмиттерного перехода.



E_1 – ЭДС источника входного сигнала

E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

Как крайнюю степень проявления модуляции ширины базы следует рассматривать явление, называемое **проколом базы**

Основные параметры биполярных транзисторов:

1. Коэффициенты передачи эмиттерного и базового тока.

$$h_{21э} = \left. \frac{dI_{\kappa}}{dI_{\bar{o}}} \right|_{U_{\kappa\bar{o}} = const};$$

$$h_{21\bar{o}} = \left. \frac{dI_{\kappa}}{dI_{\bar{o}}} \right|_{U_{\kappa\bar{o}} = const}.$$

2. Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода (единицы – десятки Ом).

$$r_{э\partial u\phi} = \left. \frac{dU_{э\bar{o}}}{dI_{\bar{o}}} \right|_{U_{\kappa\bar{o}} = const}.$$

3. Обратный ток коллекторного перехода при заданном обратном напряжении (единицы наноампер – десятки миллиампер).

$$I_{\kappa\bar{o}o} = I_{\kappa} |_{I_{э}=const}; U_{\kappa\bar{o}} < 0.$$

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

$$r_{\kappa \partial u \phi} = \frac{1}{h_{22\varepsilon}} = \left. \frac{dU_{\kappa \delta}}{dI_{\kappa}} \right|_{I_{\delta} = const};$$
$$r_{\kappa \partial u \phi} = \frac{1}{h_{22\delta}} = \left. \frac{dU_{\kappa \delta}}{dI_{\kappa}} \right|_{I_{\varepsilon} = const}.$$

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

Выводы

При прямом напряжении, приложенном к эмиттерному переходу, потенциальный барьер понижается, и в базу инжектируются носители заряда.

Инжектированные в базу неосновные носители заряда диффундируют в сторону коллекторного перехода.

Вследствие того, что ширина базы транзистора мала и концентрация основных носителей заряда в ней низкая, почти все инжектированные в базу неосновные носители заряда достигают коллекторного перехода и перебрасываются полем потенциального барьера в коллектор, образуя управляемый ток коллектора.

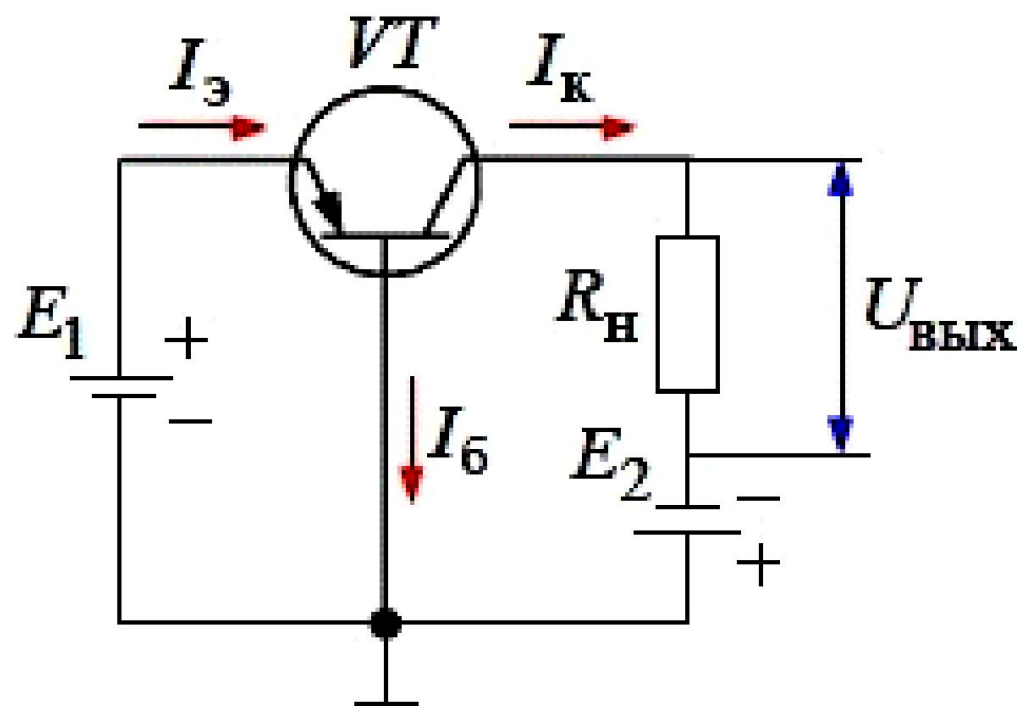
Небольшая часть инжектированных носителей заряда успевает рекомбинировать в базе, образуя рекомбинированную составляющую тока эмиттера, которая замыкается через цепь базы.

Через цепь базы замыкается также небольшая составляющая тока эмиттера, образованная диффузией неосновных носителей заряда из базы в эмиттер, и обратный ток коллекторного перехода.

Схемы включения транзистора

Различают три возможных схемы включения:

- *с общей базой,*
- *с общим эмиттером*
- *с общим коллектором.*



**Схема
включения с
общей базой**

Основные параметры, характеризующие эту схему включения

1. Коэффициент усиления по току:

$$k_{I\delta} = \alpha = \frac{I_k}{I_s} \approx 0,95 \div 0,99.$$

2. Входное сопротивление:

$$R_{\text{вх}\delta} = \frac{E_1}{I_s}.$$

3. Коэффициент усиления по напряжению:

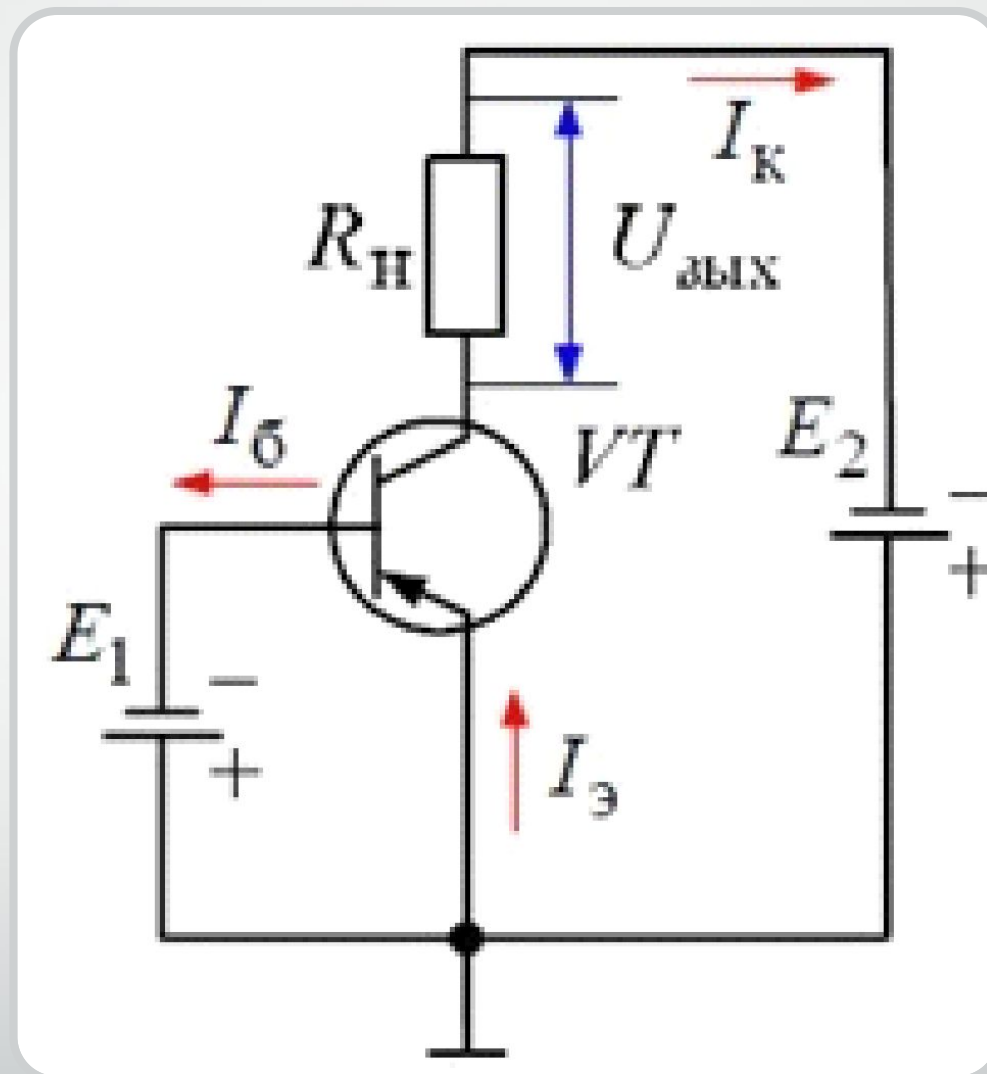
$$k_{U\delta} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{I_k \cdot R_n}{E_1} = \frac{I_k \cdot R_n}{I_s \cdot R_{\text{вх}\delta}} = \alpha \cdot \frac{R_n}{R_{\text{вх}\delta}}.$$

4. Коэффициент усиления по мощности:

$$k_{P\delta} = K_{I\delta} \cdot K_{U\delta} = \alpha^2 \cdot \frac{R_n}{R_{\text{вх}\delta}}.$$

Включение
транзистора
по общей
схеме с
общим
эмиттером

$$I_{\text{э}} = I_{\text{б}} + I_{\text{к}}$$



Основные параметры, характеризующие эту схему включения

1. Коэффициент усиления по току:

$$k_{I_{\text{э}}} = \beta = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}} - I_{\text{к}}},$$

$$k_{I_{\text{э}}} = \frac{\frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}}}{\frac{I_{\text{э}} - I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

2. Входное сопротивление транзистора в схеме с общим эмиттером:

$$R_{\text{вх э}} = \frac{E_{\text{б}}}{I_{\text{б}}} = \frac{E_{\text{б}}}{I_{\text{э}} - I_{\text{к}}}.$$

$$R_{\text{вх э}} = \frac{\frac{E_{\text{б}}}{I_{\text{э}}}}{\frac{I_{\text{э}} - I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}}} = \frac{R_{\text{э б}}}{1 - \alpha}.$$

3. Коэффициент усиления по напряжению:

$$k_{U_{\text{э}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{к}} \cdot R_{\text{н}}}{E_{\text{б}}} = \frac{I_{\text{к}} \cdot R_{\text{н}}}{I_{\text{э}} \cdot R_{\text{вх э}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{э б}}}.$$

$$k_{U_{\text{э}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{э б}}} = \alpha \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{э б}}},$$

4. Коэффициент усиления по мощности:

$$k_{P_{\text{э}}} = K_{I_{\text{э}}} \cdot K_{U_{\text{э}}} = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha} \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{э б}}},$$

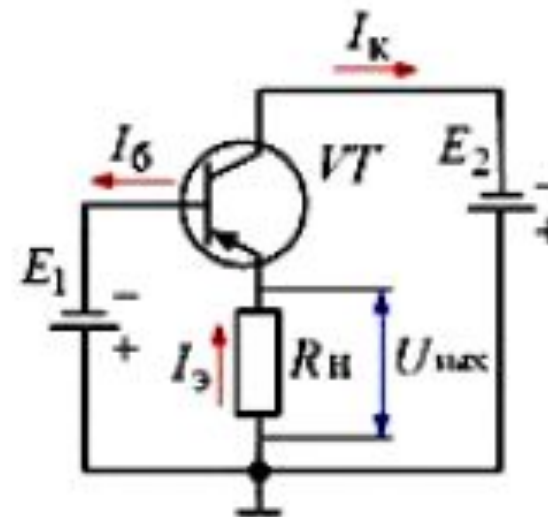
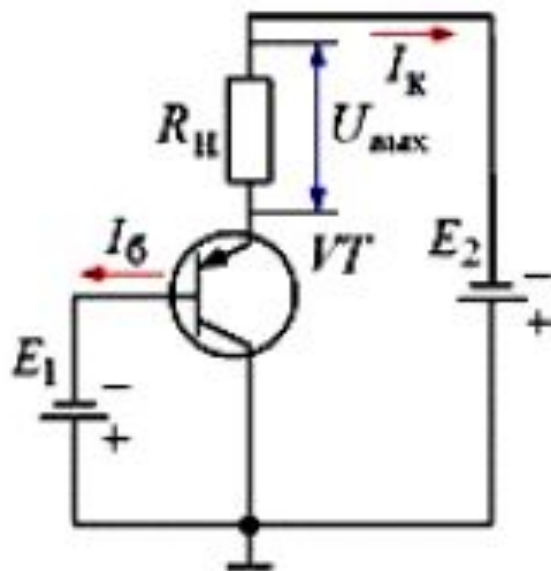


Схема с общим коллектором

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Б}} + I_{\text{К}}$$

Основные параметры, характеризующие эту схему включения

1. Коэффициент усиления по току:

$$k_{I\kappa} = \gamma = \frac{I_3}{I_6} = \frac{I_3}{I_3 - I_{\kappa}}.$$

$$\gamma = \frac{\frac{I_3}{I_3}}{\frac{I_3 - I_{\kappa}}{I_3}} = \frac{1}{1 - \alpha},$$

3. Коэффициент усиления по напряжению:

$$k_{U\kappa} = \frac{I_3 \cdot R_H}{I_6 \cdot R_{\text{ex } \kappa}}$$

$$k_{U\kappa} = \frac{R_H}{(1 - \alpha) \cdot R_{\text{ex } \kappa}} = \frac{R_H}{R_{\text{ex } 6} + R_H}$$

2. Входное сопротивление транзистора в схеме с общим коллектором:

$$R_{\text{ex } \kappa} = \frac{I_3 \cdot \left(\frac{E_1}{I_3} + R_H \right)}{I_3 \cdot (1 - \alpha)} = \frac{R_{\text{ex } 6} + R_H}{1 - \alpha},$$

$$R_{\text{ex } \kappa} = \frac{E_1 + R_H}{I_6},$$

4. Коэффициент усиления по мощности:

$$k_{P\kappa} = K_{I\kappa} \cdot K_{U\kappa} = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot \frac{R_H}{R_{\text{ex } 6} + R_H}$$

Параметры схем включения биполярного транзистора

Параметр	Схема с ОБ	Схема с ОЭ	Схема с ОК
Коэффициент усиления по току K_i	Немного меньше единицы	Немного меньше единицы	Немного меньше единицы
Коэффициент усиления по напряжению K_U	Десятки-сотни единиц	Десятки-сотни единиц	Немного меньше единицы
Коэффициент усиления по мощности K_P	Десятки-сотни единиц	Сотни-десятки тысяч единиц	Десятки-сотни единиц
Входное сопротивление $R_{ВХ}$	Единицы-десятки Ом	Сотни Ом-единицы кОм	Десятки-сотни кОм
Выходное сопротивление $R_{ВЫХ}$	Сотни кОм-единицы МОм	Единицы-десятки кОм	Сотни Ом-единицы кОм
Фазовый сдвиг между $U_{ВЫХ}$ и $U_{ВХ}$	0°	180°	0°

Выводы:

1. В отличие от схемы с общей базой схема с общим эмиттером наряду с усилением по напряжению даёт также усиление по току. Транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером, усиливает ток базы в десятки – сотни раз. Усиление по напряжению в данной схеме остается таким же, как в схеме с общей базой. Поэтому усиление по мощности в схеме с общим эмиттером значительно больше, чем в схеме с общей базой.

2. Схема с общим эмиттером имеет более приемлемые значения входного и выходного сопротивлений – входное больше, а выходное сопротивление меньше, чем в схеме с общей базой.

3. Благодаря указанным преимуществам схема с общим эмиттером находит наибольшее применение на практике.

Выводы:

4. Схема с общей базой хоть и имеет меньшее усиление по мощности и имеет меньшее входное сопротивление, все же ее иногда применяют на практике, т.к. она имеет лучшие температурные свойства.
5. Схема с общим коллектором дает усиление по току и по мощности, но не дает усиления по напряжению.
6. Схему с общим коллектором очень часто применяют в качестве входного каскада усиления из-за его высокого входного сопротивления и способности не нагружать источник входного сигнала, а также данная схема имеет наименьшее выходное сопротивление.

Статические характеристики биполярного транзистора

Статическими характеристиками называются зависимости между входными и выходными токами и напряжениями транзистора при отсутствии нагрузки.

Каждая из схем включения транзистора характеризуется четырьмя семействами статических характеристик:

1. Входные характеристики – это зависимость входного тока от входного напряжения при постоянстве напряжения на выходе:

$$I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}}) \Big|_{U_{\text{вых}} = \text{const}} .$$

2. Выходные характеристики – это зависимость выходного тока от выходного напряжения при фиксированном значении входного тока:

$$I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}}) \Big|_{I_{\text{вх}} = \text{const}} .$$

3. Характеристики обратной связи по напряжению:

$$U_{\text{вх}} = f(U_{\text{вых}}) \Big|_{I_{\text{вх}} = \text{const}} .$$

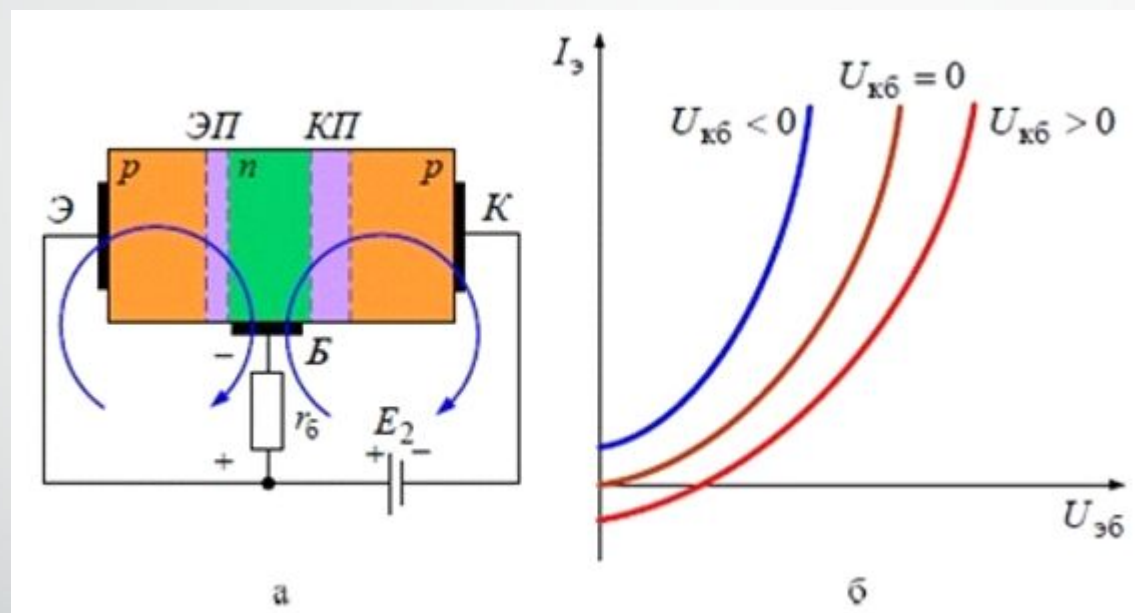
4. Характеристики передачи по току:

$$I_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}}) \Big|_{U_{\text{вых}} = \text{const}} .$$

Статические характеристики для схемы с общей базой

Семейство входных статических характеристик представляет собой зависимость

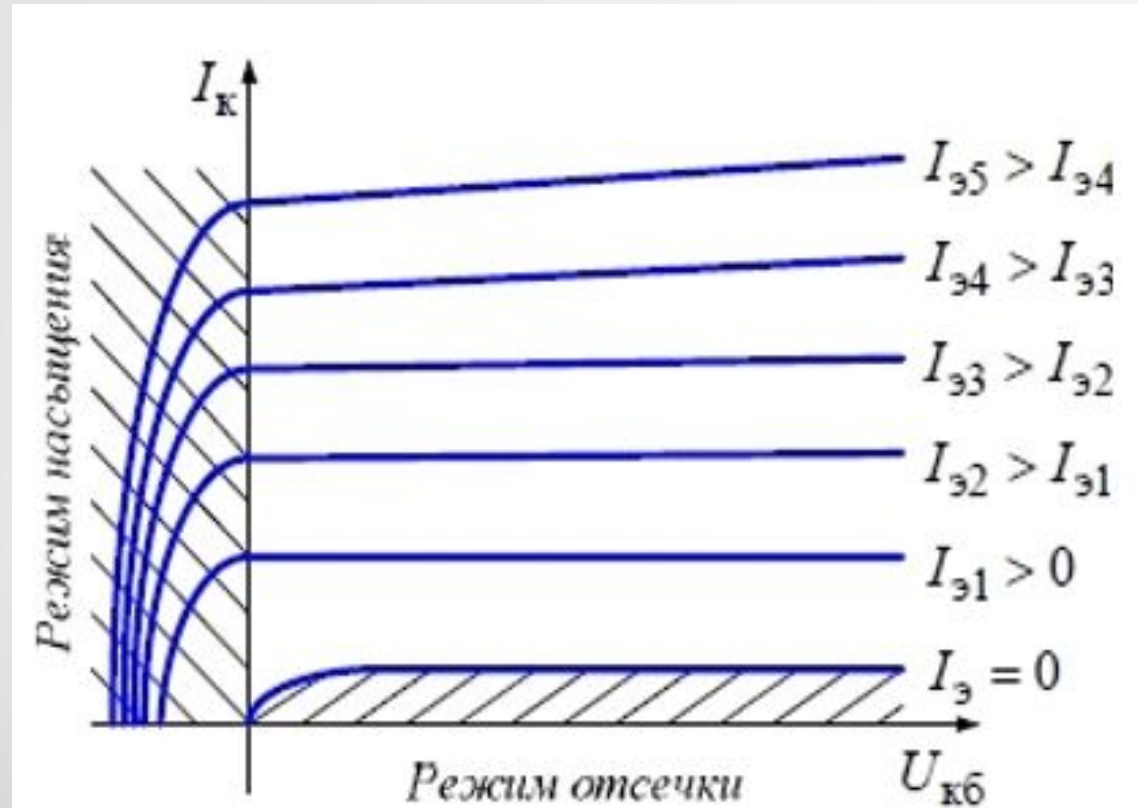
$$I_3 = f(U_{36}) \Big|_{U_{к6} = \text{const}}$$



Входные характеристики схеме с общей базой

Семейство выходных статических характеристик представляет собой зависимость

$$I_{\kappa} = f(U_{\kappa\delta}) \Big|_{I_3 = \text{const.}}$$

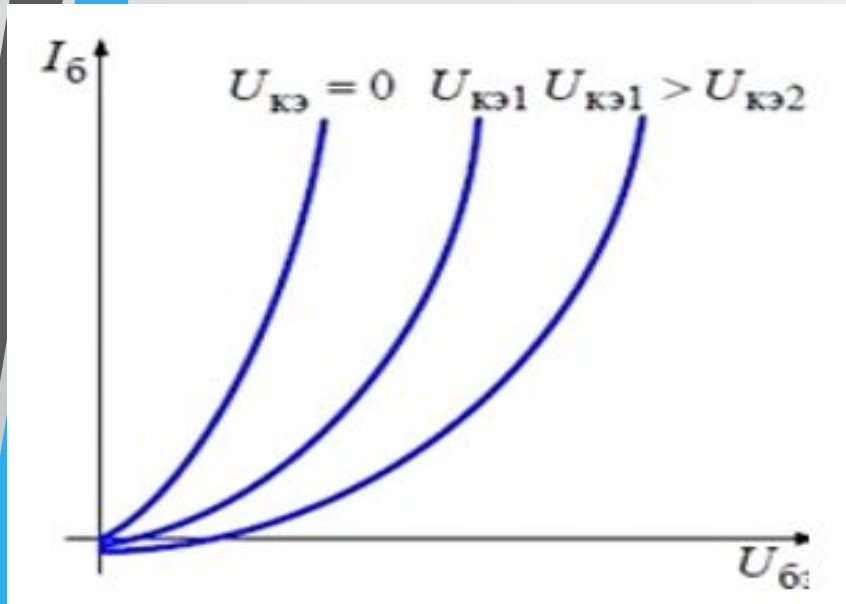


Входные характеристики схемы с общей базой

Статические характеристики для схемы с общим эмиттером

Семейство входных статических характеристик представляет собой зависимость
Вид этих характеристик показан на рисунке

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



Входные характеристики схемы с общим эмиттером

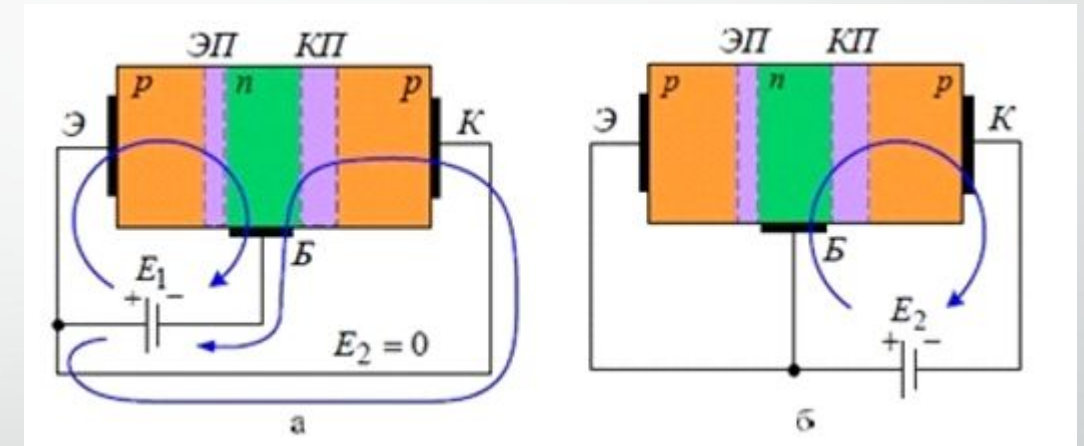
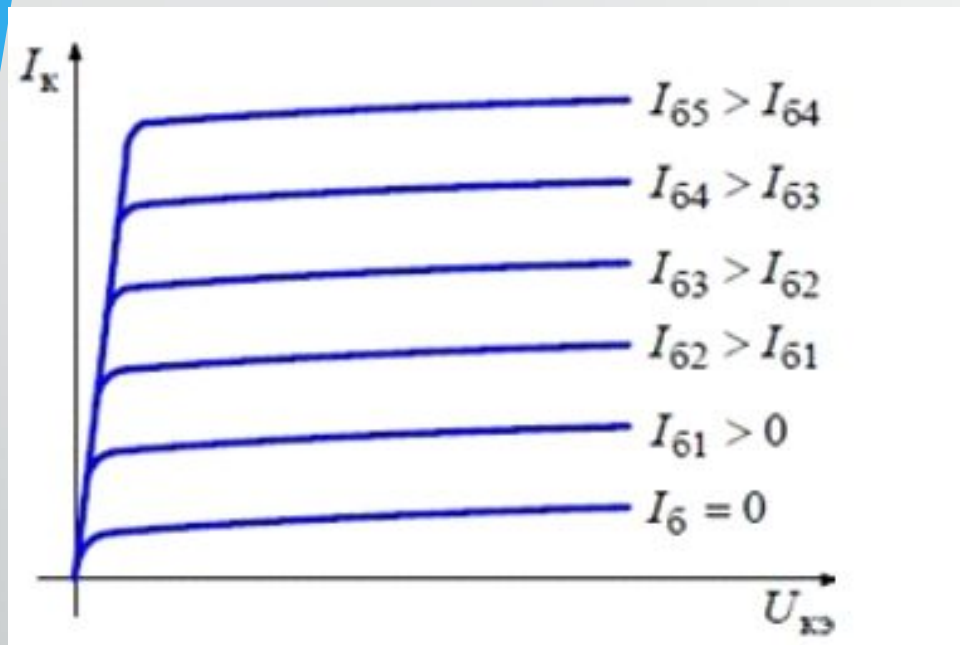
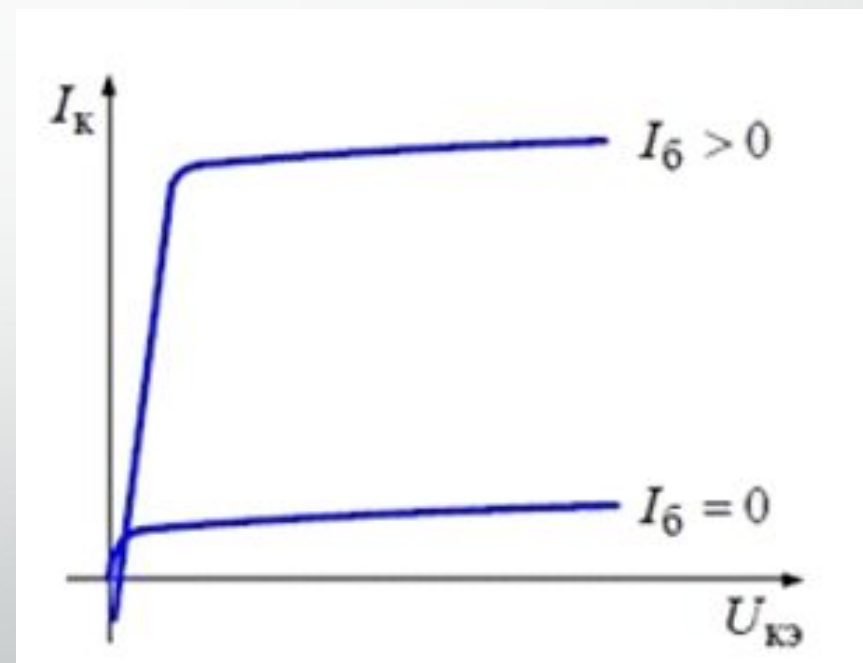


Схема включения транзистора, поясняющие особенность входных характеристик с общим эмиттером

Выходные статические характеристики представляют собой зависимости $I_K = f(U_{KЭ}) \Big|_{I_E = const}$.

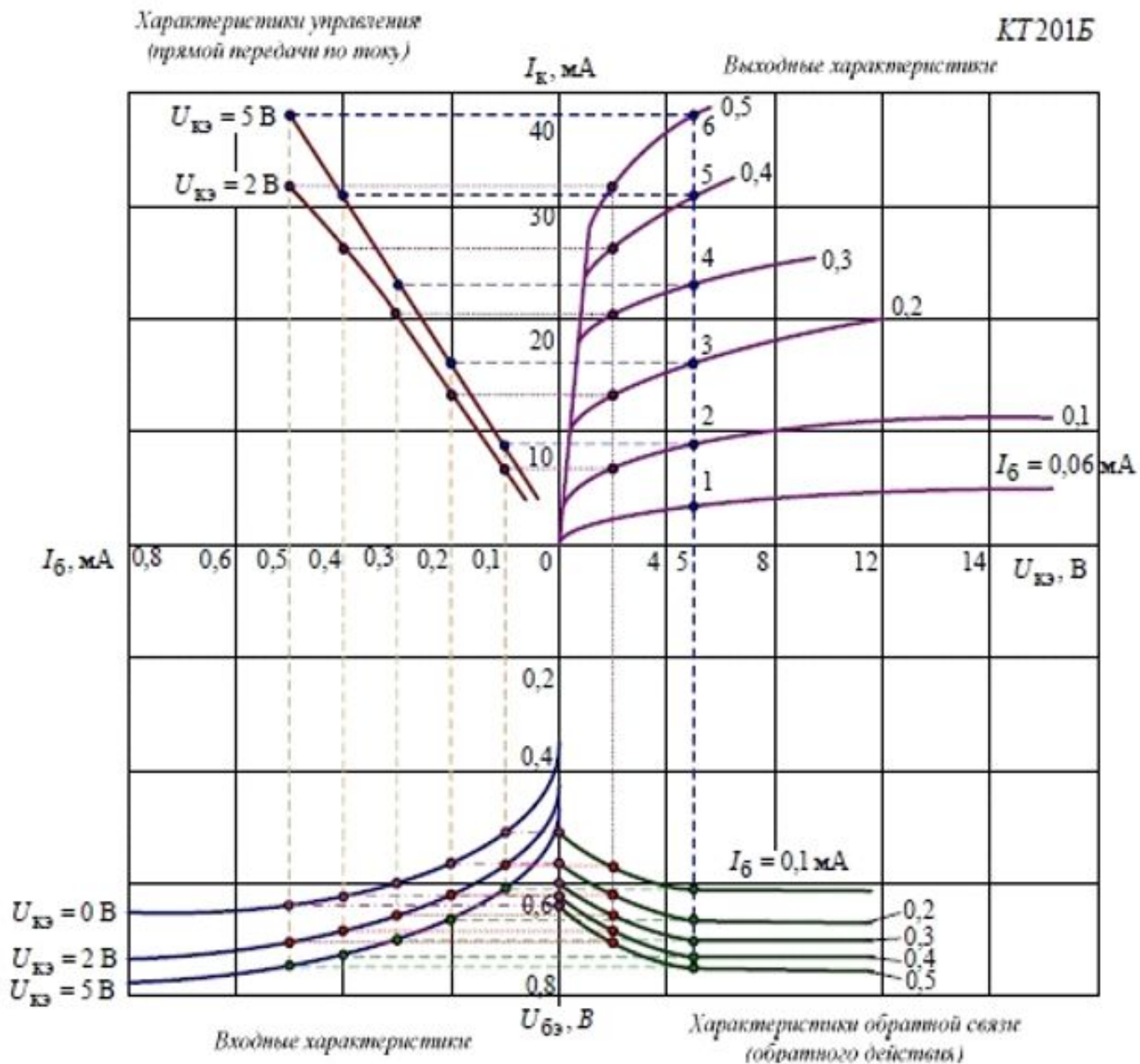


Входные характеристик с общим эмиттером



Особенность выходных характеристик с общим эмиттером

Семейство статических характеристик биполярного транзистора



В первом квадранте размещаются выходные статические характеристики транзистора

$$I_c = f(U_{ce}) \Big|_{I_b = const}$$

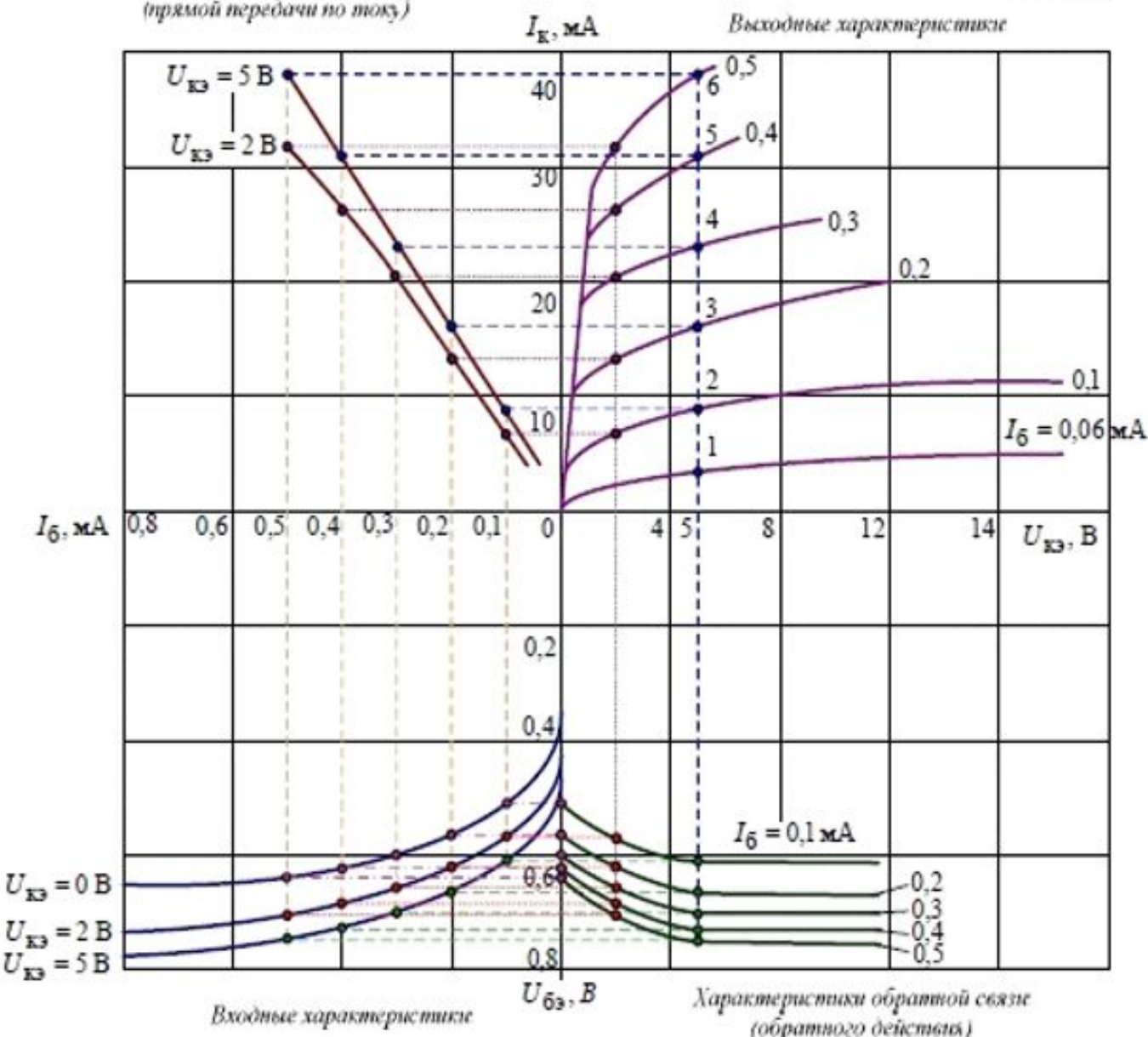
E_1 – ЭДС источника входного сигнала
 E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

$$I_b = f(U_{be}) \Big|_{U_{ce} = const}$$

E_1 – ЭДС источника входного сигнала
 E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

$$I_c = f(I_b) \Big|_{U_{ce} = 5 V}$$

E_1 – ЭДС источника входного сигнала
 E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).



А теперь можно построить характеристики

обратной связи по напряжению:
$$U_{\text{бз}} = f(U_{\text{вх}}) \Big|_{I_{\text{б}} = \text{const}}$$

E_1 – ЭДС источника входного сигнала

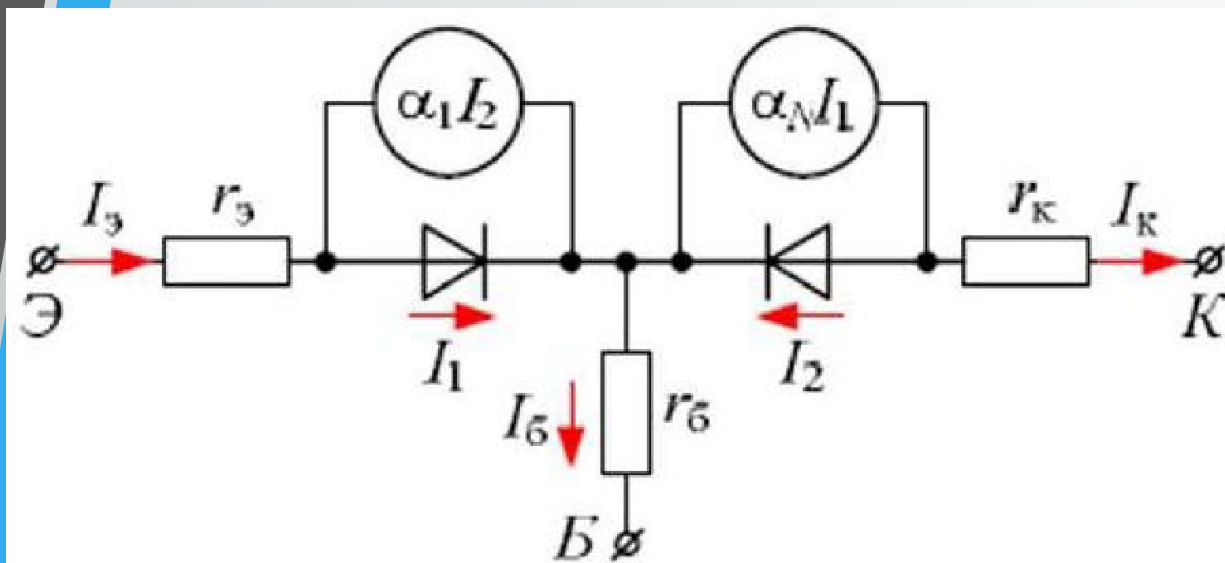
E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

E_1 – ЭДС источника входного сигнала

E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

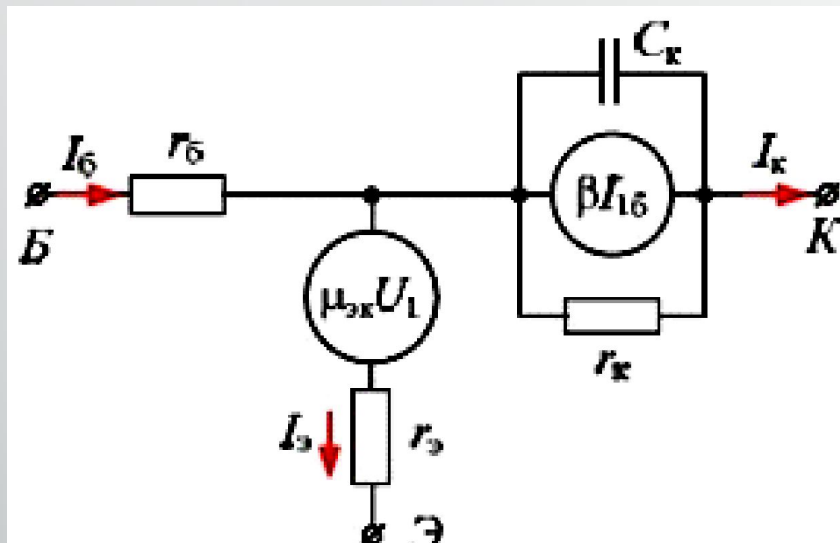
Эквивалентные схемы транзистора

Реальный транзистор при расчете электронных схем можно представить в виде эквивалентной схемы



r – сопротивление эмиттерной области,
 r_6 – сопротивление базы,
 r_k – сопротивление коллектора.

Эквивалентная схема транзистора по постоянному току



Эквивалентная схема транзистора по переменному току

$$\beta = \left. \frac{dI_{\kappa}}{dI_{\text{б}}} \right|_{U_{\kappa} = \text{const}} - \text{динамический коэффициент передачи по току;}$$

$$r_{\text{э}} = \left. \frac{dU_{\text{э}}}{dI_{\text{э}}} \right|_{U_{\kappa} = \text{const}} - \text{динамическое сопротивление эмиттера;}$$

$$r_{\kappa} = \left. \frac{dU_{\kappa}}{dI_{\kappa}} \right|_{I_{\text{э}} = \text{const}} - \text{динамическое сопротивление коллектора;}$$

$$\mu_{\text{э}\kappa} = \left. \frac{dU_{\text{э}}}{dI_{\kappa}} \right|_{I_{\text{э}} = \text{const}} - \text{динамический коэффициент внутренней обратной связи по напряжению;}$$

$r_{\text{б}}$ – объемное сопротивление базы;

C_{κ} – ёмкость коллекторного перехода.

Транзистор как линейный четырехполюсник

Транзистор с его внутренними параметрами, определяемыми эквивалентной схемой, можно представить в виде линейного четырехполюсника



Схема четырехполюсника

E_1 – ЭДС источника входного сигнала
 E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

Система уравнений, связывающая между собой зависимые и независимые переменные, выглядит так:

$$\begin{aligned} U_1 &= h_{11} \cdot I_1 + h_{12} \cdot U_2 \\ I_2 &= h_{21} \cdot I_1 + h_{22} \cdot U_2 \end{aligned}$$

С учетом h-параметров эквивалентная схема транзистора выглядит следующим образом

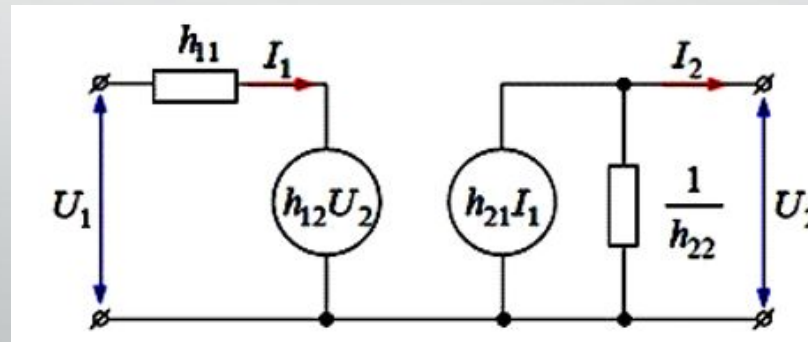
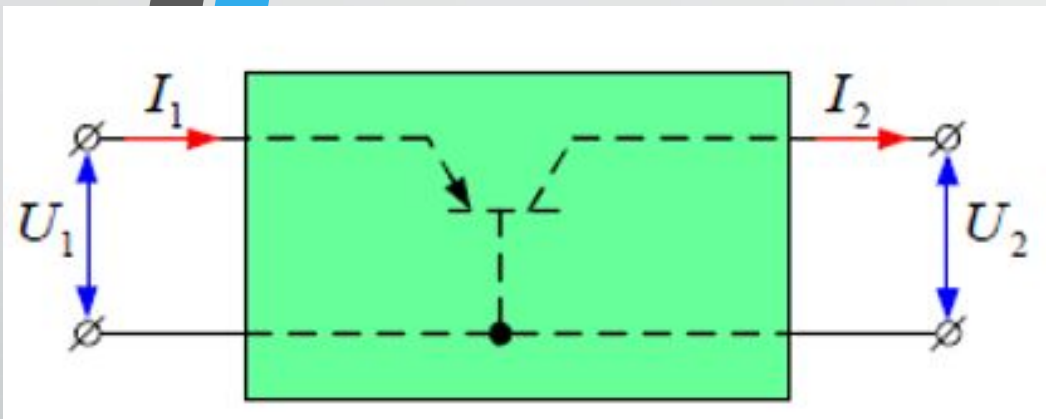


Схема замещения транзистора

Для различных схем включения транзистора h-параметры будут различны



Эквивалентная схема четырехполюсника для схемы

Для схемы с общей базой входными и выходными величинами являются

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{эб}; & I_1 &= I_э; \\ U_2 &= U_{кэ}; & I_2 &= I_к. \end{aligned}$$

Схемы с общей базой они определяются по выражениям:

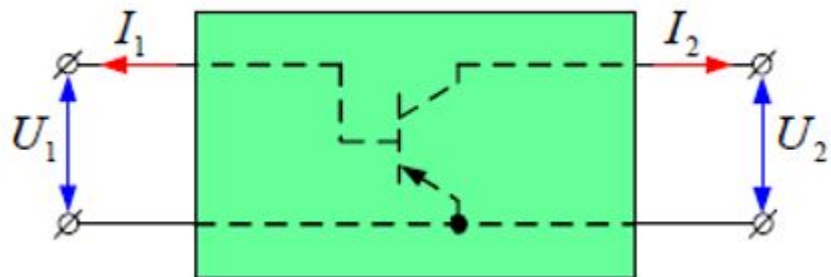
$$h_{11б} = \left. \frac{\Delta U_{эб}}{\Delta I_э} \right|_{U_{кб} = const}$$

$$h_{12б} = \left. \frac{\Delta U_{эб}}{\Delta U_{кб}} \right|_{I_э = const}$$

$$h_{21б} = \left. \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э} \right|_{U_{кб} = const}$$

$$h_{22б} = \left. \frac{\Delta I_к}{\Delta U_{кб}} \right|_{I_э = const}$$

Индекс «б» говорит о принадлежности этих параметров к схеме с общей базой.



Эквивалентная схема четырехполюсника
для схемы с общим эмиттером

и составляет десятки – сотни единиц;

$$h_{22э} = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta U_{\kappaэ}} \Big|_{I_{\delta} = const}$$

E_1 – ЭДС источника входного сигнала
 E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

Для схемы с общим эмиттером входными и выходными величинами являются

$$U_1 = U_{\deltaэ}; I_1 = I_{\delta}; U_2 = U_{\kappaэ}; I_2 = I_{\kappa}.$$

Для схемы с общим эмиттером h-параметры определяются из соотношений

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{\deltaэ}}{\Delta I_{\delta}} \Big|_{U_{\kappaэ} = const}$$

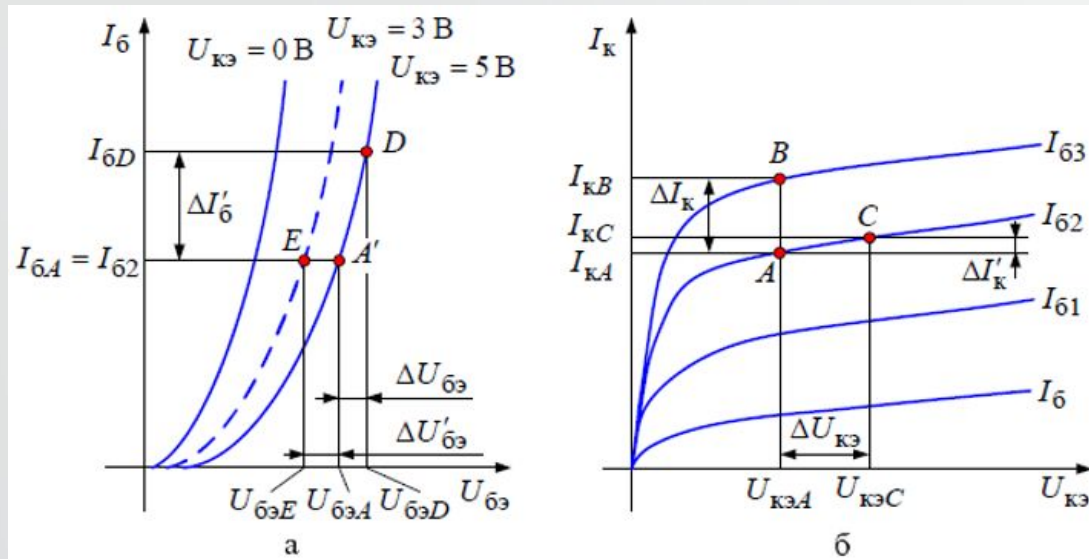
и составляет от сотен Ом до единиц кОм

$$h_{12э} = \frac{\Delta U_{\deltaэ}}{\Delta U_{\kappaэ}} \Big|_{I_{\delta} = const}$$

Напряжение передаваемое с выхода на вход за счет обратной связи, составляет тысячные или десятитысячные доли выходного напряжения

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\delta}} \Big|_{U_{\kappaэ} = const}$$

Схемы с общим эмиттером семейства входных и выходных характеристик



Определение h-параметров по статическим характеристикам транзистора

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

$$\Delta I_б = I_{б3} - I_{б2}.$$

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника)

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} \right|_{U_{кэ} = const}$$

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

$$\Delta I'_\kappa = I_{\kappa C} - I_{\kappa A}.$$

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

$$h_{223} = \left. \frac{\Delta I'_\kappa}{\Delta U_{\kappa3}} \right|_{I_6 = I_{62} = const}.$$

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

$$h_{113} = \left. \frac{\Delta U_{63}}{\Delta I'_6} \right|_{U_{\kappa3} = const}.$$

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

$$\Delta U'_{63} = U_{63A} - U_{63E} \text{ и } \Delta U'_{\kappa3} = U_{\kappa3A} - U_{\kappa3E} = 5 - 3 = 2 \text{ В},$$

Подставляя найденные значения в выражение, можно было бы получить

$$h_{123} = \left. \frac{\Delta U'}{\Delta I'} \right|_{I_6 = I_{6A} = const}$$

Режимы работы транзистора

При изменении величины входного сигнала будет изменяться ток базы I_B . Ток коллектора I_K изменяется пропорционально току базы:

$$I_K = \beta * I_B.$$

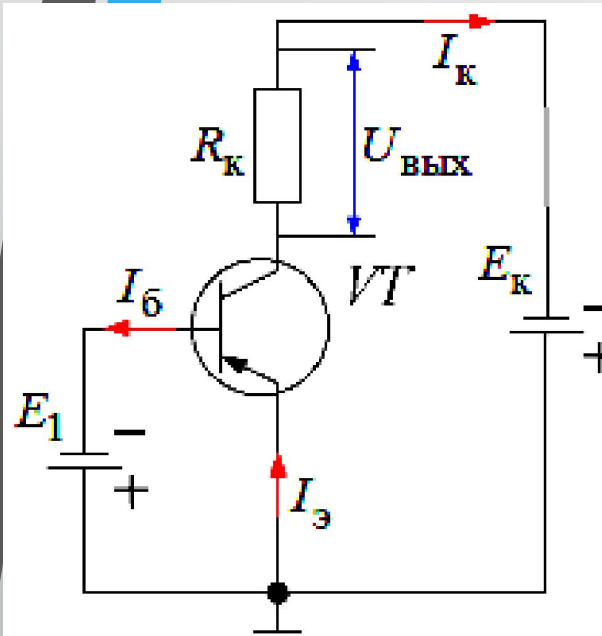


Схема усилительного каскада

На оси абсцисс отложим отрезок, равный E_K – напряжению источника питания коллекторной цепи, а на оси ординат отложим отрезок, соответствующий максимально возможному току в цепи этого источника:

$$I_{K \max} = \frac{E_K}{R_K}.$$

Между этими точками проведем прямую линию, которая называется *линией нагрузки* и описывается уравнением:

$$I_{\kappa} = \frac{E_{\kappa} - U_{\kappa\epsilon}}{R_{\kappa}},$$

где $U_{\kappa\epsilon}$ – напряжение между коллектором и эмиттером транзистора;
 R_{κ} – сопротивление нагрузки в коллекторной цепи.

$$R_{\kappa} = \frac{E_{\kappa}}{I_{\kappa \max}} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Зона, расположенная между осью абсцисс и начальной выходной характеристикой, соответствующей $I_b = 0$, называется *зоной отсечки*

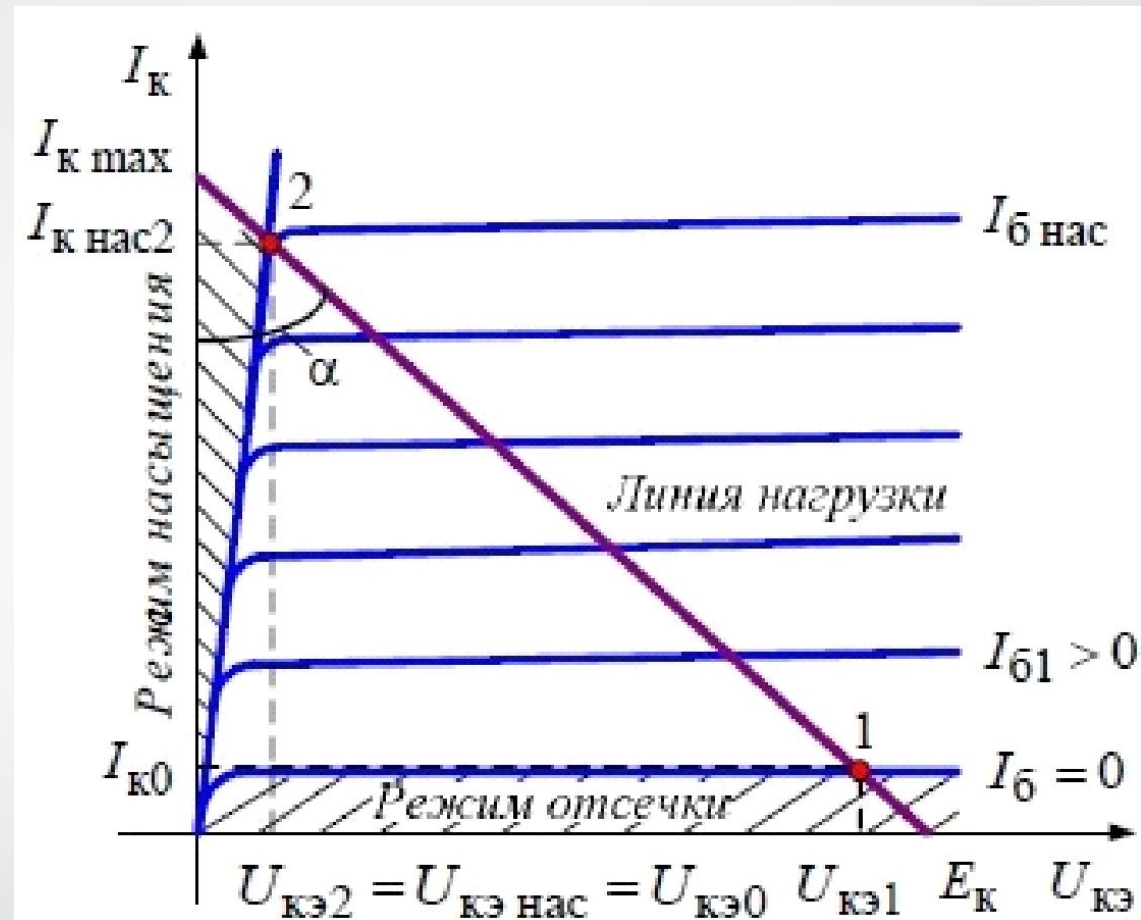
Она характеризуется тем, что оба перехода транзистора – эмиттерный и коллекторный смещены в обратном направлении.

Коллекторный ток при этом представляет собой обратный ток коллекторного перехода $-I_{k0}$, который очень мал и поэтому почти все напряжение источника питания E_k падает между эмиттером и коллектором закрытого транзистора:

$$U_{кэ1} \approx E_k.$$

А падение напряжения на нагрузке U_n очень мало и равно:

$$U_{R_k} = I_k \cdot R_k.$$



Режим работы биполярного транзистора

Говорят, что в этом случае транзистор работает в *режиме отсечки*. Поскольку в этом режиме ток, протекающий по нагрузке исчезающе мал, а почти все напряжение источника питания приложено к закрытому транзистору, то в этом режиме транзистор можно представить в виде разомкнутого ключа.

Если теперь увеличивать базовый ток I_b , то рабочая точка будет перемещаться вдоль линии нагрузки, пока не достигнет точки 2. Базовый ток, соответствующий характеристике, проходящей через точку 2, называется *током базы насыщения* $I_{b \text{ нас}}$. Здесь транзистор входит в режим насыщения и дальнейшее увеличение базового тока не приведет к увеличению коллекторного тока I_k . Зона между осью ординат и круто изменяющимся участком выходных характеристик называется *зоной насыщения*.

В этом случае оба перехода транзистора смещены в прямом направлении; ток коллектора достигает максимального значения и почти равен максимальному току источника коллекторного питания:

$$I_{\text{к макс}} \approx I_{\text{к макс 2}}$$

Напряжение между коллектором и эмиттером открытого транзистора $U_{\text{кэ0}}$ оказывается очень маленьким. Поэтому в режиме насыщения транзистор можно представить в виде замкнутого ключа.

Промежуточное положение рабочей точки между зоной отсечки и зоной насыщения определяет работу транзистора в режиме усиления, а область, где она находится, называется *активной областью*. При работе в этой области эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном.

Предельные режимы работы транзистора

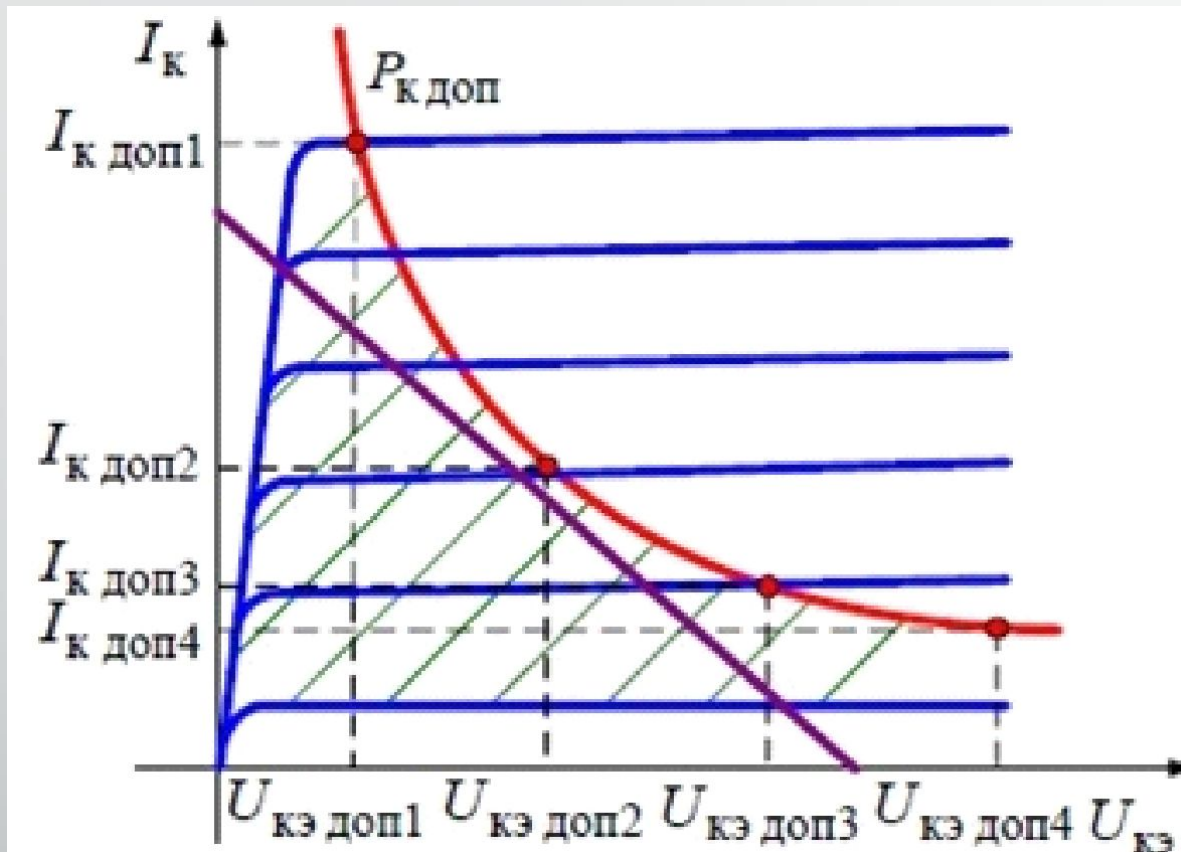
В паспортных данных каждого транзистора указывается его предельно допустимая мощность рассеивания, превышение которой недопустимо, так как ведет к тепловому разрушению полупроводниковой структуры. Оно равно:

$$P_{к доп} = U_{кз} \cdot I_{к доп}$$

Будем задавать дискретные значения напряжения $U_{кз}$: $U_{кз1}$, $U_{кз2}$, $U_{кз3}$ и т. д., и для каждого этого значения напряжения вычислим предельно допустимое значение коллекторного тока $I_{к доп}$:

$$I_{к доп1} = \frac{P_{к доп}}{U_{кз1}}, \quad I_{к доп2} = \frac{P_{к доп}}{U_{кз2}} \text{ и т. д.}$$

Отложим значения напряжений и токов в осях координат и построим по полученным точкам кривую, называемую *гиперболой допустимых мощностей*.

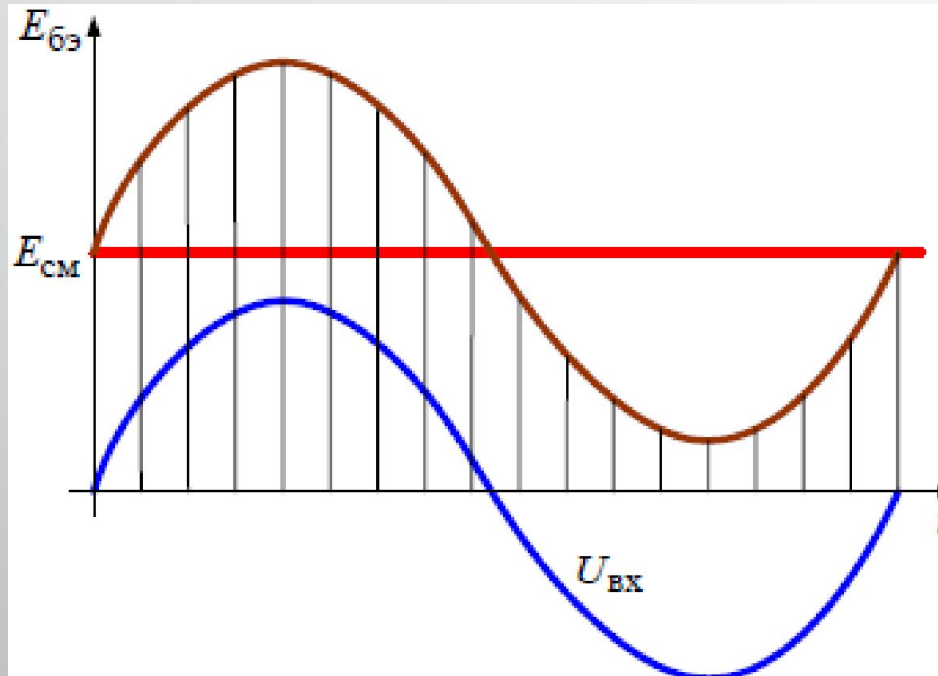


На рисунке заштрихована рабочая область семейства выходных характеристик транзистора для схемы с общим эмиттером.

Гипербола допустимых мощностей

Расчет рабочего режима транзистора

Поскольку эмиттерный p - n -переход обладает вентильными свойствами, то через него пройдет только положительная полуволна входного сигнала, а отрицательная полуволна будет им срезана и, следовательно, усиливаться не будет. Для того чтобы этого не было, чтобы усилить весь сигнал, во входную цепь транзистора вводят так называемое *смещение*.

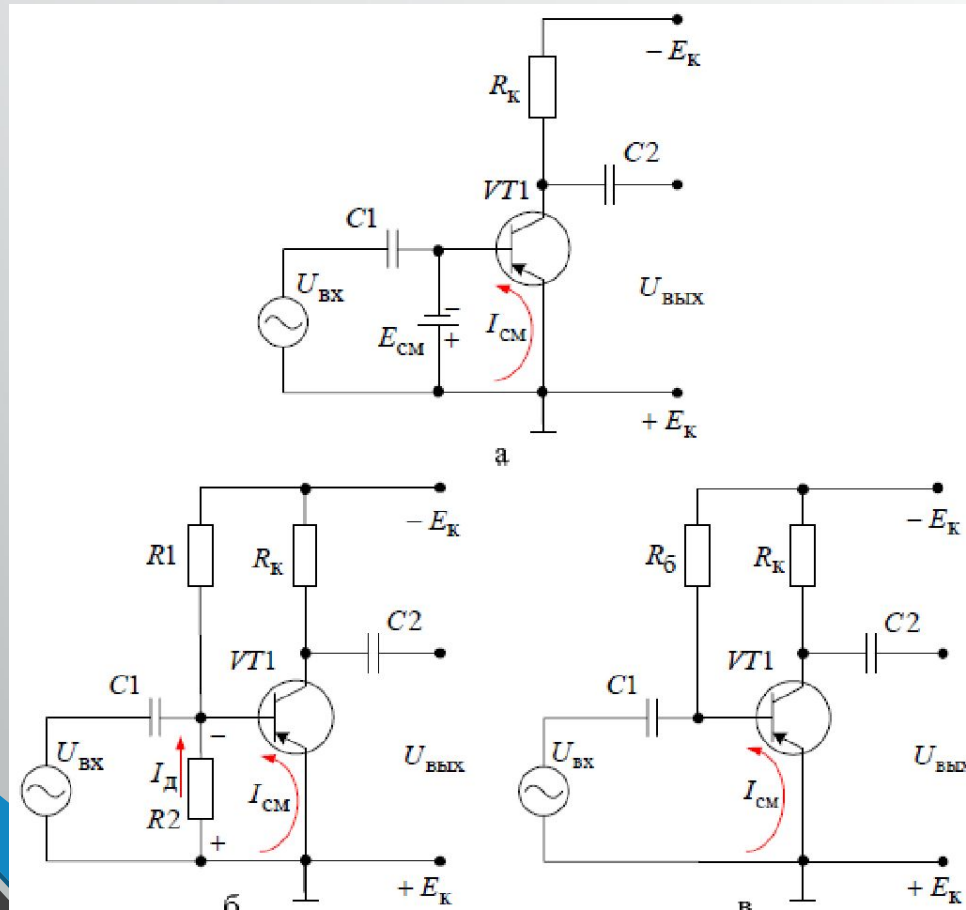


Смещение усиливаемого сигнала

Знакопеременный входной сигнал $U_{вх}$ накладывается на постоянное напряжение смещения $E_{см}$ таким образом, что результирующее напряжение $U_{бэ}$ остается однополярным, и, следовательно, может быть усилено транзистором. Поэтому принципиальная схема усилительного каскада в этом случае выглядит так, как представлено на рисунке

Смещение может вводиться как при помощи отдельного источника $E_{см}$ а), так и с использованием для этой цели источника коллекторного питания $E_{к}$. Это можно сделать при помощи делителя напряжения $R1$ и $R2$ б). Ток I_{∂} , протекающий по делителю напряжения $R1$ и $R2$ под действием источника питания $E_{к}$, создает на резисторе $R2$ падение напряжения

$$U_{R2} = I_{\partial} \cdot R2$$



а – введением источника $E_{см}$,
 б – фиксированным напряжением,
 в – фиксированным током

Способы создания смещения входного сигнала:

При расчете делителя ток I_{∂} выбирают в несколько раз больше тока смещения:

$$I_{\partial} = (3 \div 5) \cdot I_{см}$$

Избыточное напряжение источника питания падает на резисторе R_1 :

$$I_{\partial} \cdot R_1 = E_k - U_{R2}$$

Такой способ введения смещения называется *смещение фиксированным напряжением*.

Другой способ введения смещения заключается в использовании балластного резистора R_b в базовой цепи транзистора. В этом случае ток, протекающий по цепи $+E_k$, эмиттер – база транзистора, R_b , $-E_k$ должен быть равен току смещения:

$$I_{см} = \frac{E_k - U_{бэ}}{R_b}$$

Отсюда величина R_b должна быть равна:

$$R_b = \frac{E_k - U_{бэ}}{I_{см}}$$

Такой способ называется *смещение фиксированным током*.

Динамические характеристики транзистора

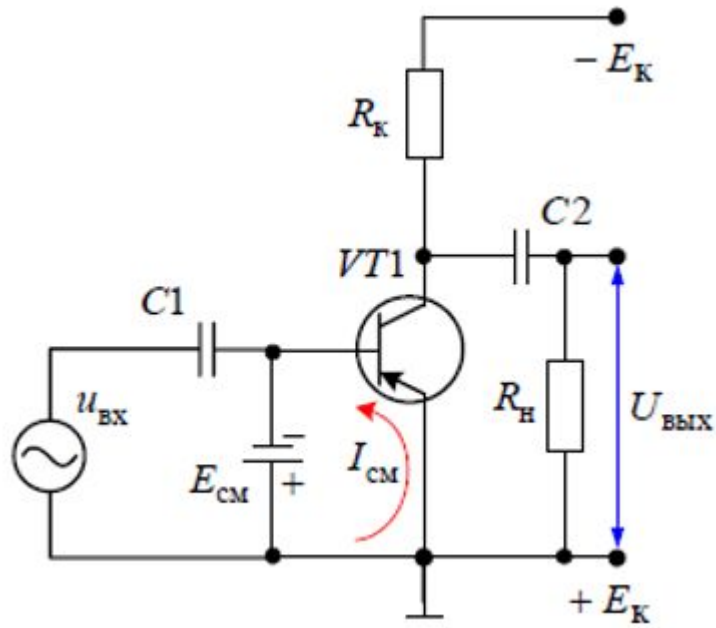


Схема усилительного каскада

Характеристики транзистора, когда в его выходную цепь включают различные виды нагрузок, называют динамическими, а режимы, возникающие при этом, – **динамическими режимами**

В качестве нагрузки может служить и входное сопротивление следующего каскада усиления, а характер нагрузки в общем случае может быть различным

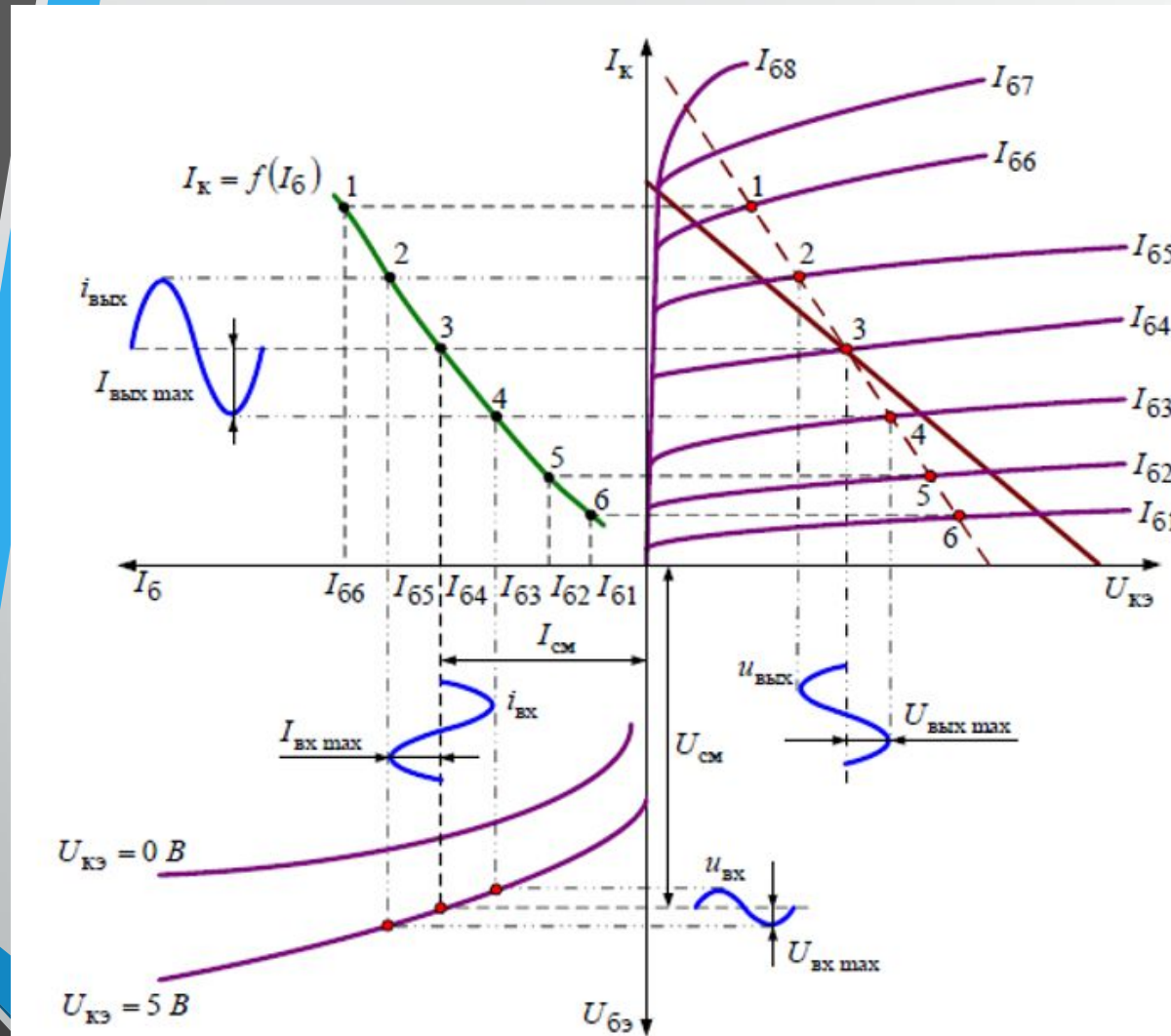
По переменному току нагрузка усилительного каскада R'_H состоит из параллельно включенных сопротивлений R_K и R_H а по постоянному току – только R_K

$$R'_H = \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H}$$

если сопротивление нагрузки R'_H по переменному току меньше R_K – сопротивления по постоянному току, то линия нагрузки будет проходить через ту же рабочую точку А, но под другим углом α'

$$\alpha' = \arctg(R'_H),$$

Первом квадранте - выходные характеристики транзистора с построенной линией нагрузки, а в третьем квадранте – входные характеристики



Строим характеристику управления $I_K = f(I_6)$ транзистора по переменному току, которая теперь, при работе с нагрузкой, называется динамической.

Характеристики транзистора

Режимы работы усилительных каскадов

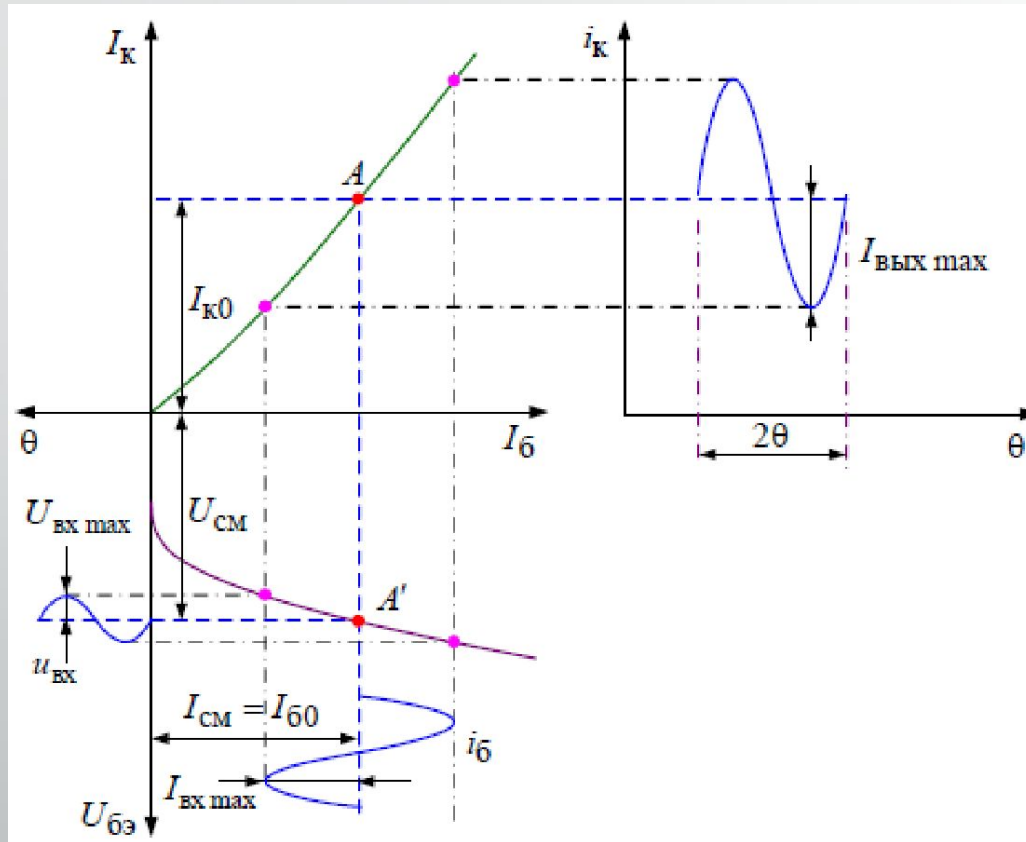
Величина искажений в большой степени зависит от выбора начальной рабочей точки на линии нагрузки и от амплитуды входного сигнала. В зависимости от этого различают следующие основные режимы работы усилителя:

- режим класса *A*;
- режим класса *B*;
- режим класса *AB*;
- режим класса *C*;
- режим класса *D*.

Количественно режим работы усилителя характеризуется углом отсечки θ – половиной той части периода входного сигнала, в течение которого в выходной цепи транзистора протекает ток нагрузки.

Режим класса А

Этот режим характеризуется тем, что начальная рабочая точка, определяемая смещением, находится в середине линейного участка входной характеристики, а, следовательно, и характеристики передачи по току $I_K = f(I_B)$.



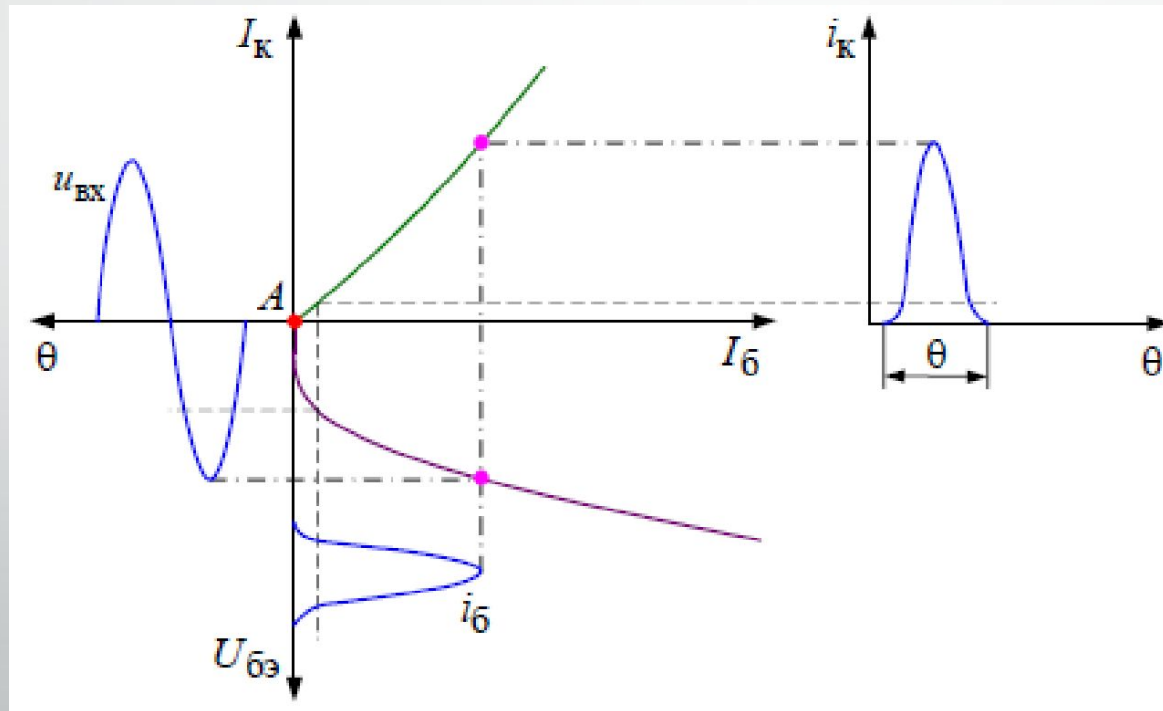
КПД такого усилителя низкий (теоретически не более 25 %, а реальные значения и того ниже), поэтому такой режим применяют в маломощных каскадах предварительного усиления.

Усиление в режиме класса А

Режим класса В

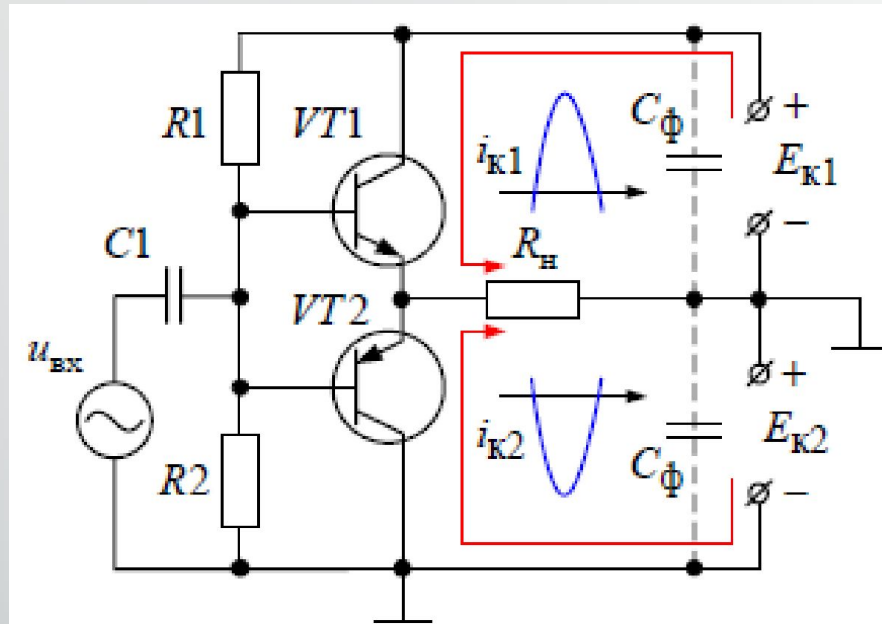
Этот режим характеризуется тем, что начальная рабочая точка находится в начале характеристики передачи по току $I_K = f(I_B)$

Ток нагрузки протекает по коллекторной цепи транзистора только в течение одного полупериода входного сигнала, а в течение второго полупериода транзистор закрыт, так как его рабочая точка будет находиться в зоне отсечки. КПД усилителя в режиме класса В значительно выше (составляет 60 - 70%), но большой уровень нелинейных искажений (колоколообразные искажения), вызванных повышенной нелинейностью усиления транзистора, когда он находится вблизи режима отсечки.



Усиление в режиме класса В

Для того чтобы усилить входной сигнал в течение обоих полупериодов, используют двухтактные схемы усилителей, когда в течение одного полупериода работает один транзистор, а в течение другого полупериода – второй транзистор в этом же режиме.



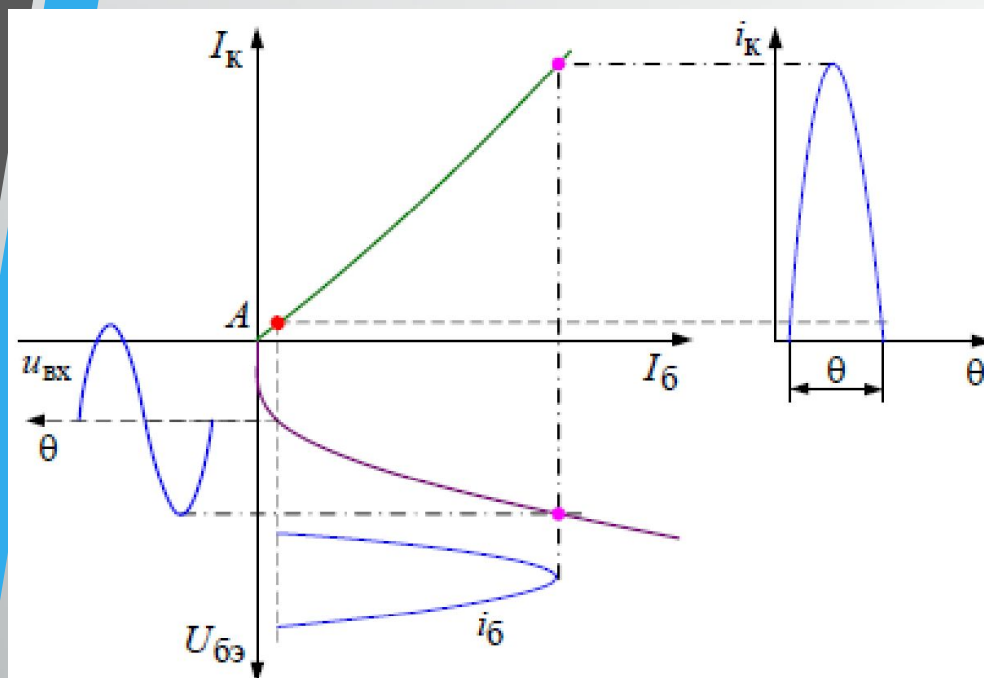
Слева представлена схема двухтактного эмиттерного повторителя на транзисторах противоположного типа, но с идентичными параметрами, образующих так называемую *комплементарную пару*.

Двухтактная схема класса B с симметричным источником питания

Режим класса B обычно используют преимущественно в мощных двухтактных усилителях, однако в чистом виде его применяют редко. Чаще в качестве рабочего режима используют промежуточный режим класса AB .

Режим класса *AB*

Режиму усиления класса *AB* соответствует режим работы усилительного каскада, при котором ток в выходной цепи протекает больше половины периода изменения напряжения входного сигнала. Этот режим используется для уменьшения нелинейных искажений усиливаемого сигнала.

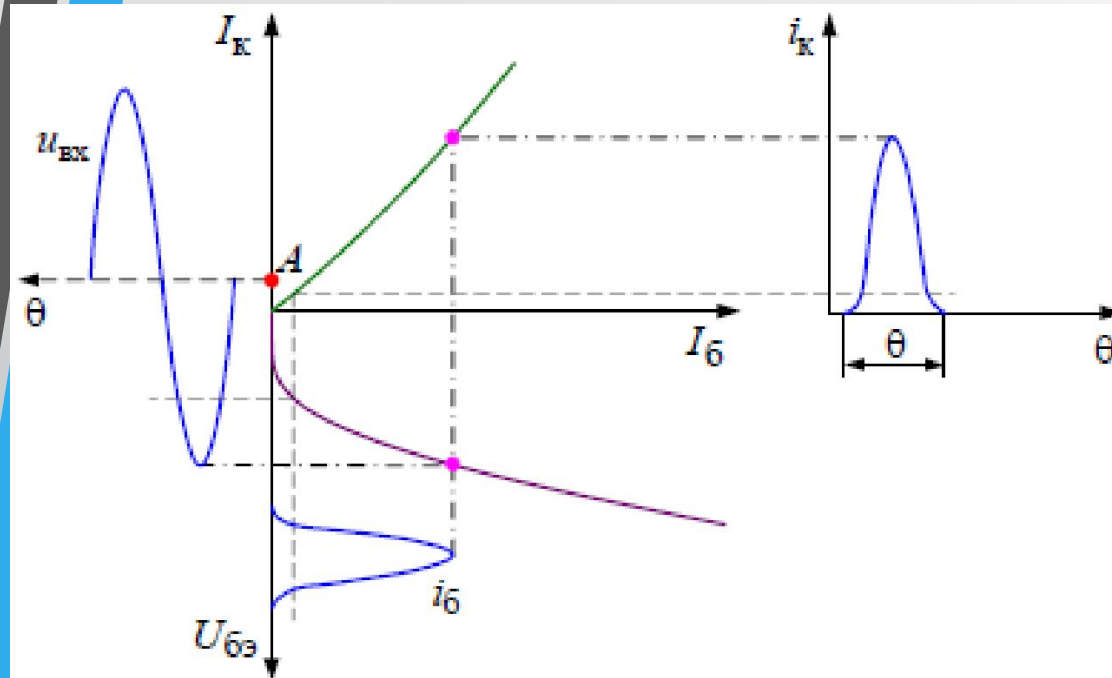


Усиление в режиме класса *AB*

КПД каскадов при таком классе усиления выше, чем для класса *A*, но меньше, чем в классе *B*, за счет наличия малого коллекторного тока I_{K0}

Режим класса С

В режиме класса *С* рабочая точка *А* располагается выше начальной точки характеристики передачи по току



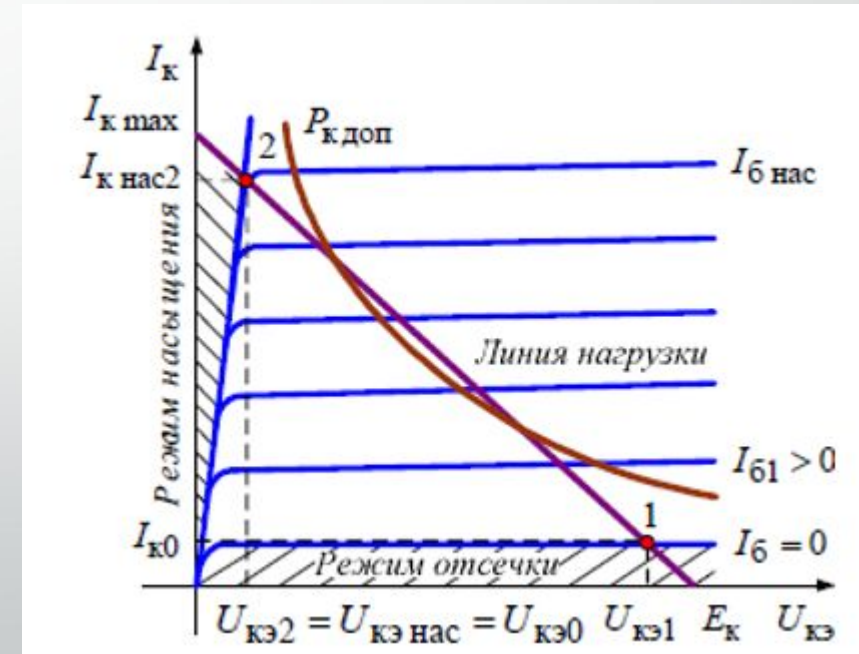
Здесь ток коллекторной цепи протекает в течение времени, которое меньше половины периода входного сигнала, поэтому угол отсечки $90 < \theta$.
Поскольку больше половины рабочего времени транзистор закрыт (коллекторный ток равен нулю), мощность, потребляемая от источника питания, снижается, так что КПД каскада приближается к 100%.

Из-за больших нелинейных искажений режим класса *С* не используется в усилителях звуковой частоты, этот режим нашел применение в мощных резонансных усилителях (например, радио-передатчиках).

Режим класса D

- **Режим класса D - ключевым режимом.** В этом режиме рабочая точка может находиться только в двух возможных положениях:
 - ❖ Либо в зоне отсечки (транзистор заперт и его можно рассматривать как разомкнутый ключ),
 - ❖ Либо в зоне насыщения (транзистор полностью открыт и его можно рассматривать как замкнутый ключ).

При работе в ключевом режиме линия нагрузки может на среднем своем участке выходить за пределы гиперболы допустимых мощностей



Ключевой режим работы транзистора

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

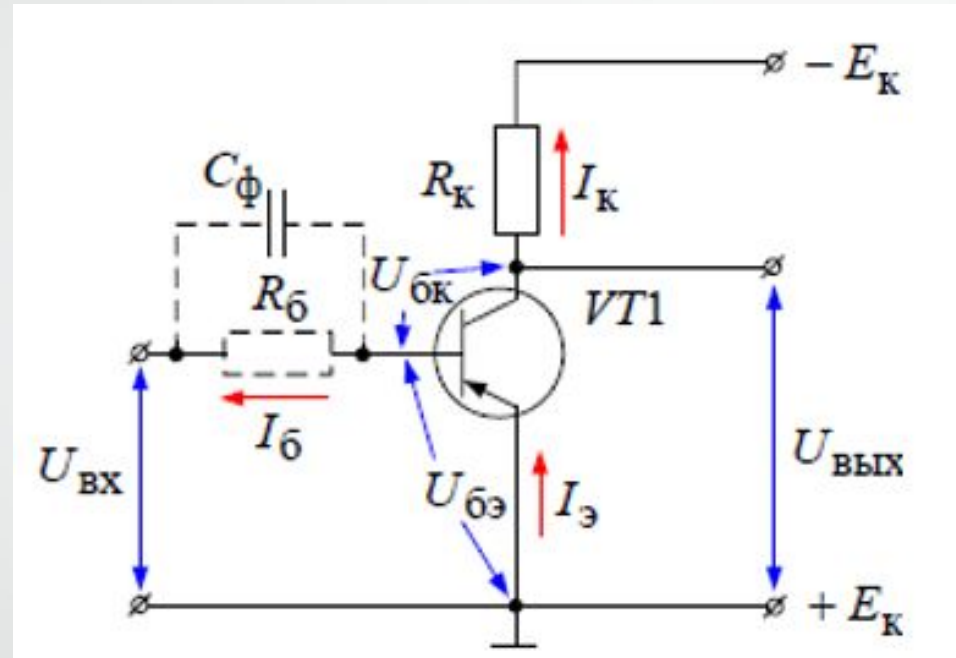


Схема ключевого режима работы транзистора

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

$$U_{\bar{\delta\kappa}} = -E_{\kappa} + I_{\kappa} \cdot R_{\kappa} + U_{\bar{\delta\eta}}$$

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

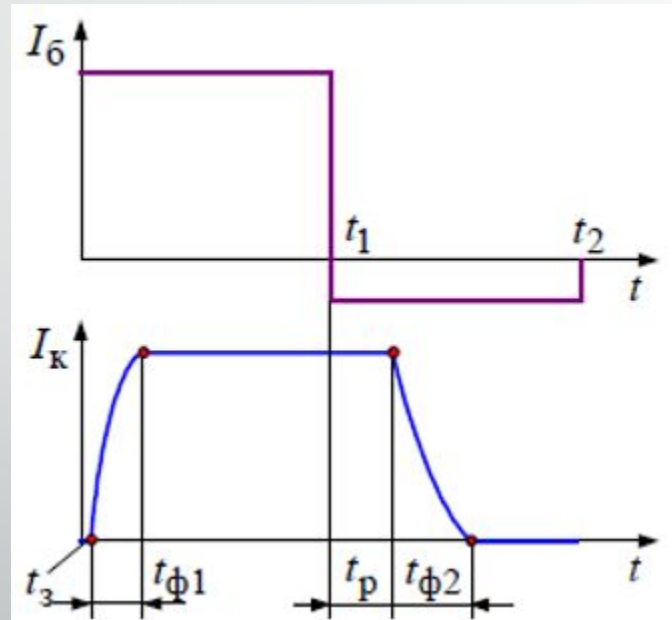
$$I_{\kappa} \cdot R_{\kappa} \geq E_{\kappa}.$$

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

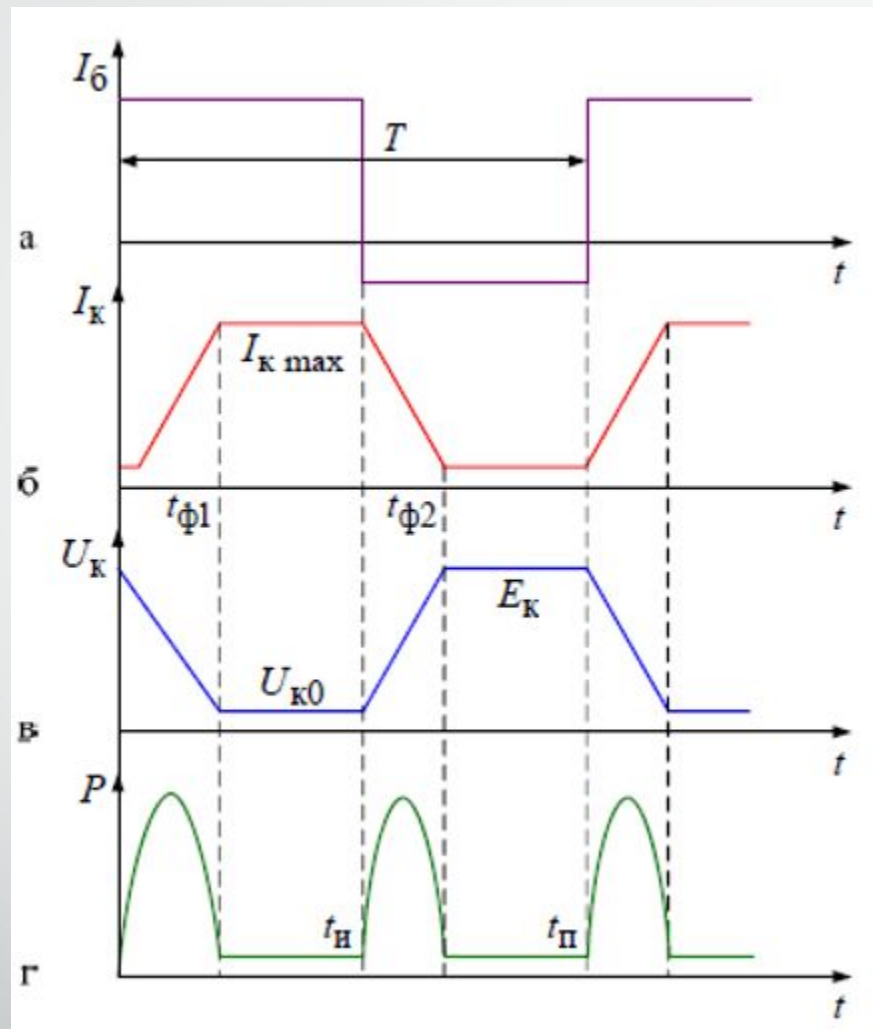
Относительное значение этого превышения называется степенью насыщения N транзистора:

$$N = \frac{I_{\bar{\sigma}} - I_{\bar{\sigma} \text{ нас}}}{I_{\bar{\sigma} \text{ нас}}},$$

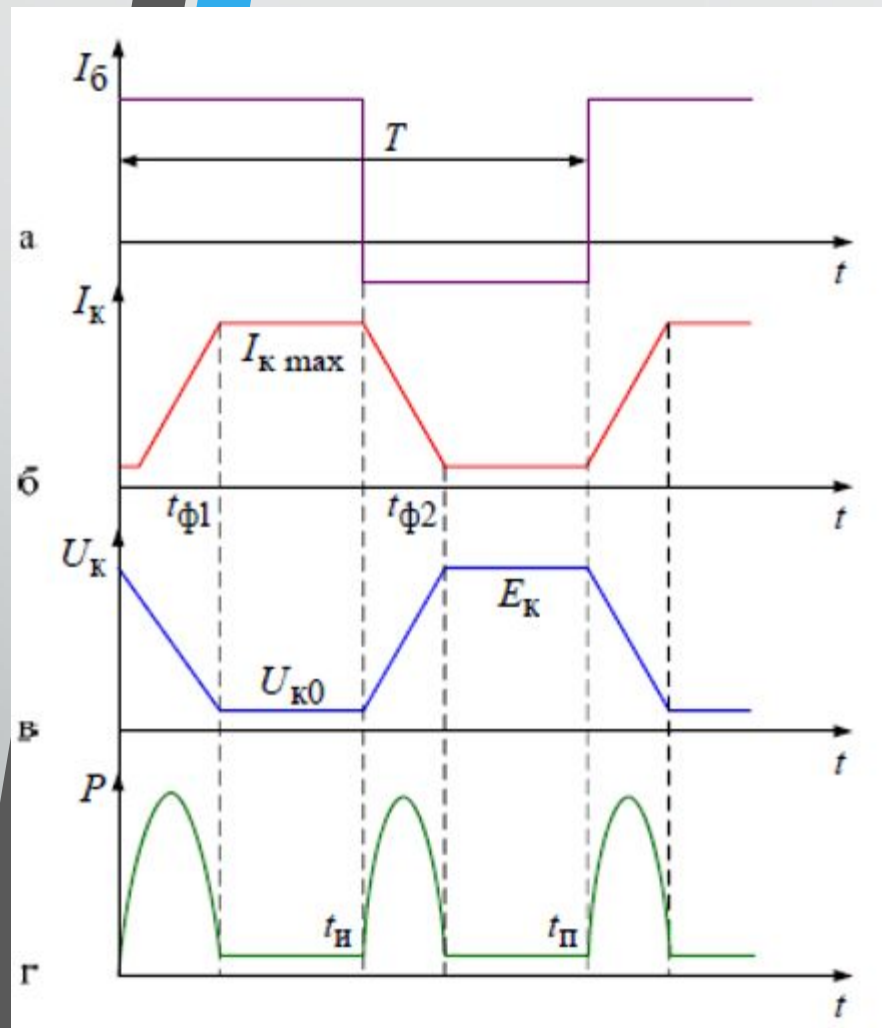


Переходный процесс переключения транзистора

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).



Мощность, выделяемая на транзисторе при ключевом режиме работы



Представлена мощность P , рассеиваемая на транзисторе:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^{t_{\phi 1}} u_{кэ} i_{к} dt + \frac{1}{T} \int_{t_{\phi 1}}^{t_u} U_{к0} I_{к \max} dt + \frac{1}{T} \int_{t_u}^{t_{\phi 2}} u_{кэ} i_{к} dt + \frac{1}{T} \int_{t_{\phi 2}}^{t_{\kappa}} E_{к} I_{к0} dt.$$

T – период следования импульсов;

E_1 – ЭДС источника входного сигнала

E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

E_1 – ЭДС источника входного сигнала

E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

E_1 – ЭДС источника входного сигнала

E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

E_1 – ЭДС источника входного сигнала

E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

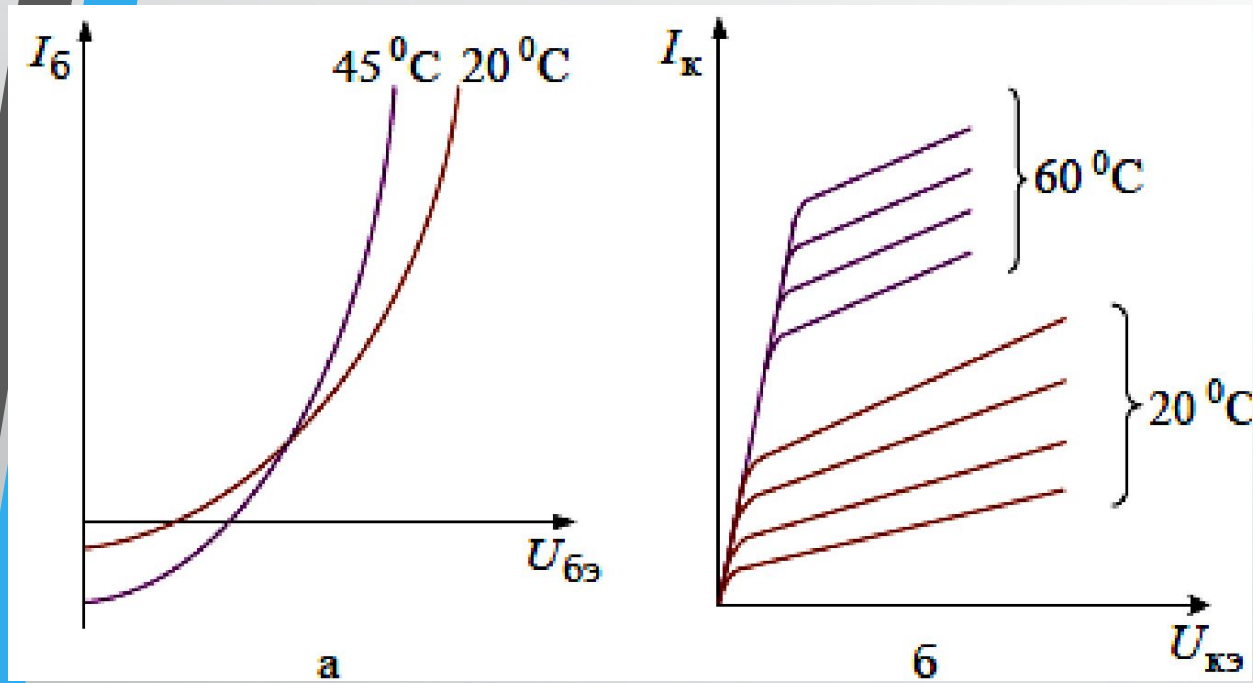
Выводы

КПД усилительного каскада определяется режимом работы транзистора и связан с углом отсечки

Различают режимы работы транзистора с отсечкой выходного тока (AB, B, C, D) и без отсечки (A), когда выходной ток протекает в течение всего периода входного сигнала.

Усилительный каскад, работающий с отсечкой выходного тока, имеет наибольший КПД.

Влияние температуры на работу усилительных каскадов



Изменение температуры оказывает значительное влияние на работу полупроводниковых приборов.

В качестве иллюстрации этого приведем пример изменения под действием температуры входных и выходных статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Влияние температуры на статические характеристики транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером

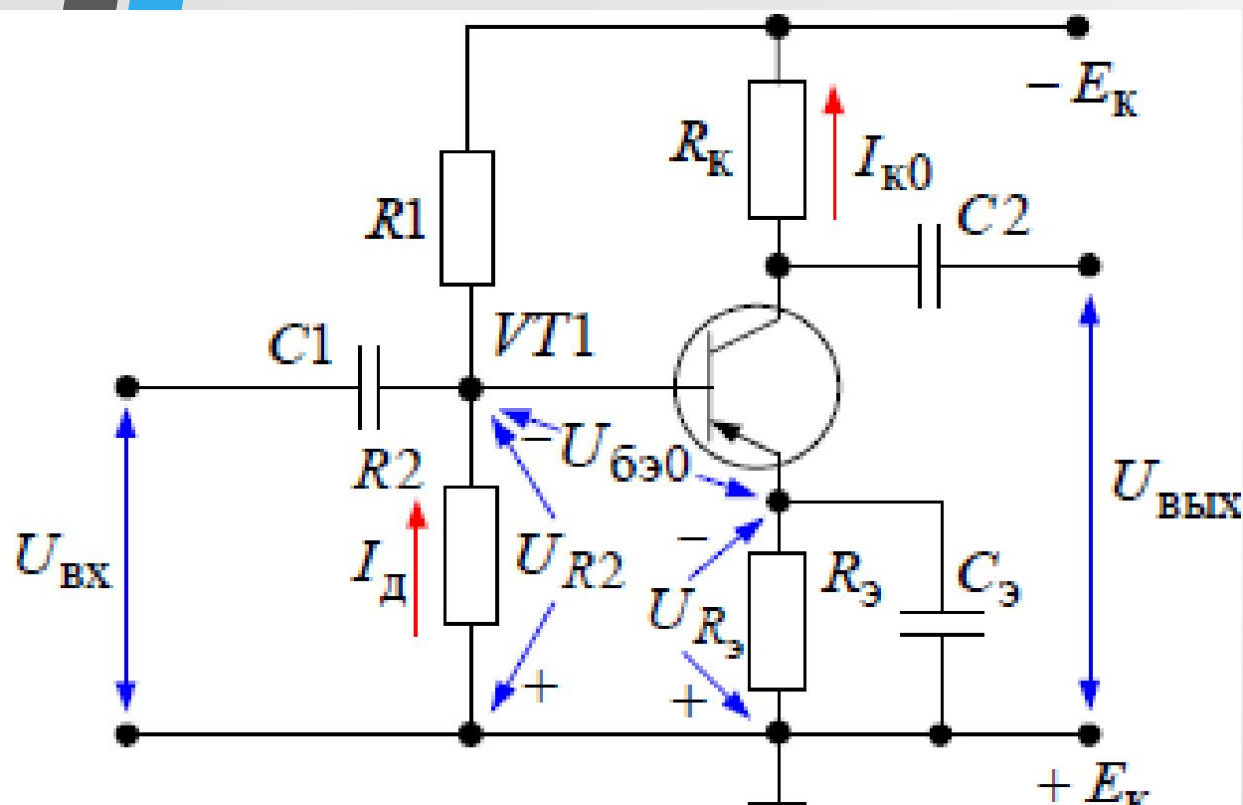


Схема эмиттерной стабилизации
положения рабочей точки

В схеме усилительного каскада на рисунке в цепь эмиттера включено сопротивление R_3 , шунтированное конденсатором C_3 . Для создания смещения здесь используется делитель напряжения $R1 - R2$.

Начальный коллекторный ток $I_{к0}$ создает на эмиттерном сопротивлении R_3 падение напряжения

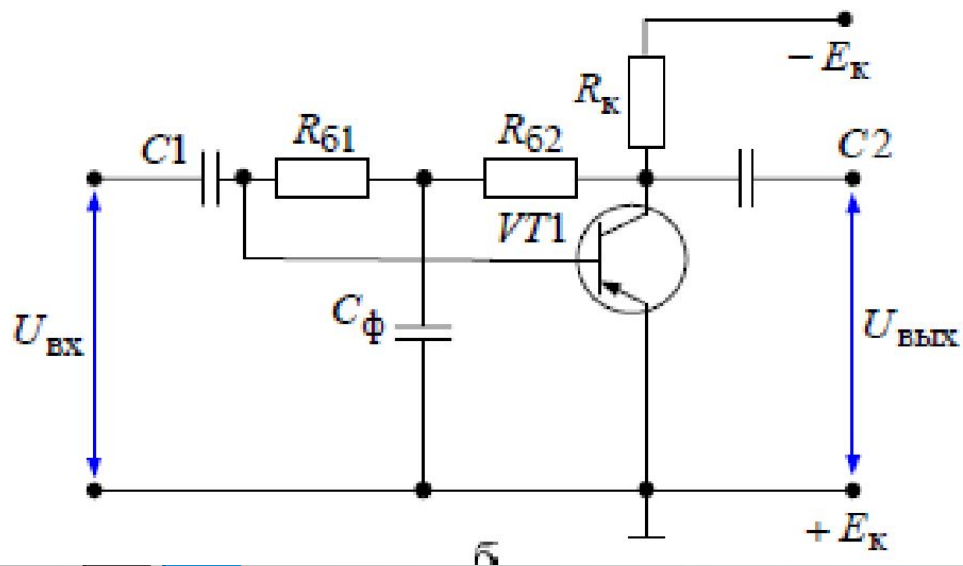
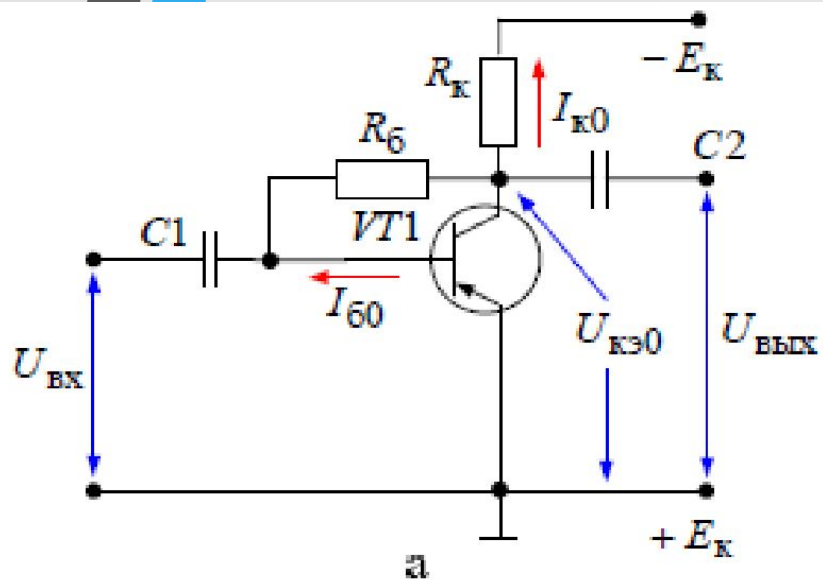
$$U_{R_3} = I_{к0} R_3.$$

Полярность этого падения напряжения направлена навстречу падению напряжения на сопротивлении R_2 делителя напряжения, создающего напряжение смещения. Поэтому результирующее напряжение, определяющее смещение рабочей точки составляет:

$$U_{бэ0} = U_{R_2} - U_{R_3} = I_0 \cdot R_2 - I_{к0} \cdot R_3.$$

При повышении температуры транзистора его начальный коллекторный ток $I_{к0}$ возрастает, и, следовательно, возрастает второе слагаемое в (3.59). Это приводит к снижению величины напряжения на базе $U_{бэ0}$ и к уменьшению тока базы смещения $I_{б см}$ и к снижению начального коллекторного тока $I_{к0}$. То есть в данной схеме имеет место передача части энергии усиленного сигнала из выходной цепи усилителя во входную, что называется *обратной связью*.

Если подаваемый с выхода на вход усилителя сигнал обратной связи находится в противофазе с входным, ослабляет его, то такая обратная связь называется *отрицательной*. А если наоборот, сигнал обратной связи находится в фазе с входным сигналом и усиливает его, то такая обратная часть называется *положительной*.



В этой схеме, а) стабилизация осуществляется введением отрицательной обратной связи по напряжению.

Действительно, при повышении температуры возрастает начальный ток коллектора $I_{к0}$. Это приводит к увеличению падения напряжения на сопротивлении R_K и к уменьшению напряжения $U_{кэ0}$:

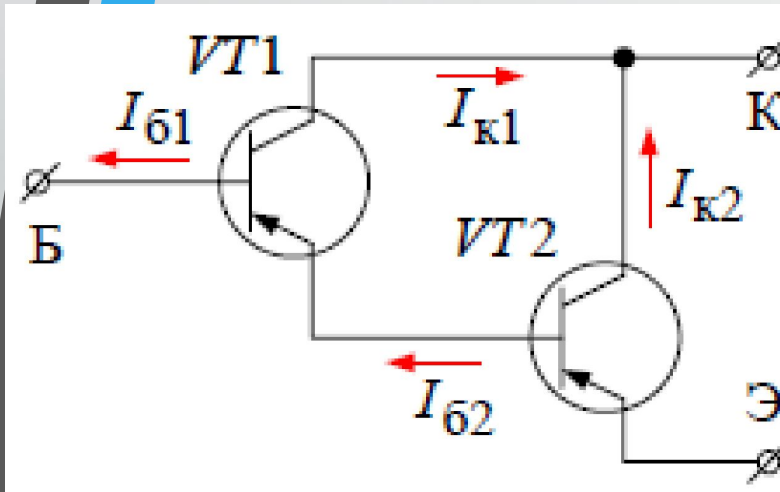
$$U_{кэ0} = E_K - I_{к0} \cdot R_K,$$

Чтобы при этом не снижать коэффициент усиления по переменной составляющей и не ослаблять полезный сигнал, в схему вводят конденсатор C_ϕ , б). В этом случае резистор R_K заменяют двумя резисторами $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$. Переменная, составляющая коллекторного напряжения, замыкается через конденсатор C_ϕ и практически не оказывает влияние на напряжение $U_{бэ}$ транзистора, а, следовательно, и на коэффициент усиления полезного сигнала.

Схема коллекторной стабилизации
положения рабочей точки

Составной транзистор

Составным транзистором называется соединение двух и более транзисторов, эквивалентное одному транзистору, но с большим коэффициентом усиления или другими отличительными свойствами.



1. Схема Дарлингтона.

Она характеризуется тем, что входные цепи всех входящих в нее транзисторов соединены последовательно, а выходные цепи — параллельно (рисунок 3.44). Транзисторы $VT1$ и $VT2$ являются составом составного транзистора, можно представить в виде одного транзистора с выводами эмиттера (Э), базы (Б) и коллектора (К). Коллекторный ток составного транзистора равен сумме коллекторных токов, входящих в него транзисторов:

$$I_K = I_{K1} + I_{K2}$$

Составной транзистор по схеме Дарлингтона

Коллекторный ток транзистора $VT1$:

$$I_{\kappa 1} = \beta_1 \cdot I_{\epsilon 1} = \beta_1 \cdot I_{\epsilon},$$

где β_1 – коэффициент усиления по току транзистора $VT1$.

Коэффициент усиления по току составного транзистора

$$\beta = \frac{I_{\kappa}}{I_{\epsilon}} = \frac{I_{\kappa 1} + I_{\kappa 2}}{I_{\epsilon}}.$$

Подставляя сюда значения $I_{\kappa 1}$ и $I_{\kappa 2}$, получаем

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_2.$$

Коллекторный ток транзистора $VT2$:

$$I_{\kappa 2} = \beta_2 \cdot I_{\epsilon 2},$$

где β_2 – коэффициент усиления по току транзистора $VT2$

$I_{\epsilon 2}$ – ток базы транзистора $VT2$.

$$I_{\epsilon 2} = I_{\kappa 1} + I_B$$

$$I_{\kappa 2} = \beta_2 \cdot (I_{\kappa 1} + I_{\epsilon}) = \beta_2 \cdot (\beta_1 \cdot I_{\epsilon} + I_{\epsilon}).$$

Входное сопротивление составного транзистора

$$R_{\epsilon x} = R_{\epsilon x 1} + R_{\epsilon x 2} \cdot (\beta_1 + 1).$$

где $R_{\epsilon x 1}$ и $R_{\epsilon x 2}$ – входные сопротивления транзисторов $VT1$ и $VT2$.

Выходное сопротивление составного транзистора

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{вых1}} \cdot R_{\text{вых2}}}{R_{\text{вых1}} + R_{\text{вых2}}}$$

где $R_{\text{вых1}}$ и $R_{\text{вых2}}$ – входные сопротивления транзисторов $VT1$ и $VT2$, соответственно.

Очевидно, что мощность транзистора $VT2$ должна быть больше мощности транзистора $VT1$, т. к. $I_{\text{к1}} \gg I_{\text{к2}}$.

Следует отметить, что в схему составного транзистора Дарлингтона может быть включено и большее количество отдельных транзисторов.

Составной транзистор на комплементарных транзисторах

Составлен на транзисторах противоположных типов электропроводности $p-n-p$ и $n-p-n$.

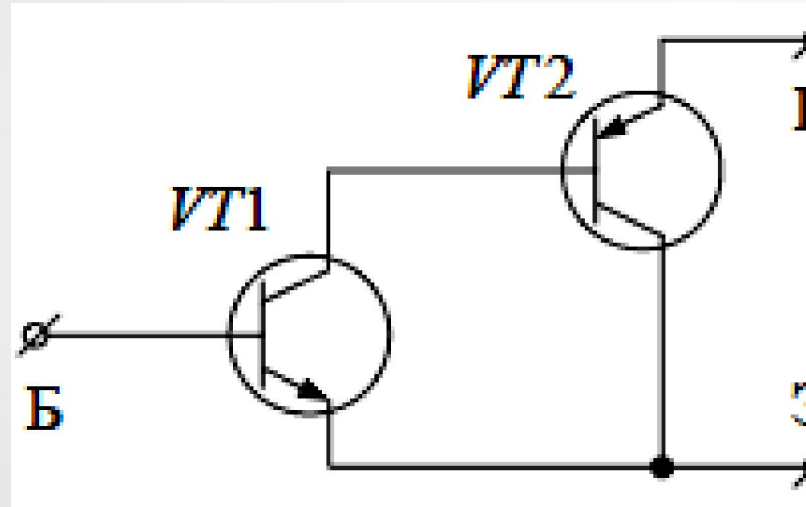
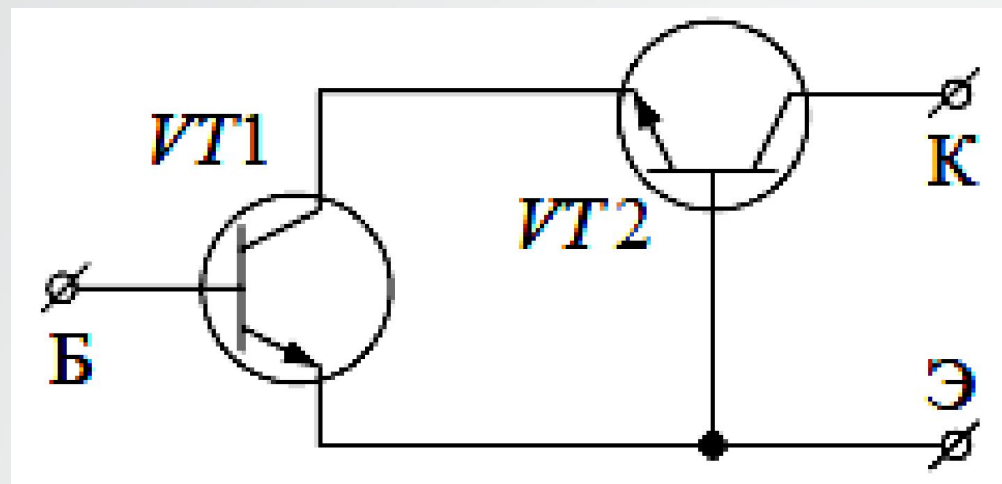


Схема на комплементарных транзисторах

Эта схема составного транзистора эквивалентна эмиттерному повторителю – транзистору, включенному по схеме с общим коллектором. Он имеет большое входное сопротивление и малое выходное, что очень важно во входных каскадах усиления.



Каскадная схема

Составной транзистор, выполненный по так называемой *каскадной схеме*. Она характеризуется тем, что транзистор $VT1$ включен по схеме с общим эмиттером, а транзистор $VT2$ – по схеме с общей базой. Такой составной транзистор эквивалентен одиночному транзистору, включенному по схеме с общим эмиттером, но при этом он имеет гораздо лучшие частотные свойства и большую неискаженную мощность в нагрузке.

Вывод

Соединение из двух или трёх транзисторов – составной транзистор – позволяет получить существенное увеличение коэффициента усиления по току или другие отличительные свойства по сравнению с одиночным транзистором.

Усилители постоянного тока

Усилителями постоянного тока называют такие устройства, которые могут усиливать медленно изменяющиеся электрические сигналы, то есть они способны усиливать и переменные и постоянные составляющие входного сигнала.

Основную проблему усилителей постоянного тока представляет *дрейф нуля* – отклонение напряжения на выходе усилителя от начального (нулевого) значения при отсутствии входного сигнала.

Одним из возможных путей уменьшения дрейфа нуля является использование *дифференциальных усилителей*.

Дифференциальные усилители

Принцип работы дифференциального усилителя поясним на примере четырехплечевого моста выполненного на резисторах $R1$, $R2$, $R3$, $R4$. В одну диагональ включен источник U , а в другую – сопротивление нагрузки R_H . Если выполняется условие

$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R4}$$

то мост сбалансирован, и ток через R_H будет равен нулю. Баланс не нарушится, если будут меняться напряжение U и сопротивления резисторов плеч моста, но при условии, что соотношение сохранится.

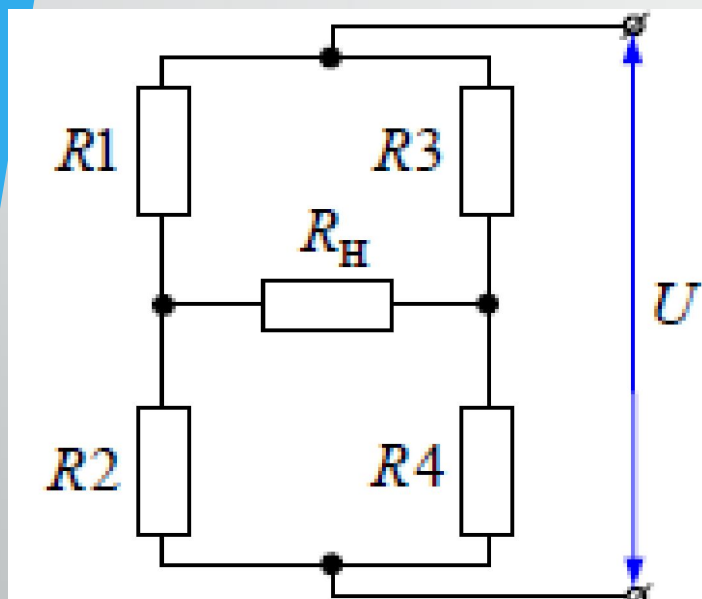
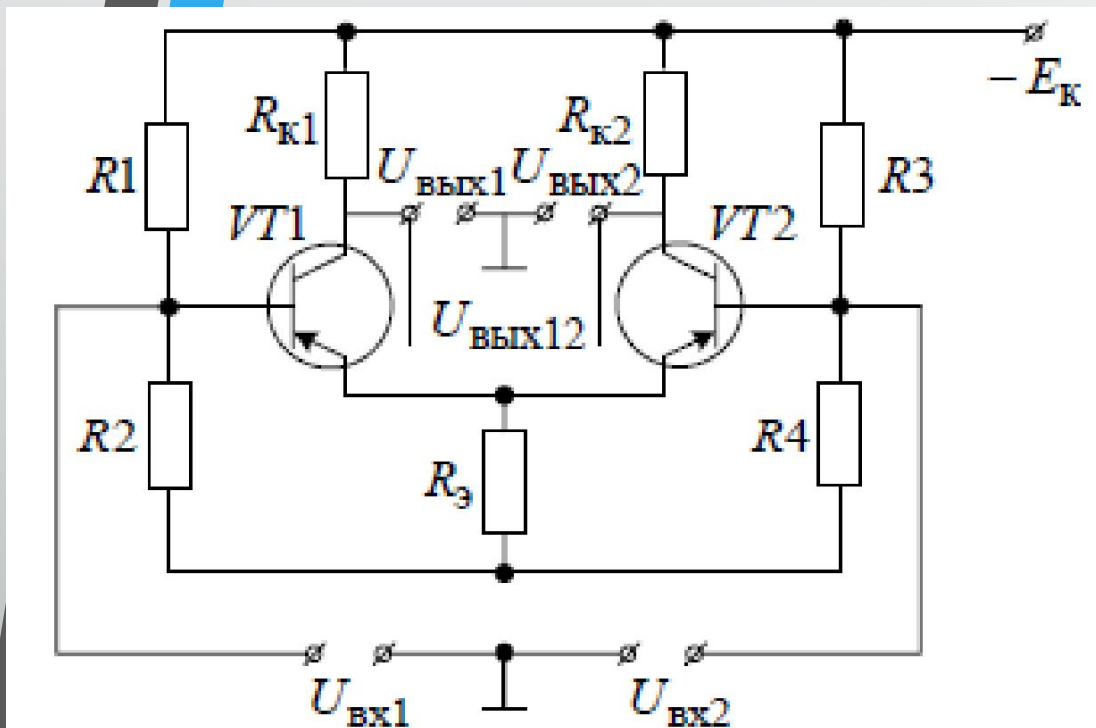


Схема четырехплечевого моста

Простейший дифференциальный усилитель



На рисунке представлена схема простейшего дифференциального усилителя. Очевидно, что она аналогична схеме моста на рисунке если $R2$ и $R4$ заменить транзисторами $VT1$ и $VT2$ и считать, что $R1 = R_{к1}$, $R3 = R_{к2}$

Сопротивления $R_{к1}$ и $R_{к2}$ выбирают равными, а транзисторы $VT1$ и $VT2$ – идентичными. Тогда при отсутствии входного сигнала $U_{вых12}$ также равно нулю. Температурное воздействие будет одинаковое на оба идентичных транзистора, поэтому, хотя их параметры и изменятся, но одинаково и в одну сторону, что не отразится на выходном сигнале, так как разность $U_{вых1}$ и $U_{вых2}$ останется неизменной.

Если на входы подать одинаковые по величине, но сдвинутые по фазе на $\square 180$ сигналы, называемые *дифференциальными*, то возрастание тока в одном плече будет сопровождаться уменьшением тока в противоположном.

Выводы:

1. Дифференциальные усилители предназначены для усиления сколь-угодно медленно изменяющихся во времени сигналов, частотный диапазон которых начинается от 0 Гц.

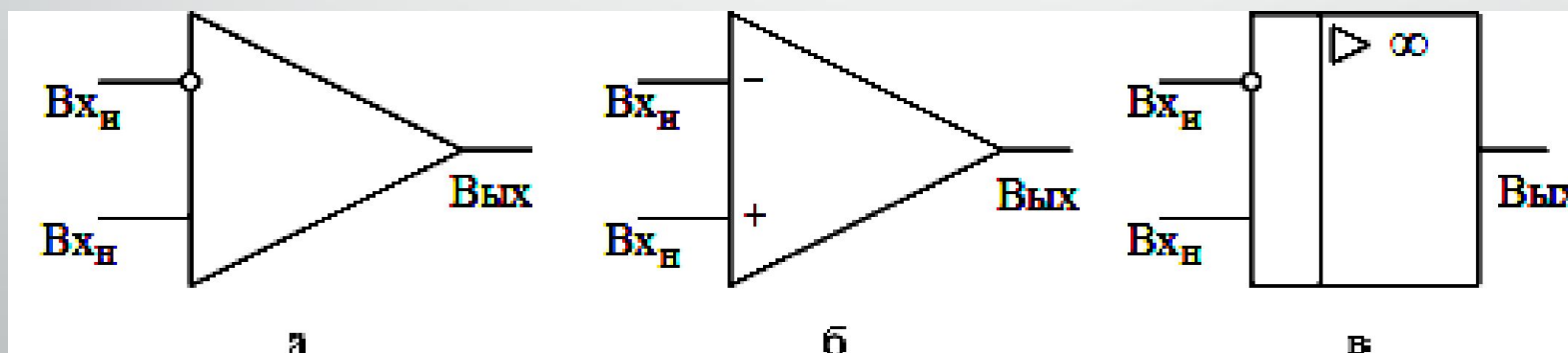
2. Дифференциальный усилитель: имеет следующие достоинства: малый дрейф нуля; высокая степень подавления синфазных помех.

3. Недостатки дифференциального усилителя: требует двухполярного источника питания; необходима очень высокая симметрия схемы.

Операционный усилитель

Операционным усилителем называют усилитель постоянного тока, предназначенный для выполнения различного рода операций над аналоговыми сигналами при работе в схемах с отрицательной обратной связью.

Операционные усилители обладают большим и стабильным коэффициентом усиления напряжения, имеют дифференциальный вход с высоким входным сопротивлением и несимметричный выход с низким выходным сопротивлением, малым дрейфом нуля. То есть под операционным усилителем понимают высококачественный универсальный усилитель.



Условные обозначения операционных усилителей

Основными параметрами операционного усилителя являются:

1. *Коэффициент усиления напряжения без обратной связи K_u* , показывающий, во сколько раз напряжение на выходе превышает напряжение сигнала, поданного на дифференциальный вход.

2. *Коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{осл\ сф}$* , показывающий, во сколько раз дифференциальный сигнал сильнее синфазного. Данный параметр определяется свойствами входного дифференциального каскада и составляет 80-100 дБ

3. *Температурный дрейф напряжения смещения*

E_1 — ЭДС источника входного сигнала

E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

$$TKU_{см} = \frac{U_{см}}{\Delta T}$$

Основными параметрами операционного усилителя являются:

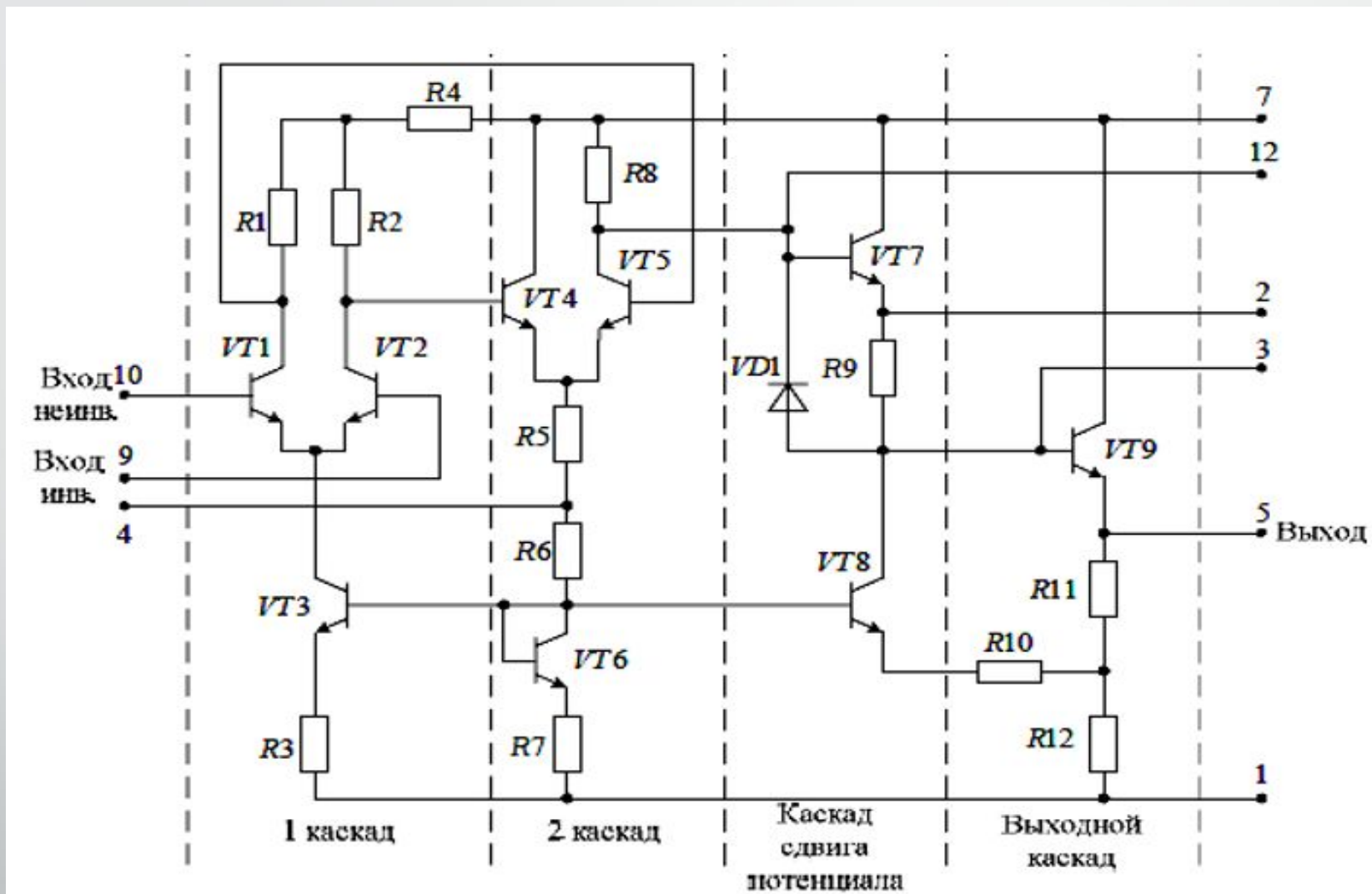
5. Входное сопротивление для дифференциального $R_{вх\ диф}$ сигнала -

Измеряется со стороны любого входа в то время, когда другой вход соединен с общим выводом. Величина $R_{вх\ диф}$ лежит в пределах *сотен кОм – единиц МОм*.

6. Входное сопротивление для синфазного $R_{вх\ сф}$ сигнала. Измеряется между соединенными вместе входами операционного усилителя и корпусом. Данное сопротивление на несколько порядков больше, чем сопротивление для дифференциального сигнала.

7. Выходное сопротивление $R_{вых}$. Величина выходного сопротивления для операционного усилителя составляет *десятки – сотни Ом*.

Схемотехника операционных усилителей

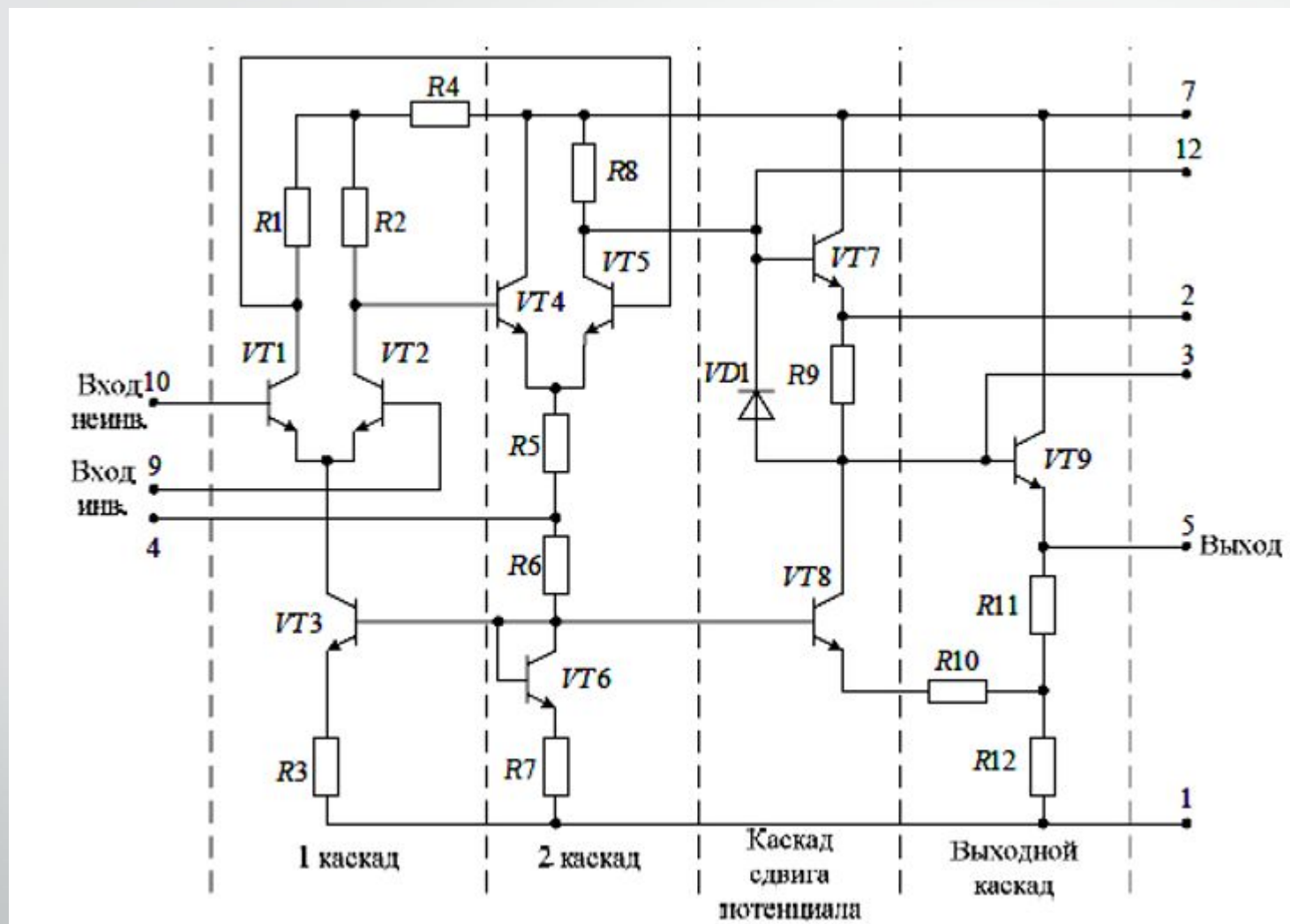


Электрическая принципиальная схема операционного усилителя К140УД1

E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

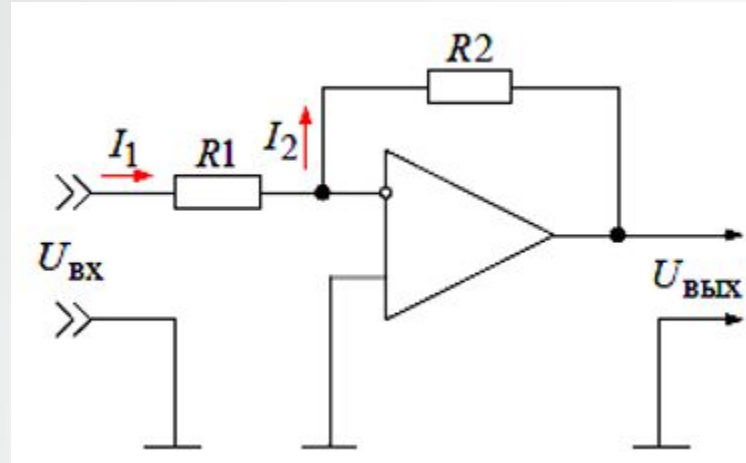
E_1 — ЭДС источника входного сигнала
 E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

Основные схемы на операционных усилителях



Электрическая принципиальная схема операционного усилителя К140УД1

Схема инвертирующего усилителя на идеальном операционном усилителе, который осуществляет усиление аналоговых сигналов с поворотом фазы на 180° .



Инвертирующий усилительный каскад на идеальном операционном усилителе

Во входной цепи протекает переменный ток, действующее значение которого равно

$$I_1 = -I_2 = \frac{U_{\text{вх}}}{R1} = -\frac{U_{\text{вых}}}{R2}$$

идеальный операционный усилитель имеет бесконечно большое входное сопротивление.

E_1 — ЭДС источника входного сигнала

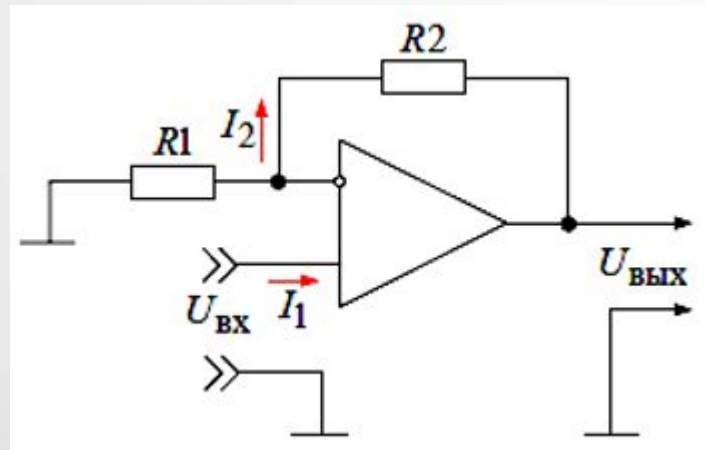
E_2 — ЭДС источника питания (символического источника).

Следовательно, коэффициент усиления схемы

$$K_u = -\frac{R2}{R1}.$$

- E_1 — ЭДС источника входного сигнала
• E_2 — ЭДС источника питания (мощного источника).

Неинвертирующий усилитель. В этой схеме входной сигнал подается на неинвертирующий вход, а напряжение обратной связи — на инвертирующий.



Неинвертирующий усилительный каскад на операционном усилителе

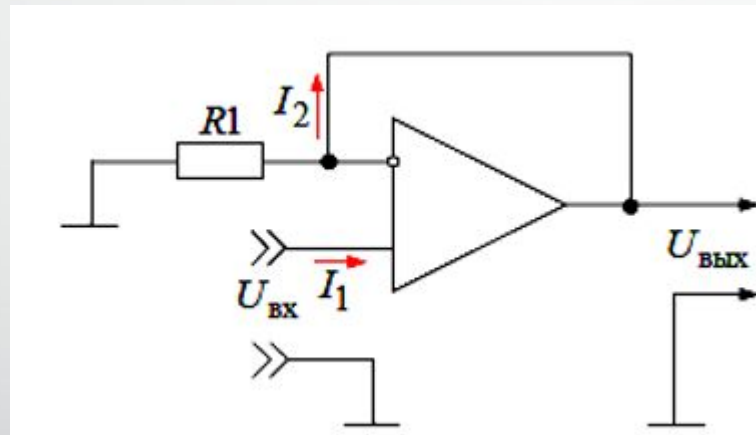
Величина напряжения обратной связи:

$$U_{оос} = U_{в.вых} \cdot \frac{R1}{R1 + R2}.$$

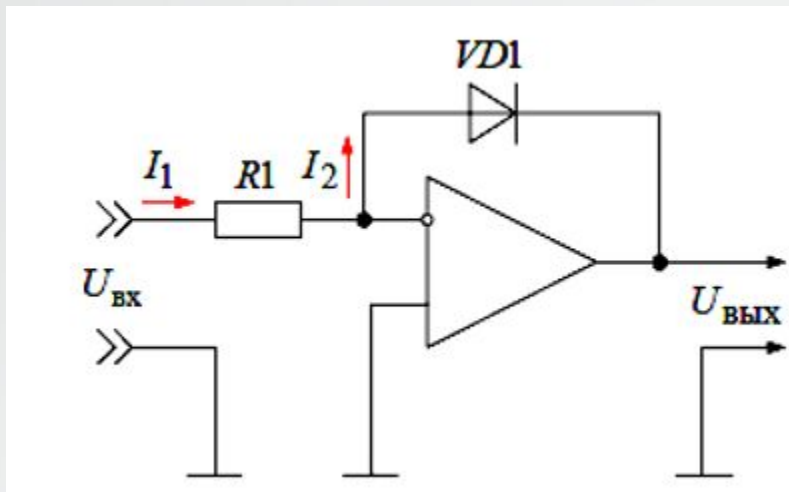
E_1 – ЭДС источника входного сигнала
• E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

$$K_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

E_1 – ЭДС источника входного сигнала
 E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).



Повторитель напряжения на операционном усилителе



Логарифмирующий каскад

Логарифмирующий усилитель получается в том случае, когда вместо резистора R2 в цепь обратной связи включают полупроводниковый диод

При этом постоянный ток во входной цепи равен:

$$I_1 = \frac{U_{\text{вх}}}{R1}.$$

Постоянный ток через диод равен:

$$I_2 = I_o \cdot e^{\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{сх}}}}.$$

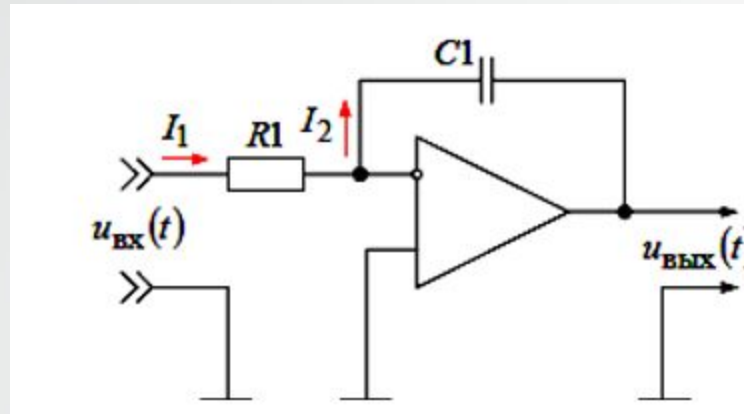
E_1 – ЭДС источника входного сигнала
 E_2 – ЭДС источника питания (мощного источника).

$$I_2 = I_o \cdot e^{\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{сх}}}}.$$

отсюда выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = -U_{\text{сх}} \cdot \ln \left(\frac{U_{\text{вх}}}{R1 \cdot I_o} \right).$$

Из выражения следует, что выходное напряжение пропорционально логарифму входного постоянного напряжения.



Инвертирующий интегратор

Интегрирующий усилитель получается в том случае, когда вместо резистора R2 в цепь обратной связи включен конденсатор C1

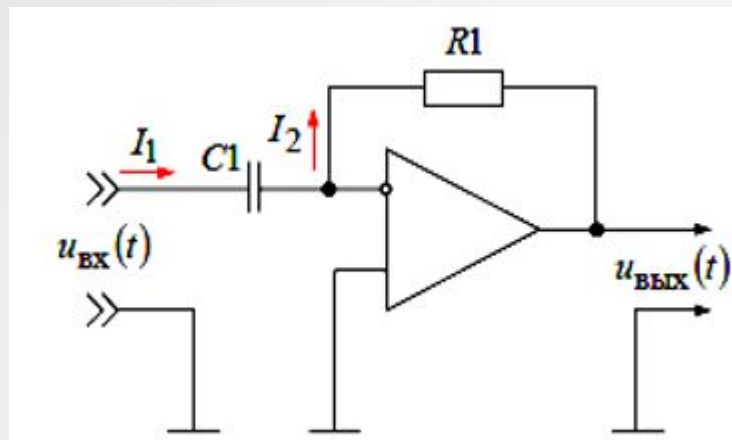
$$I_1 = \frac{u_{BX}(t)}{R1}, I_2 = -C1 \cdot \frac{du_{ВЫХ}(t)}{dt}.$$

$$I_1 = I_2, \text{ то } \frac{u_{BX}(t)}{R1} = -C1 \cdot \frac{du_{ВЫХ}(t)}{dt}.$$



$$u_{ВЫХ}(t) = -\frac{1}{R1 \cdot C1} \cdot \int u_{BX}(t) dt.$$

Дифференцирующий усилитель получается в том случае, когда резистор R1 и конденсатор C1 поменять местами



Инвертирующий дифференциатор

При этом

$$I_1 = C1 \cdot \frac{du_{BX}(t)}{dt}, I_2 = -\frac{u_{ВЫХ}(t)}{R1}, \quad \rightarrow \quad I_1 = I_2, \text{ то } C1 \cdot \frac{du_{BX}(t)}{dt} = -\frac{u_{ВЫХ}(t)}{R1}.$$

$$u_{ВЫХ}(t) = -R1 \cdot C1 \cdot \frac{du_{BX}(t)}{dt}.$$

Выводы

Операционные усилители в настоящее время находят широкое применение при разработке различных аналоговых и импульсных электронных устройств. Это связано с тем, что введя цепи операционного усилителя различные линейные и нелинейные устройства, можно получить узлы с требуемым алгоритмом преобразования входного сигнала.

Поскольку все операции, выполняемые при помощи операционных усилителей, могут иметь нормированную погрешность, то к его характеристикам предъявляются определённые требования. Эти требования в основном сводятся к тому, чтобы операционный усилитель как можно ближе соответствовал идеальному источнику напряжения, управляемому напряжением с бесконечно большим коэффициентом усиления. Это означает, что входное сопротивление $v_x R$ должно быть равно бесконечности (следовательно, входной ток равен нулю); выходное сопротивление $v_{yx} R$ должно быть равно нулю, следовательно, нагрузка не должна влиять на выходное напряжение; частотный диапазон от постоянного напряжения до очень высокой частоты.

В настоящее время операционные усилители играют роль многофункциональных узлов при реализации разнообразных устройств электроники различного назначения.