

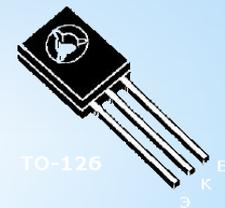
БИПОЛЯРНЫЕ

ТРАНЗИСТОРЫ

Определение «**биполярный**» указывает на то, что работа транзистора связана с процессами, в которых принимают участие носители заряда двух сортов (электроны и дырки). Слово «**транзистор**» произошло от английского словосочетания «**transfer resistor**» - преобразователь сопротивления.



В настоящее время биполярный транзистор является одним из наиболее **важных** полупроводниковых **приборов**. Он используется в радиоэлектронике в качестве **дискретного активного элемента**, а в планарном исполнении является основой для создания **интегральных твердотельных схем**. В свою очередь, твердотельные схемы являются главными элементами современного поколения ЭВМ и других сложных радиоэлектронных устройств.



ТРАНЗИСТОРЫ

Классификация и маркировка транзисторов

Транзистором называется полупроводниковый преобразовательный прибор, имеющий не менее трёх выводов и способный усиливать мощность.

Классификация транзисторов производится по следующим признакам:



По материалу полупроводника (германиевые, кремниевые, и т.д.)



По типу проводимости областей (для биполярных транзисторов - с прямой проводимостью - р-п-р-структура, с обратной проводимостью - п-р-п-структура)



По принципу действия (биполярные, полевые)



По частотным свойствам (низкочастотные НЧ, средне-частотные СрЧ, высокочастотные ВЧ, СВЧ)



По мощности (маломощные ММ, средней мощности СрМ, мощные М)

Маркировка

Г	Т	-	313	А
К	П	-	103	Л
I	II	-	III	IV



I - материал полупроводника:
Г - германий,
К - кремний)



II - тип транзистора по принципу действия:
Т - биполярные,
П - полевые



III - три или четыре цифры: группа транзисторов по электрическим параметрам. Первая цифра показывает частотные свойства и мощность транзистора в соответствии с таблицей 1



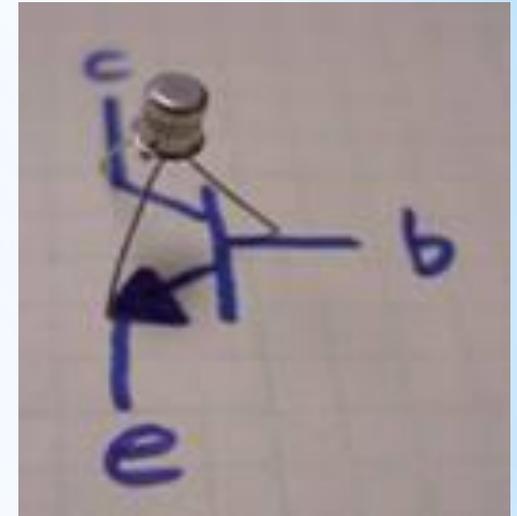
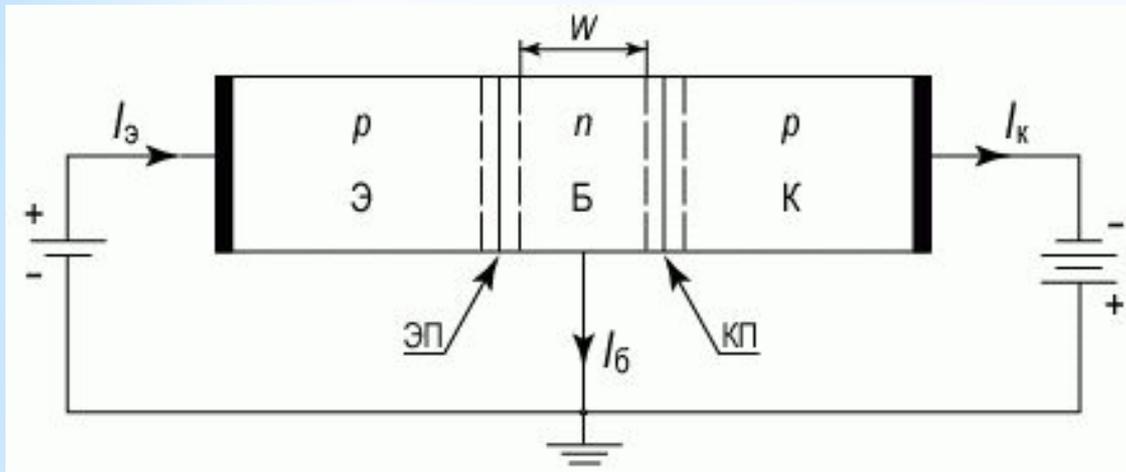
IV - модификация транзистора в группе III

Таблица 1

Р \ f	<3 МГц НЧ	3 – 30 МГц СрЧ	>30 МГц ВЧ и СВЧ
ММ <0,3 Вт	1	2	3
СрМ 0,3÷3 Вт	4	5	6
М >3 Вт	7	8	9

* Общие сведения

Биполярный транзистор состоит из трех областей монокристаллического полупроводника с разным типом проводимости: эмиттера, базы и коллектора



Схематическое изображение транзистора типа р-п-р:
Э - эмиттер, Б - база, К - коллектор, W - толщина базы, ЭП - эмиттерный переход, КП - коллекторный переход

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Устройство биполярных транзисторов

Основой биполярного транзистора является кристалл полупроводника р-типа или n-типа проводимости, который также как и вывод от него называется базой.

Диффузией примеси или сплавлением с двух сторон от базы образуются области с противоположным типом проводимости, нежели база (рис. 60).

Область, имеющая большую площадь р-п перехода, и вывод от неё называют коллектором.

Область, имеющая меньшую площадь р-п перехода, и вывод от неё называют эмиттером.

р-п переход между коллектором и базой называют коллекторным переходом, а между эмиттером и базой - эмиттерным переходом.

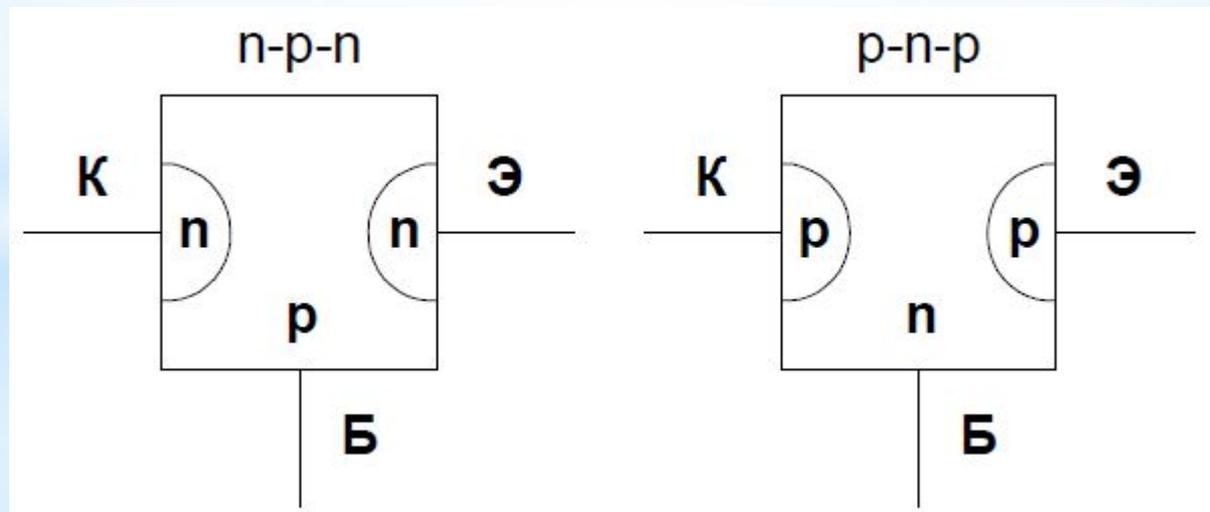


Рис. 60

Условные обозначения биполярных транзисторов на схемах приведены на рисунке 61. Направление стрелки в транзисторе показывает направление протекающего тока.

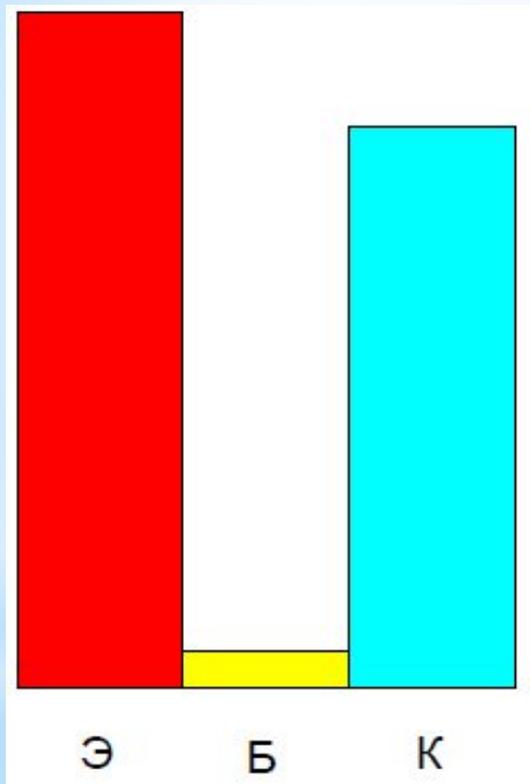


Рис. 62

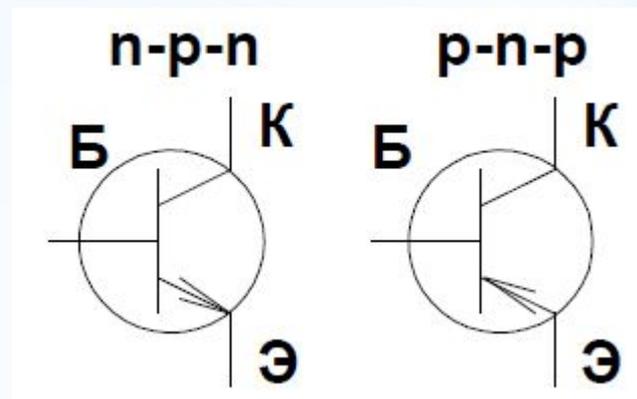


Рис. 61

Основной особенностью устройства биполярных транзисторов является неравномерность концентрации основных носителей зарядов в эмиттере, базе и коллекторе. В эмиттере концентрация носителей заряда максимальная. В коллекторе - несколько меньше, чем в эмиттере. В базе - во много раз меньше, чем в эмиттере и коллекторе (рис. 62).

Каждый из переходов транзистора можно включить либо в **прямом**, либо в **обратном** направлении. В зависимости от этого различают **три режима** работы транзистора:

1. Режим **отсечки** - оба р-п перехода закрыты, при этом через транзистор обычно идёт сравнительно небольшой ток;
2. Режим **насыщения** - оба р-п перехода открыты;
3. **Активный** режим - один из р-п переходов открыт, а другой закрыт.

Основные физические процессы в БТ

В рабочем режиме в БТ протекают следующие процессы:

- инжекция из эмиттера в базу;
- диффузия через базу;
- рекомбинация в базе;
- экстракция из базы в коллектор;

Принцип действия биполярных транзисторов

При работе транзистора в усилительном режиме эмиттерный переход открыт, а коллекторный - закрыт. Это достигается соответствующим включением источников питания (рис. 63).

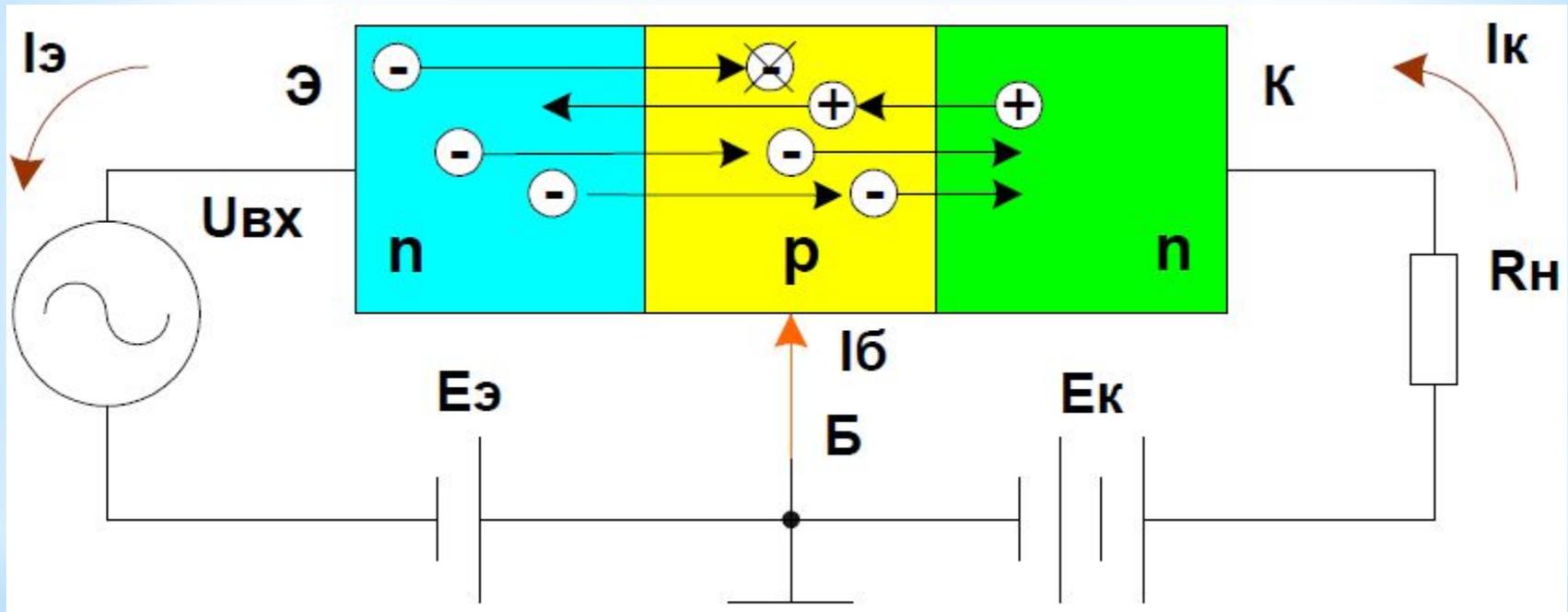
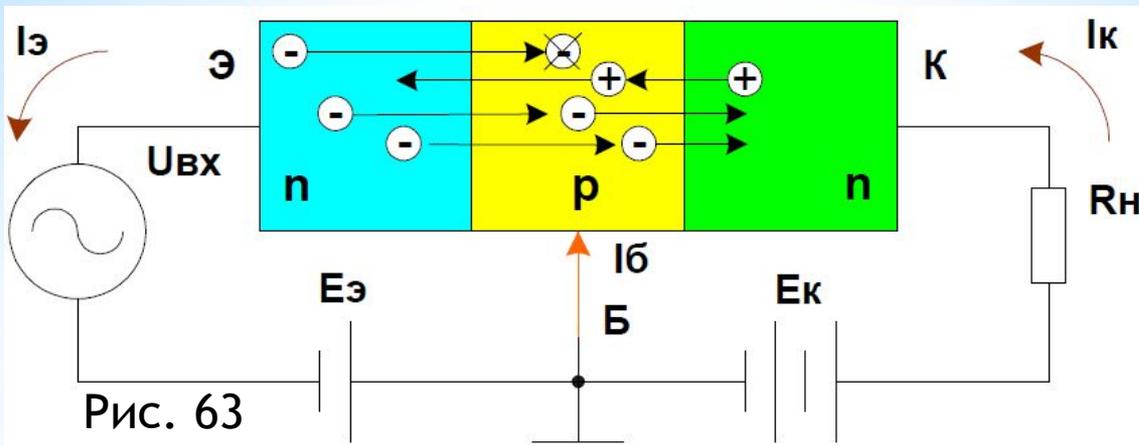


Рис. 63

Так как эмиттерный переход открыт, то через него будет протекать ток эмиттера, вызванный переходом электронов из эмиттера в базу и переходом дырок из базы в эмиттер. Следовательно, ток эмиттера будет иметь две составляющие - электронную и дырочную.



Эффективность эмиттера оценивается коэффициентом инжекции:

$$\gamma = \frac{I_{э.n}}{I_{э}} \quad (0,999)$$

$$I_{э} = I_{э.n} + I_{э.p}$$

Инжекцией зарядов называется переход носителей зарядов из области, где они были основными в область, где они становятся неосновными.

В базе электроны рекомбинируют, а их концентрация в базе пополняется от «+» источника $E_{э}$, за счёт чего в цепи базы будет протекать очень малый ток.

Оставшиеся электроны, не успевшие рекомбинировать в базе, под ускоряющим действием поля закрытого коллекторного перехода как неосновные носители будут переходить в коллектор, образуя ток коллектора.

Переход носителей зарядов из области, где они были неосновными, в область, где они становятся основными, называется экстракцией зарядов.

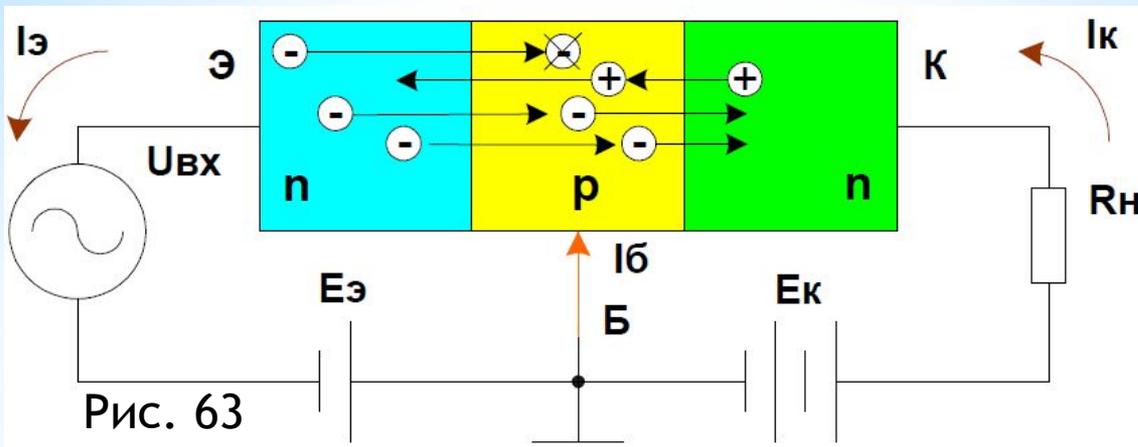


Рис. 63

Степень рекомбинации носителей зарядов в базе оценивается

коэффициентом перехода носителей зарядов δ :

$$\delta = \frac{I_{к.п.}}{I_{э.п.}}$$

Основное соотношение токов в транзисторе:

$$I_{э} = I_{к} + I_{б}$$

$$\delta \cdot \gamma = \frac{I_{э.п.} \cdot I_{к.п.}}{I_{э} \cdot I_{э.п.}} = \frac{I_{к.п.}}{I_{э}} = \alpha$$

α - коэффициент передачи тока транзистора или коэффициент усиления по току:

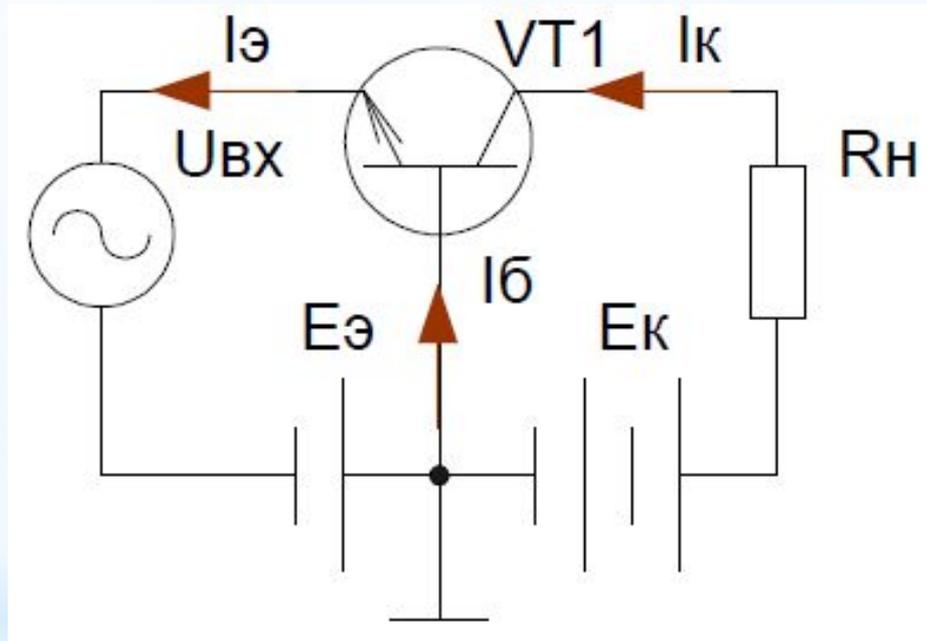
$$I_{к} = \alpha \cdot I_{э}$$

Дырки из коллектора как неосновные носители зарядов будут переходить в базу, образуя обратный ток коллектора $I_{кбо}$:

$$I_{к} = \alpha \cdot I_{э} + I_{кбо}$$

Из трёх выводов транзистора на один подаётся входной сигнал, со второго - снимается выходной сигнал, а третий вывод является общим для входной и выходной цепи.

Таким образом, рассмотренная схема (рис. 63, 64) получила название схемы с общей базой.



$$I_{вх} = I_{э}$$
$$I_{вых} = I_{к}$$

$$U_{вх} = U_{бэ}$$
$$U_{вых} = U_{бк}$$

Рис. 64

Напряжение в транзисторных схемах обозначается двумя индексами в зависимости от того, между какими выводами транзистора эти напряжения измеряются.

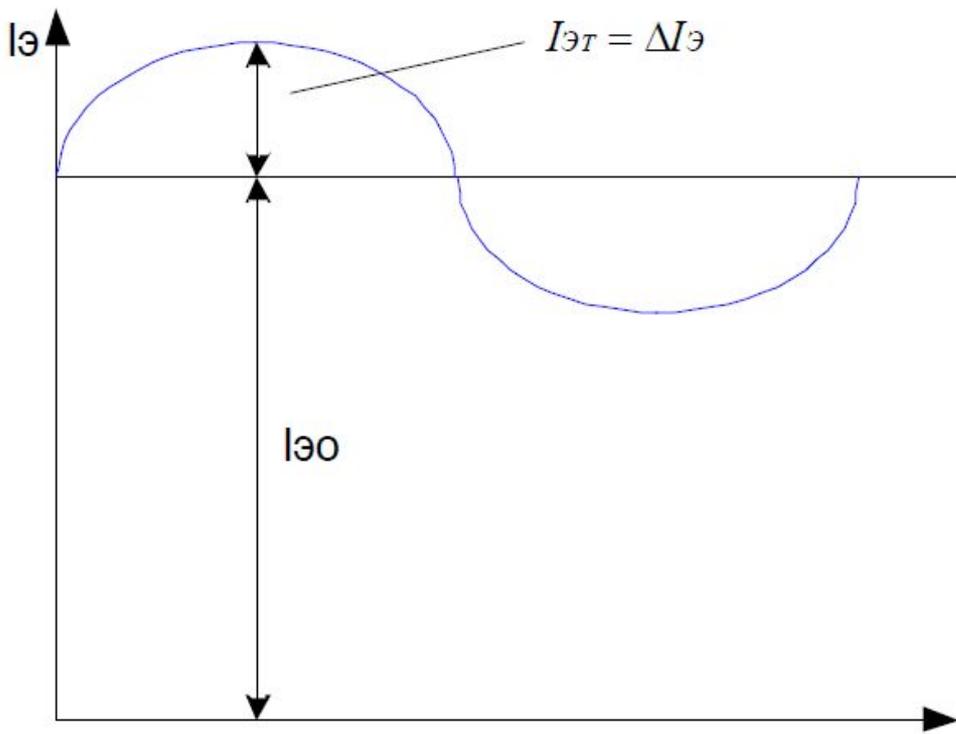


Рис. 65

Так как все токи и напряжения в транзисторе, помимо постоянной составляющей имеют ещё и переменную составляющую, то её можно представить как приращение постоянной составляющей и при определении любых параметров схемы пользоваться либо переменной составляющей токов и напряжений, либо приращением постоянной составляющей.

$$\alpha = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}},$$

$$\alpha = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}}},$$

где $I_{\text{к}}$, $I_{\text{э}}$ - переменные составляющие коллекторного и эмиттерного тока, $\Delta I_{\text{к}}$, $\Delta I_{\text{э}}$ - постоянные составляющие.

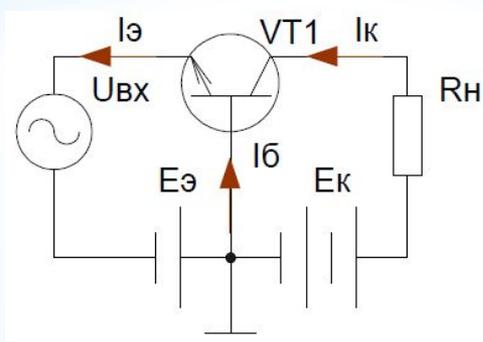


Рис. 64

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Схема включения с общей базой

Любая схема включения транзистора характеризуется двумя основными показателями:

- коэффициент усиления по току $I_{вых}/I_{вх}$ (для схемы с общей базой $I_{вых}/I_{вх} = I_k/I_{э} = \alpha$ [$\alpha < 1$])

- входное сопротивление $R_{вхб} = U_{вх}/I_{вх} = U_{бэ}/I_{э}$.

Входное сопротивление для схемы с общей базой (рис. 64) мало и составляет десятки Ом, так как входная цепь транзистора при этом представляет собой открытый эмиттерный переход транзистора.

Недостатки схемы с общей базой:

- Схема не усиливает ток $\alpha < 1$
- Малое входное сопротивление
- Два разных источника напряжения для питания.

Достоинства:

- хорошие температурные и частотные свойства

Схема включения с общим эмиттером

Эта схема, изображенная на рисунке 66, является наиболее распространённой, так как она даёт наибольшее усиление по мощности.

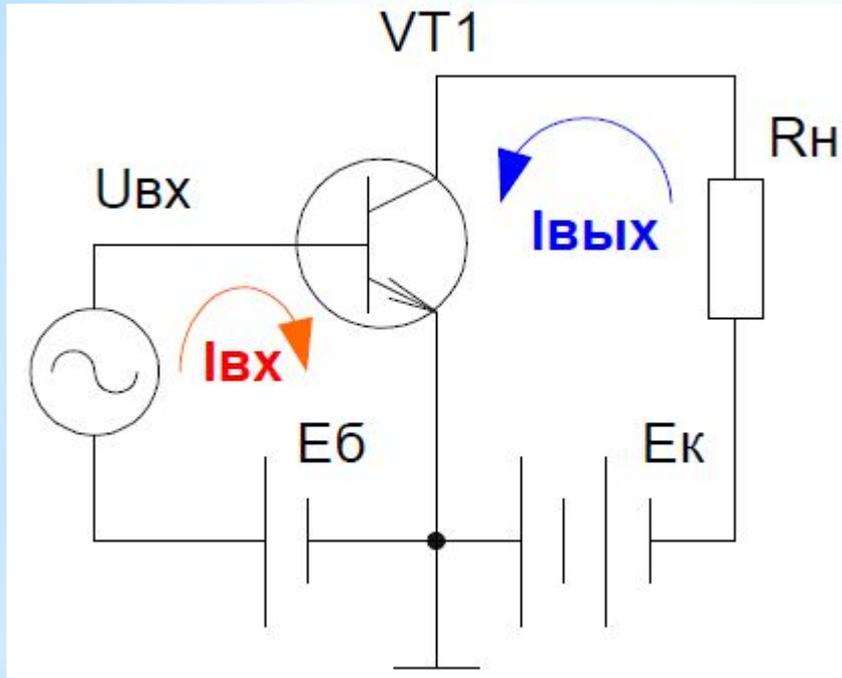


Рис. 66

$$\begin{aligned} I_{вх} &= I_{б} \\ I_{вых} &= I_{к} \\ U_{вх} &= U_{бэ} \\ U_{вых} &= U_{кэ} \end{aligned}$$

$$\beta = I_{вых} / I_{вх} = I_{к} / I_{б} \text{ (n: 10..100)}$$

$$\begin{aligned} R_{вх.э} &= U_{вх} / I_{вх} = \\ &= U_{бэ} / I_{б} \text{ [Ом] (n: 100..1000)} \end{aligned}$$

Коэффициент усиления по току такого каскада представляет собой отношение амплитуд (или действующих значений) выходного и входного переменного тока, то есть переменных составляющих токов коллектора и базы.

Поскольку ток коллектора в десятки раз больше тока базы, то коэффициент усиления по току составляет сотни раз.

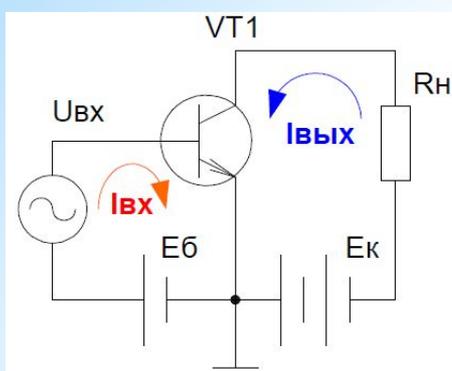


Рис. 66

$$I_{вх} = I_{б} \quad I_{вых} = I_{к}$$

$$U_{вх} = U_{бэ} \quad U_{вых} = U_{кэ}$$

$$\beta = I_{вых} / I_{вх} = I_{к} / I_{б} \quad (n: 10..100)$$

$$R_{вх.э} = U_{вх} / I_{вх} = U_{бэ} / I_{б} \quad [Ом] \quad (n: 100..1000)$$

Коэффициент усиления каскада по напряжению равен отношению амплитудных или действующих значений выходного и входного переменного напряжения.

Входным является переменное напряжение база - эмиттер $U_{бэ}$, а выходным - переменное напряжение на резисторе нагрузки R_n или, что то же самое, между коллектором и эмиттером - $U_{кэ}$.

Напряжение база - эмиттер не превышает десятых долей вольта, а выходное напряжение при достаточном сопротивлении резистора нагрузки и напряжении источника E_k достигает единиц, а в некоторых случаях и десятков вольт.

Поэтому коэффициент усиления каскада по напряжению имеет значение от десятков до сотен.

Отсюда следует, что коэффициент усиления каскада по мощности получается равным сотням, или тысячам, или даже десяткам тысяч. Этот коэффициент представляет собой отношение выходной мощности к входной. Каждая из этих мощностей определяется половиной произведения амплитуд соответствующих токов и напряжений.

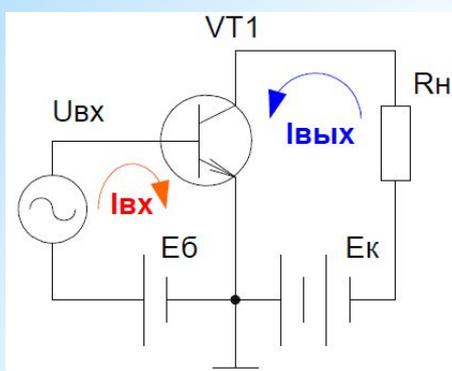


Рис. 66

$$I_{ВХ} = I_{Б} \quad I_{ВЫХ} = I_{К}$$

$$U_{ВХ} = U_{БЭ} \quad U_{ВЫХ} = U_{КЭ}$$

$$\beta = I_{ВЫХ} / I_{ВХ} = I_{К} / I_{Б} \quad (n: 10..100)$$

$$R_{ВХ.Э} = U_{ВХ} / I_{ВХ} = U_{БЭ} / I_{Б} \quad [Ом] \quad (n: 100..1000)$$

Входное сопротивление схемы с общим эмиттером мало (от 100 до 1000 Ом).

Каскад по схеме ОЭ при усилении переворачивает фазу напряжения, т. е. между выходным и входным напряжением имеется фазовый сдвиг 180° .

Достоинства схемы с общим эмиттером:

- большой коэффициент усиления по току;
- большее, чем у схемы с общей базой, входное сопротивление;
- для питания схемы требуются два однополярных источника, что позволяет на практике обходиться одним источником питания.

Недостатки:

- худшие, чем у схемы с общей базой, температурные и частотные свойства.

Однако за счёт преимуществ схема с ОЭ применяется наиболее часто.

Схема включения с общим коллектором

В схеме с общим коллектором (ОК) коллектор является общей точкой входа и выхода, поскольку источники питания E_b и E_k всегда шунтированы конденсаторами большой ёмкости и для переменного тока могут считаться короткозамкнутыми (рис. 67).

Особенность этой схемы в том, что входное напряжение полностью передается обратно на вход, т. е. очень сильна отрицательная обратная связь.

Нетрудно видеть, что входное напряжение равно сумме переменного напряжения база-эмиттер $U_{бэ}$ и выходного напряжения.

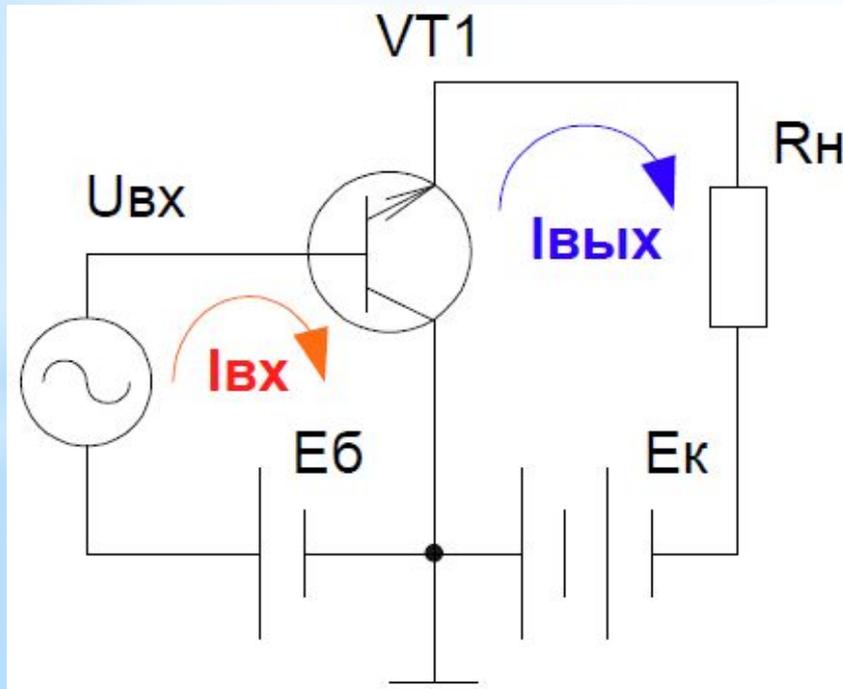


Рис. 67

$$I_{вх} = I_b$$

$$I_{вых} = I_э$$

$$U_{вх} = U_{бк}$$

$$U_{вых} = U_{кэ}$$

$$I_{вых} / I_{вх} = I_э / I_b = (I_k + I_b) / I_b = \beta + 1 = n$$

$$n = 10 \dots 100$$

$$R_{вх} = U_{бк} / I_b = n (10 \dots 100) \text{ кОм}$$

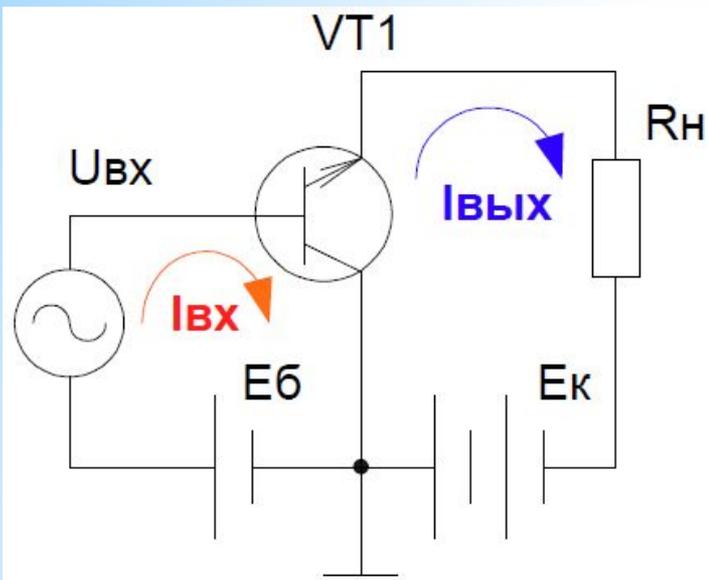


Рис. 67

$$I_{вх} = I_{б}$$

$$I_{вых} = I_{э}$$

$$U_{вх} = U_{бк}$$

$$U_{вых} = U_{кэ}$$

$$I_{вых} / I_{вх} = I_{э} / I_{б} = (I_{к} + I_{б}) / I_{б} = \beta + 1 = n$$

$$n = 10 \dots 100$$

$$R_{вх} = U_{бк} / I_{б} = n (10.100) \text{ кОм}$$

Коэффициент усиления по току каскада с общим коллектором почти такой же, как и в схеме с ОЭ, т. е. равен нескольким десяткам.

Однако, в отличие от каскада с ОЭ, коэффициент усиления по напряжению схемы с ОК близок к единице, причем всегда меньше её.

Переменное напряжение, поданное на вход транзистора, усиливается в десятки раз (так же, как и в схеме ОЭ), но весь каскад не даёт усиления.

Коэффициент усиления по мощности равен примерно нескольким десяткам.

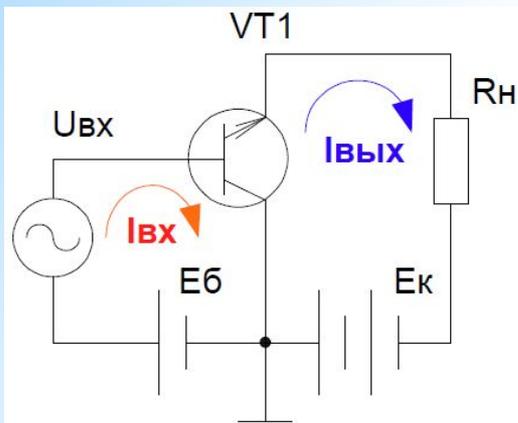


Рис. 67

$$I_{вх} = I_{б}$$

$$I_{вых} = I_{э}$$

$$U_{вх} = U_{бк}$$

$$U_{вых} = U_{кэ}$$

$$I_{вых} / I_{вх} = I_{э} / I_{б} = (I_{к} + I_{б}) / I_{б} = \beta + 1 = n$$

$$n = 10 \dots 100$$

$$R_{вх} = U_{бк} / I_{б} = n (10..100) \text{ кОм}$$

Рассмотрев полярность переменных напряжений в схеме, можно установить, что фазового сдвига между $U_{вых}$ и $U_{вх}$ нет. Значит, выходное напряжение совпадает по фазе с входным и почти равно ему.

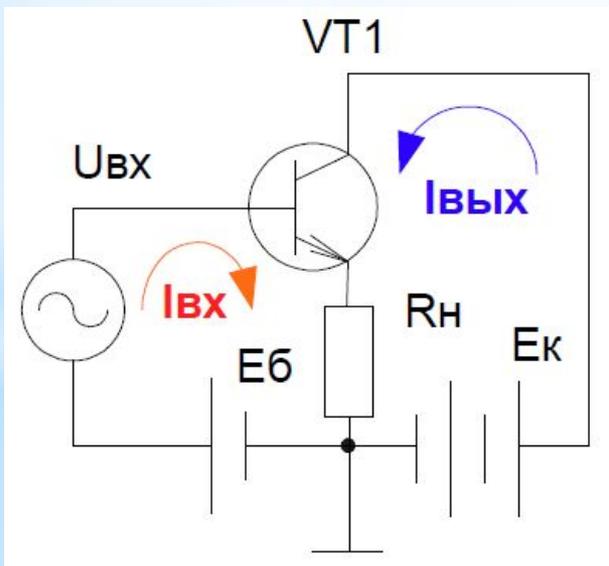


Рис. 68

То есть, выходное напряжение повторяет входное. Именно поэтому данный каскад обычно называют эмиттерным повторителем и изображают схему так, как показано на рис. 68.

Эмиттерным - потому, что резистор нагрузки включен в провод вывода эмиттера и выходное напряжение снимается с эмиттера (относительно корпуса).

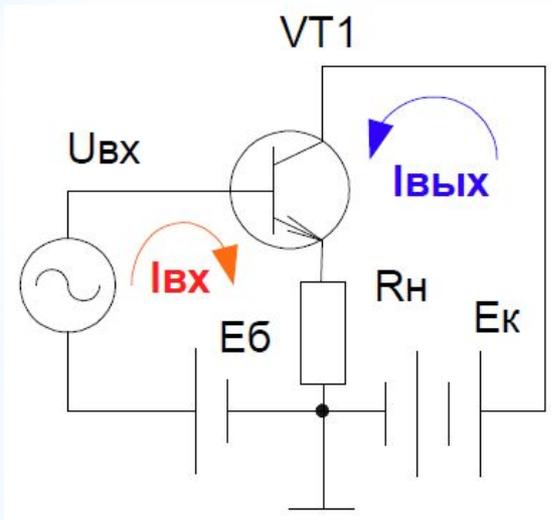


Рис. 68

Так как входная цепь представляет собой закрытый коллекторный переход, входное сопротивление каскада по схеме ОК составляет десятки килоом, что является **важным достоинством** схемы.

Выходное сопротивление схемы с ОК, наоборот, получается сравнительно небольшим, обычно единицы килоом или сотни ом.

Эти достоинства схемы с ОК побуждают использовать её для согласования различных устройств по входному сопротивлению.

Недостатком схемы является то, что она не усиливает напряжение - коэффициент усиления чуть меньше 1.

Усилительные свойства биполярного транзистора

Независимо от схемы включения, транзистор характеризуется тремя коэффициентами усиления:

$$K_I = I_{ВЫХ} / I_{ВХ} - \text{по току};$$

$$K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = (I_{ВЫХ} \cdot R_H) / (I_{ВХ} \cdot R_{ВХ}) = K_I \cdot R_H / R_{ВХ} - \text{по напряжению};$$

$$K_P = P_{ВЫХ} / P_{ВХ} = (U_{ВЫХ} \cdot I_{ВЫХ}) / (U_{ВХ} \cdot I_{ВХ}) = K_I \cdot K_U - \text{по мощности}.$$



**Для схемы с
общей базой:**

$$K_I = I_K / I_Э = \alpha \ (\alpha < 1)$$

$$K_U = \alpha \cdot (R_H / R_{ВХ})$$

$$R_H \approx n \cdot 1 \text{кОм}$$

$$R_{ВХ} \approx n \cdot 10 \ \Omega$$

$$K_U \approx n \cdot 100$$

$$K_P = K_U / K_I = n \cdot 100$$



**Для схемы с
общим
коллектором:**

$$K_I = I_Э / I_Б = \\ = \beta + 1 = n$$

$$K_U = \beta \cdot (R_H / R_{ВХ}) \approx n$$

$$K_U < 1$$



**Для схемы с
общим
эмиттером:**

$$K_I = I_K / I_Б = \\ = \beta = n \ (10.100)$$

$$K_U = \beta \cdot (R_H / R_{ВХ})$$

$$K_P = K_I \cdot K_U = \\ = n \cdot (1000.10000)$$

Работа усилительного каскада с транзистором происходит следующим образом. Представим транзистор переменным резистором r_o , последовательно с которым включено нагрузочное сопротивление R_n и источник питания E . Напряжение источника E делится между сопротивлением нагрузки R_n и внутренним сопротивлением транзистора r_o , которое он оказывает постоянному току коллектора.

Это сопротивление приблизительно равно сопротивлению коллекторного перехода транзистора для постоянного тока. В действительности к этому сопротивлению ещё добавляются небольшие сопротивления эмиттерного перехода, а также n - и p -областей, но эти сопротивления можно не принимать во внимание.

Если во входную цепь включается источник колебаний, то при изменении его напряжения изменяется ток эмиттера, а следовательно, сопротивление коллекторного перехода. Тогда напряжение источника E будет перераспределяться между R_n и r_o .

При этом переменное напряжение на резисторе нагрузки может быть получено в десятки раз большим, чем входное переменное напряжение.

Изменения тока коллектора почти равны изменениям тока эмиттера и во много раз больше изменений тока базы. Поэтому в рассматриваемой схеме получается значительное усиление тока и очень большое усиление мощности.

Усиленная мощность является частью мощности, затрачиваемой источником E .

Статические характеристики транзистора по схеме ОЭ

На рис. 75 изображена схема установки для измерения статических характеристик транзистора, включённого по схеме с ОЭ.

$$I_{BX} = f(U_{BX}) \text{ при } U_{ВЫХ} = \text{Const}$$
$$I_B = f(U_{бэ}) \text{ при } U_{кэ} = \text{Const}$$

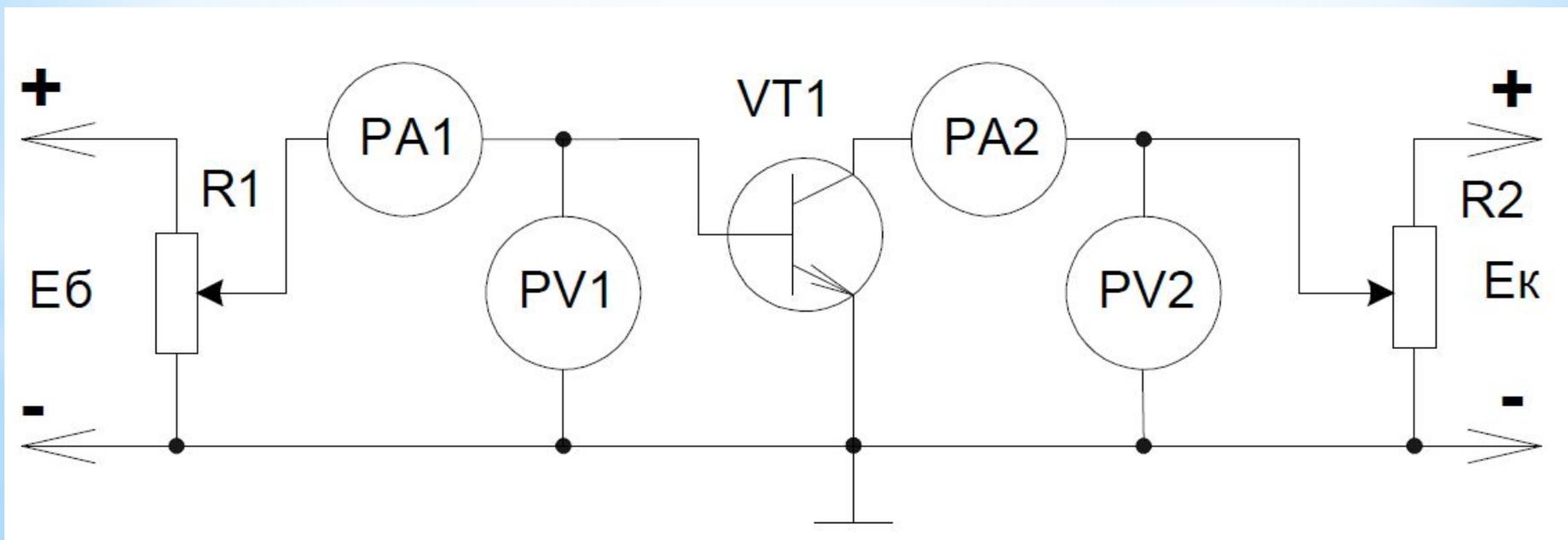


Рис. 75

Входная характеристика

Для схемы включения с общим эмиттером $I_{вых} = f(U_{вых})$ при $I_{вх} = \text{Const}$,
 $I_{к} = f(U_{кэ})$ при $I_{б} = \text{Const}$ дана иллюстрация Рис. 70.

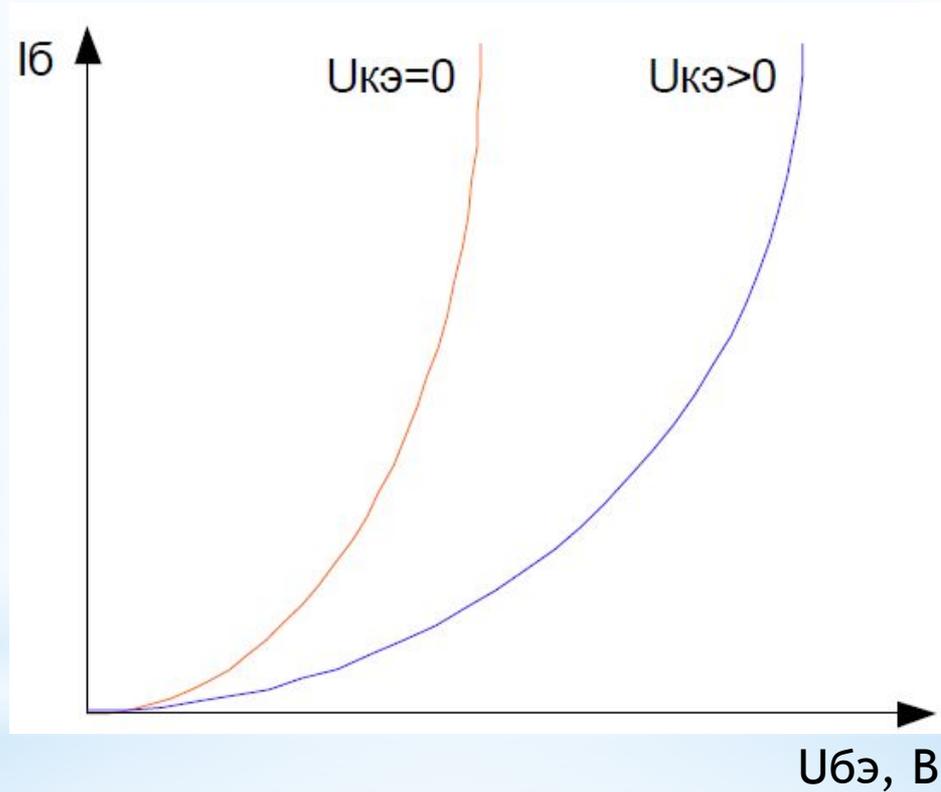


Рис. 70

Выходная характеристика

Эта зависимость выходного тока от выходного напряжения при постоянном входном токе.

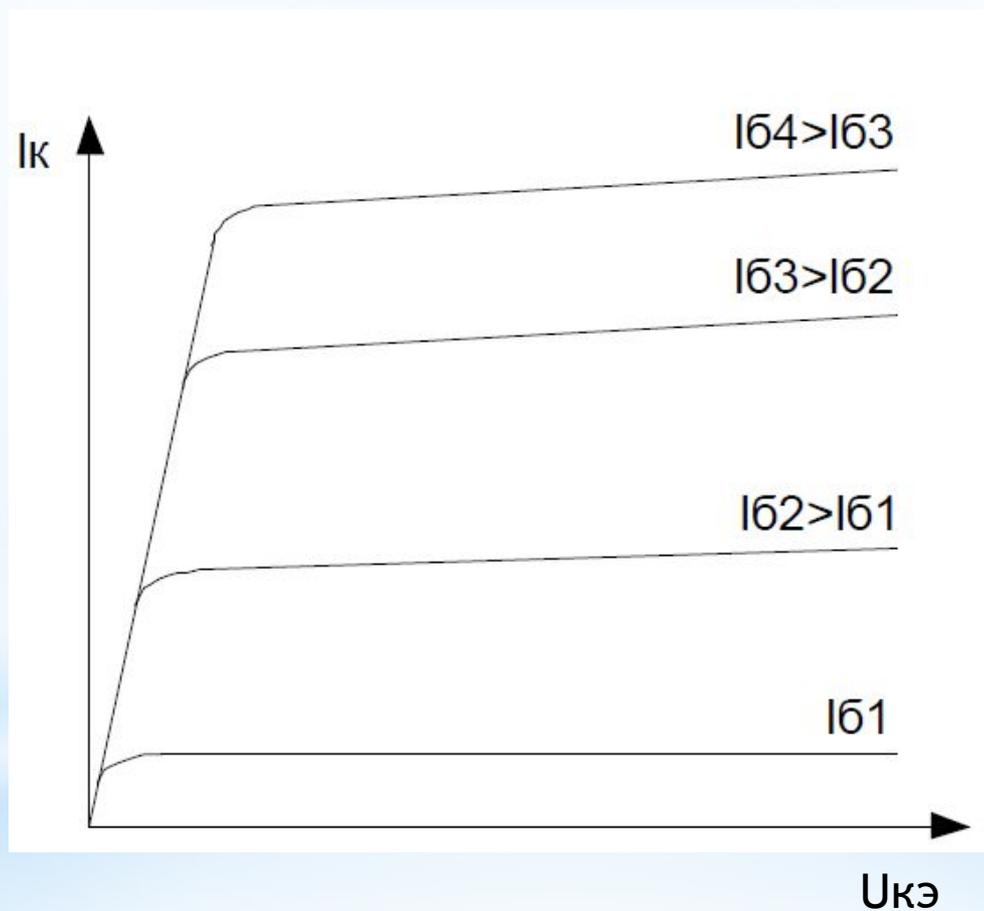


Рис. 71