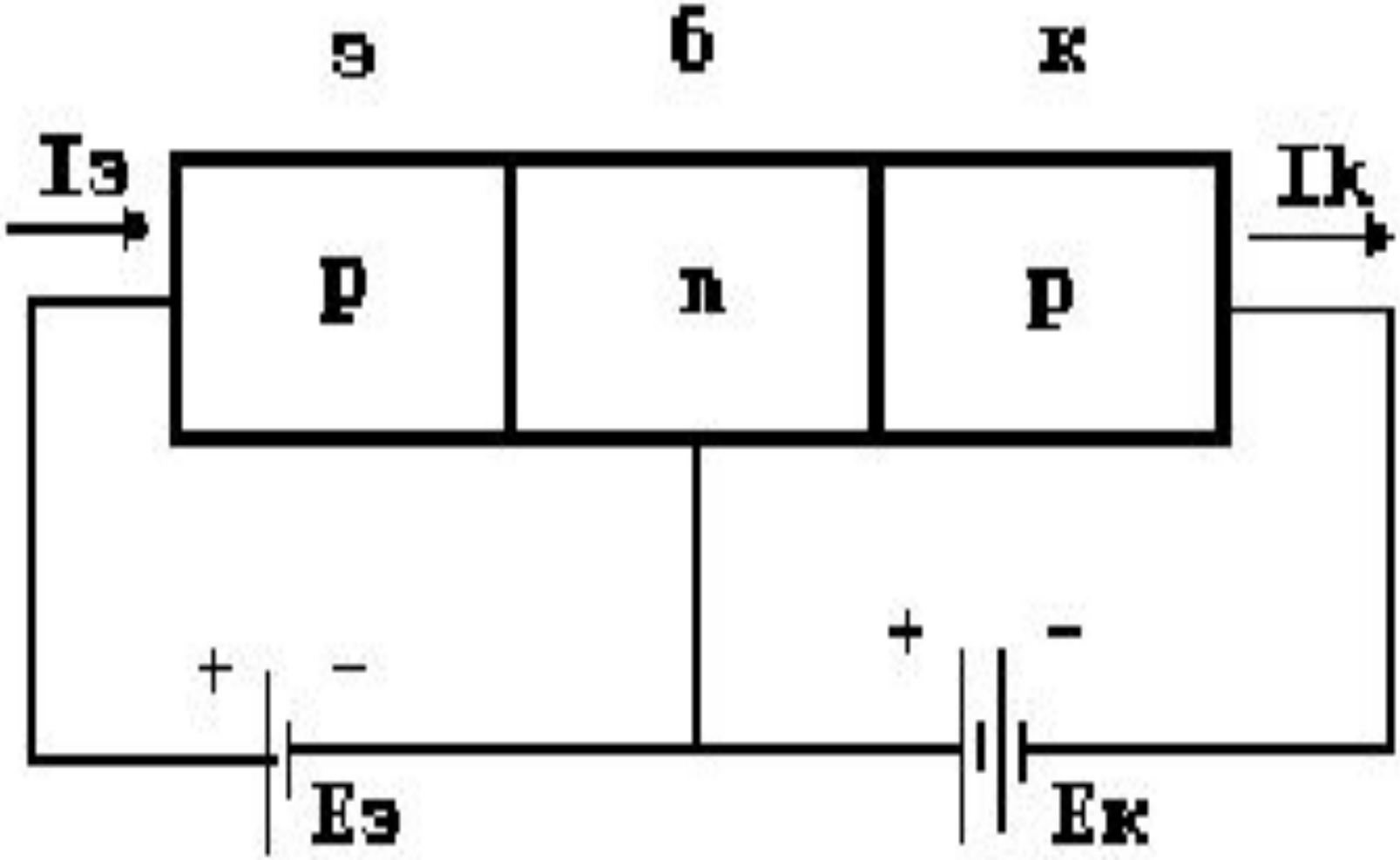
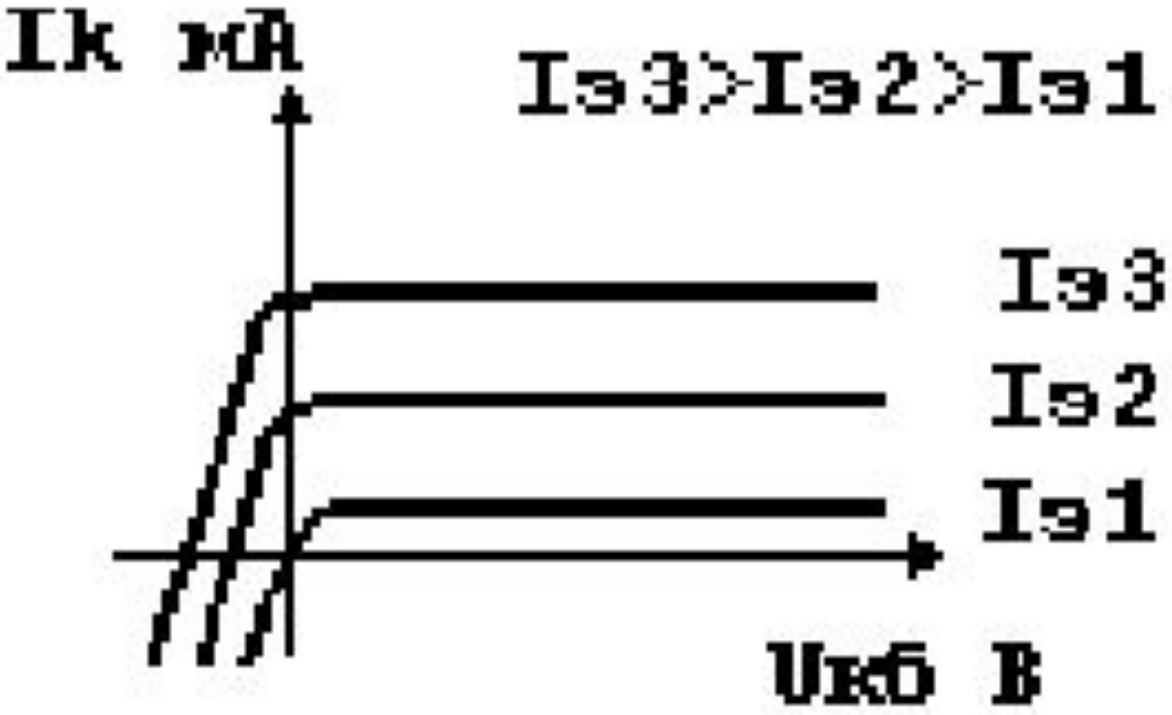
Биполярные транзисторы

Авторы: Люханова Инна, Николаева Екатерина
ФТФ, группа 21301, 2003-2004 уч.год

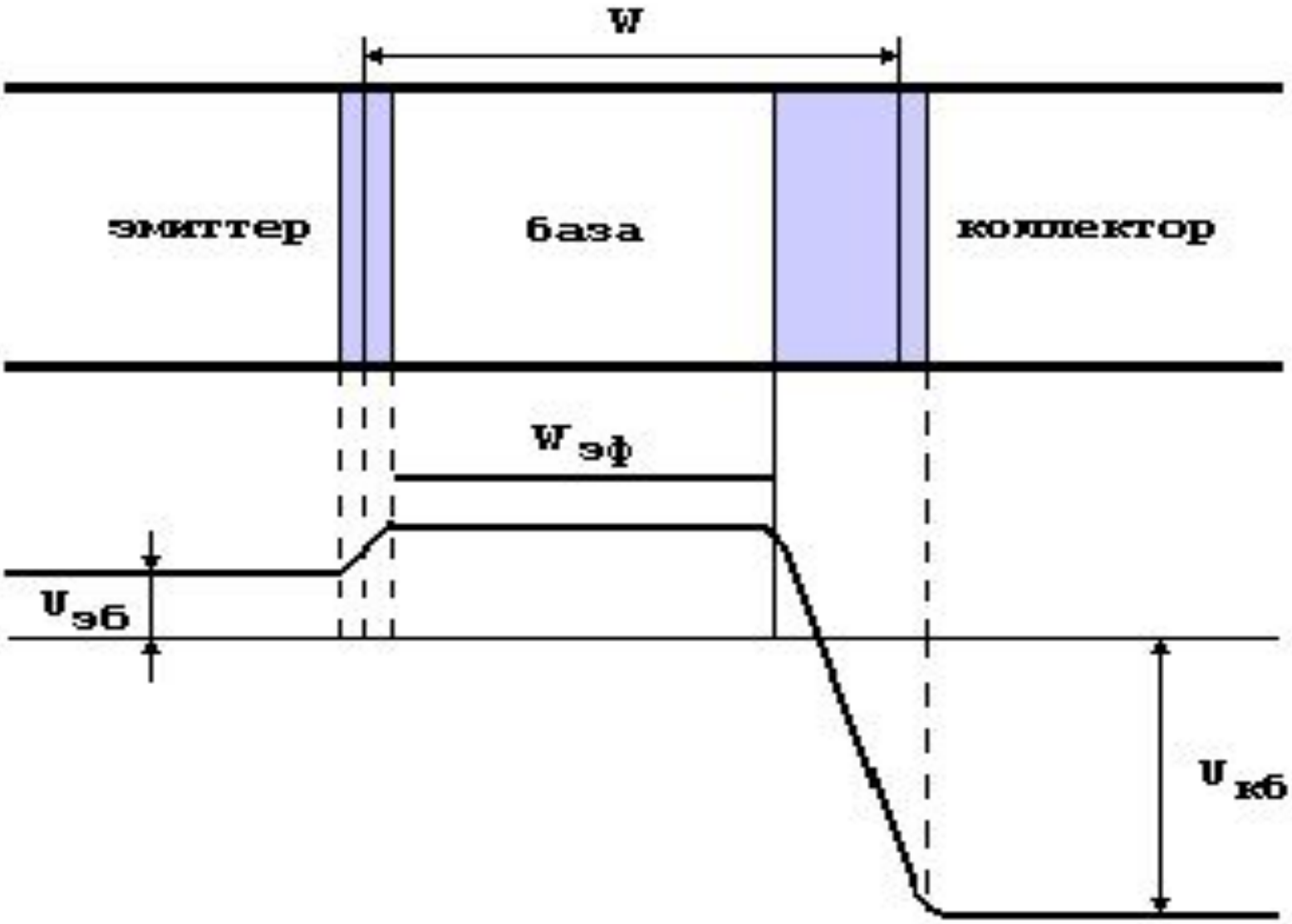

э
б
к
Iэ
Ik
p
n
p
+
−
+
−
Eэ
Eк

Принцип работы

Когда ключ разомкнут, ток в цепи эмиттера *(далее Э)* отсутствует. При этом в цепи коллектора *(К)* имеется небольшой ток, называемый обратным током *К* и обозначаемый ***Ікбо***. Этот ток очень мал, так как при обратном смещении *К* перехода потенциальный барьер велик и непреодолим для основных носителей- дырок коллектора и свободных электронов базы. *К* легирован примесью значительно сильнее, чем база. Вследствие этого неосновных носителей в коллекторе значительно меньше, чем в базе, и обратный ток *К* создаётся главным образом неосновными носителями: дырками, генерируемыми в базе в результате тепловых колебаний, и электронами, генерируемыми в *К*.


Ik мА
Iэ3>Iэ2>Iэ1
Iэ3
Iэ2
Iэ1
Uкб В

- Для рассматриваемого *p-n-p* транзистора принято отрицательное напряжение *К-Б* откладывать вправо по оси абсцисс.
- Выходные характеристики, соответствующие отрицательным значениям напряжения *К-Б*, в правом верхнем квадранте идут почти горизонтально, но с небольшим подъемом.


W
эмиттер
база
коллектор
$W_{эф}$
$U_{эб}$
$U_{кб}$

Потенциальная диаграмма

- Эффективная толщина базы ***Wэф***, т.е. расстояние между границами обедненных слоев, меньше толщины базы ***W***. Увеличение отрицательного напряжения на коллекторе расширяет обедненный слой коллекторного перехода и, следовательно, вызывает уменьшение эффективной толщины базы.
- Это явление носит название *эффекта Эрли*. Модуляция толщины базы объясняет некоторый подъём выходных характеристик при увеличении отрицательного напряжения *К-Б*. Коллекторный ток при этом увеличивается, так как меньшая часть дырок теряется в базе вследствие рекомбинации с электронами

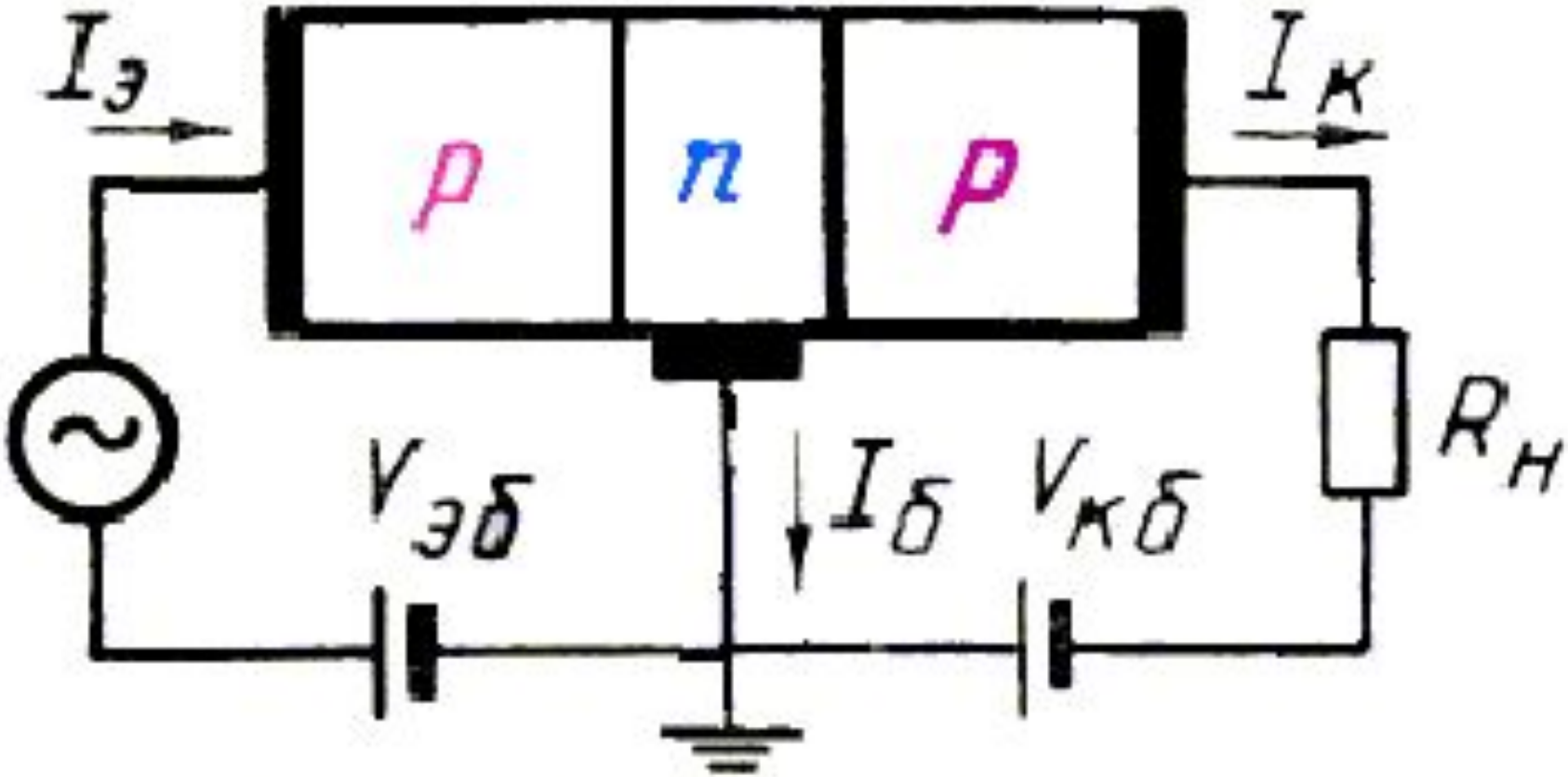
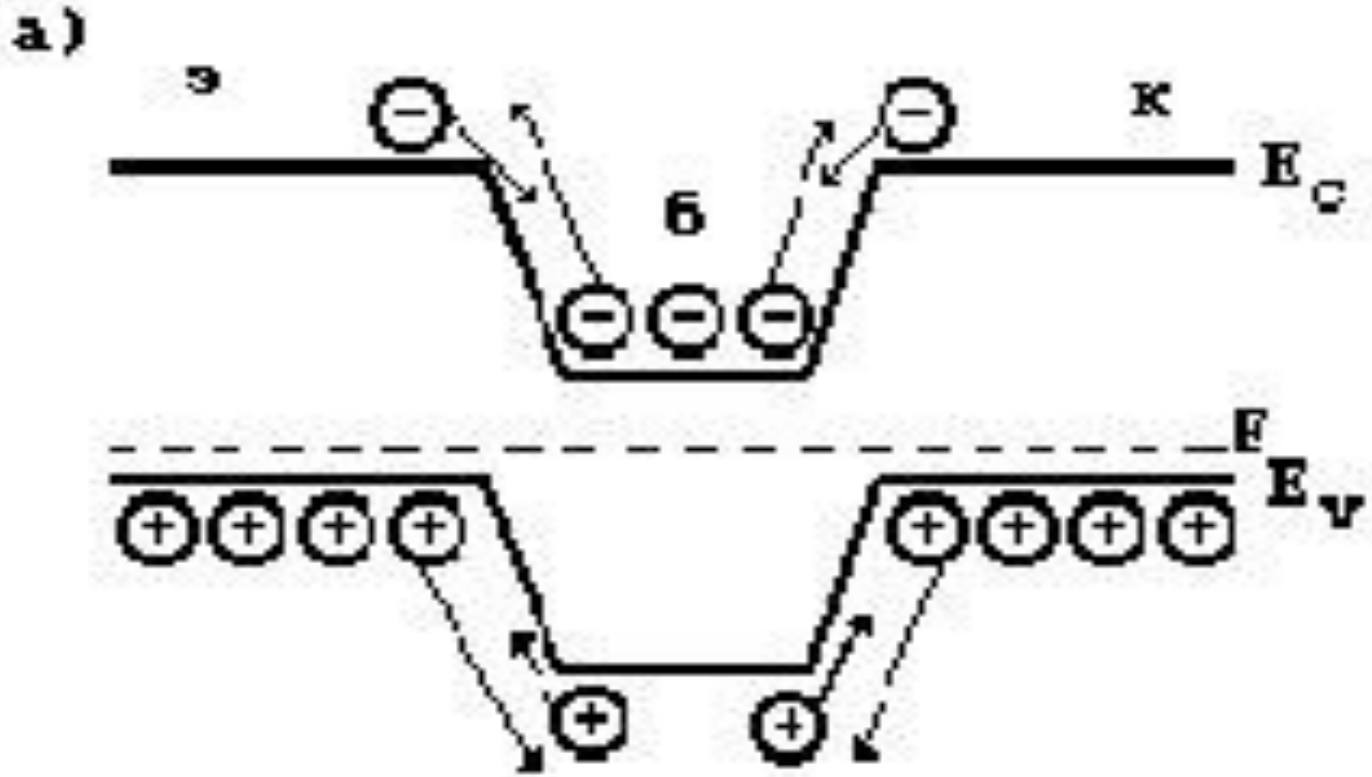


Рис. 1. Биполярный p-n-p транзистор, включенный по схеме с общей базой

Принцип действия транзистора в качестве усилителя

- **Транзистор** - это полупроводниковый прибор, имеющий два *p-n* перехода, расположенных в одном полупроводниковом монокристалле на расстоянии, значительно меньшем диффузионной длины неосновных носителей заряда. На *рис. 1* показано включение транзистора типа *p-n-p* по схеме с общей базой.
- Левый *p-n* переход называется эмиттерным переходом, а его *p*-область - эмиттером. Правый *p-n* переход называется коллекторным переходом, а его *p*-область - коллектором. Заключенная между эмиттером и коллектором *n*-область называется базой транзистора. Транзистор, у которого эмиттер и коллектор *n*-типа, а база *p*-типа, называется транзистором *n-p-n*-типа.


а)
э
к
б
E_C
F
E_V

- Энергетическую диаграмму транзистора можно построить на основе энергетической диаграммы *p-n* структуры, причем каждый переход имеет свой потенциальный барьер, препятствующий переходу основных носителей в соседнюю область.
- Состояние транзистора, при котором отсутствует напряжение на *p-n* переходе между эмиттером и базой *(Э - Б)*, называют равновесным *(рис.а)*. В равновесном состоянии на обоих переходах устанавливается динамическое равновесие между потоками дырок и электронов, протекающих в обе стороны.

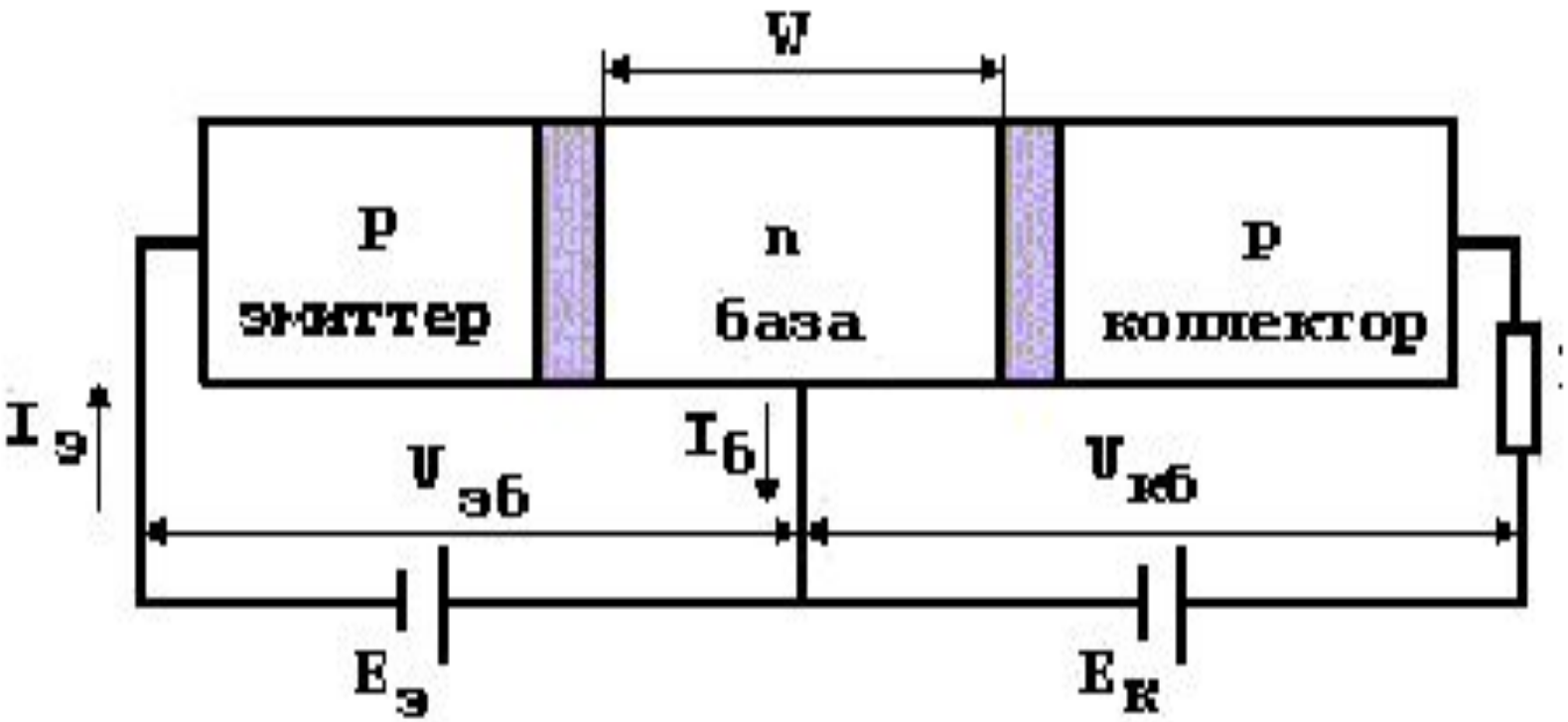
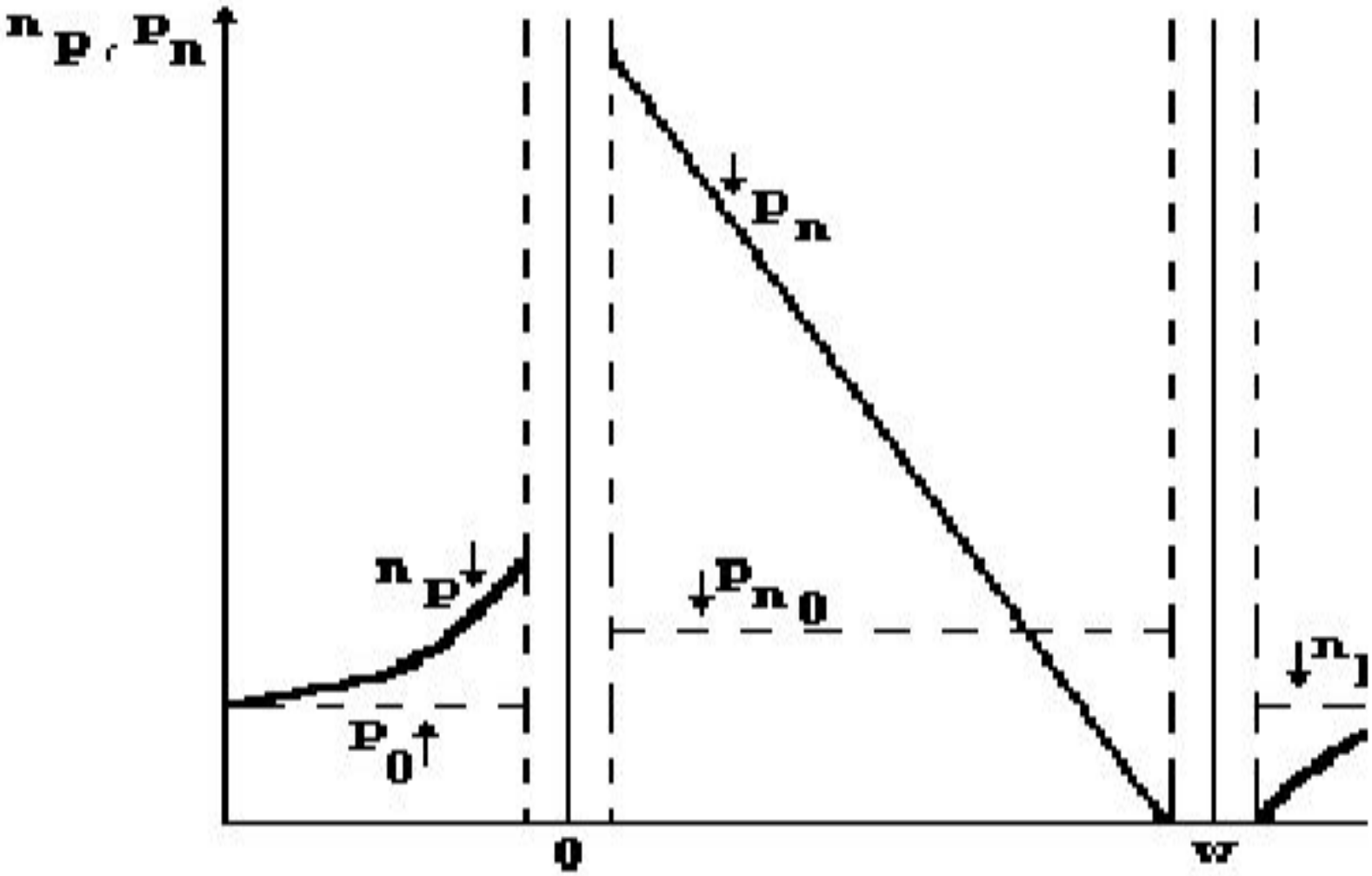
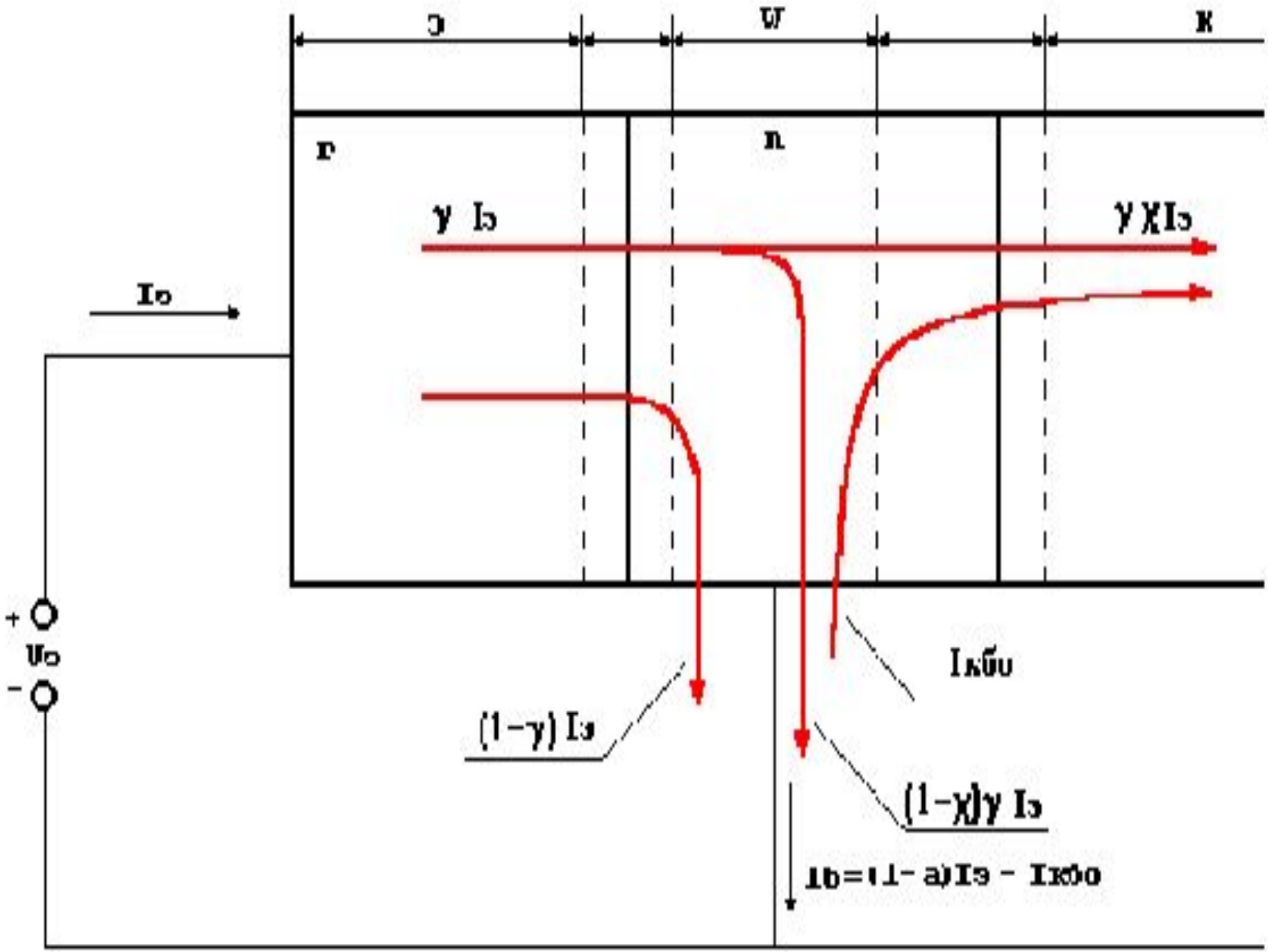


рис. 1

- В рабочем режиме на переходы транзистора подаются постоянные напряжения ***Uэб*** и ***Uкб***, которые создаются источниками э.д.с. ***Eэ*** и ***Eк*** в эмиттерной и коллекторных цепях.
- При подаче на эмиттерный переход прямого напряжения смещения ***Uэб*** потенциальный барьер этого перехода уменьшается и нарушается равновесное состояние. В результате начнётся взаимная инжекция носителей в базу и эмиттер . При этом в базу инжектируются дырки, которые преодолевают уменьшившийся потенциальный барьер. Эти дырки проходят через базу и далее через коллекторный переход в коллектор, образуя коллекторный ток ***Iк***, протекающий через нагрузочное сопротивление ***Rн***. Небольшая часть дырок рекомбинирует в базе, образуя ток базы ***Iб***. Этот ток очень мал, так как база имеет незначительную длину (меньше длины свободного пробега) и рекомбинация в ней мала.


n_p, p_n
p_n
n_p
p_{n0}
n_1
p_0
0
w

- распределение носителей Pn, инжектированных эмиттером в базу, изменяется по линейному закону .
- Следует отметить, что реальное распределение носителей несколько отличается от линейного закона, что объясняется процессом рекомбинации некоторого числа дырок с электронами. На *рис.2* индексом "0" обозначены равновесные концентрации носителей. Распределение носителей ***Np*** в области эмиттера аналогично их распределению в диоде при прямом включении, а распределение в области коллектора такое же, как в диоде при обратном включении *(рис.2)*. Все рассмотренные законы распределения носителей действительны только для бездрейфового транзистора.


э
W
к
p
n
γ Iэ
γ χIэ
Iэ
+
Uэ
-
Iкбо
(1−γ) Iэ
(1−χ)γ Iэ
Iб=(1−α)Iэ − Iкбо

Токи в транзисторе

- В результате снижения потенциального барьера на эмиттерном переходе из эмиттера в базу начинается диффузионное движение основных носителей. Так как дырок(электронов) в эмиттере (базе) много больше, чем в базе(эмиттере), то коэффициент инжекции весьма высок. Концентрация дырок в базе увеличивается. Появившийся вблизи эмитерного перехода объемный положительный заряд почти мгновенно компенсируется зарядом электронов входящих в базу от источника ***Uэб***. Цепь тока Эмиттер-База замкнута. Электроны, устремившиеся в базу, создают вблизи эмитерного перехода объемный отрицательный заряд. Около перехода образуется область повышенной концентрации дырок и электронов. Они начинают диффундировать в сторону коллектора. Так как база узкая, то дырки (неосновные носители) не успевают прорекомбинировать и, попадая в ускоряющее поле коллекторного перехода, втягиваются в коллектор. Этот процесс называется экстракция. Электроны же, число которых равно числу ушедших в коллектор дырок, устремляются в базовый вывод. Цепь коллектор-база замкнута.

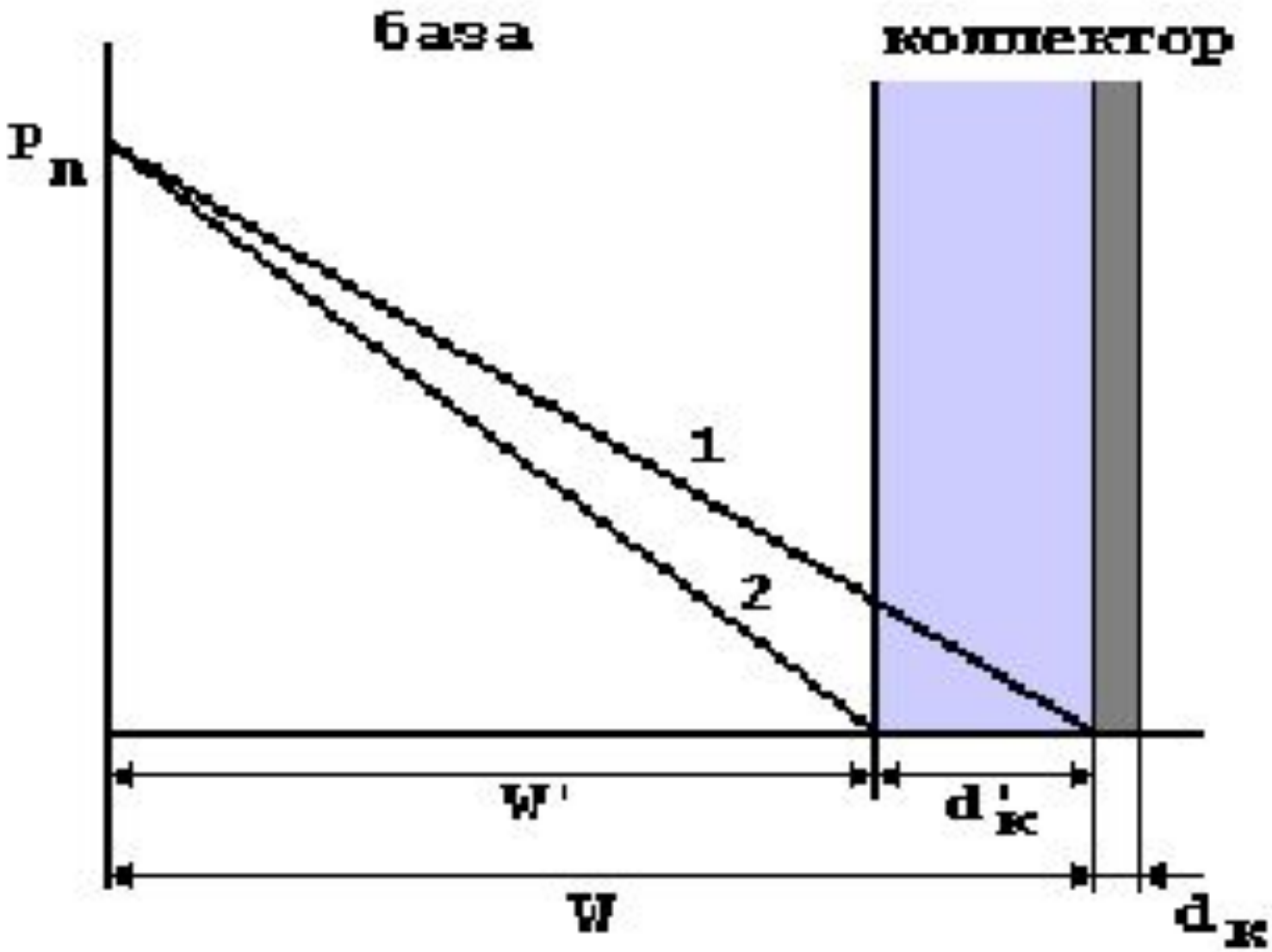

база
коллектор
p_n
1
2
W'
$d'_к$
W
$d_к$

Схема замещения транзистора и ее параметры

- Рассмотрим значение толщины базы ***W***, ***W'*** и коллектора d***k***, d***k'*** при различных значениях коллекторного напряжения ***Uкб*** и ***U'кб*** с помощью диаграмм *(рис.2)*.
- Видно, что при заданном значении тока ***Iэ*** на входе и изменении напряжения ***Uкб*** на ***U'кб*** одновременно с сокращением ширины базы изменяется распределение концентрации зарядов ***Pn***, так *прямая 1* переходит в *прямую 2*, имеющую больший угол наклона. Такому изменению распределения соответствует увеличение эмитерного напряжения. Следовательно, коллекторное напряжение, модулируя толщину базы, одновременно воздействует на эмитерное напряжение.

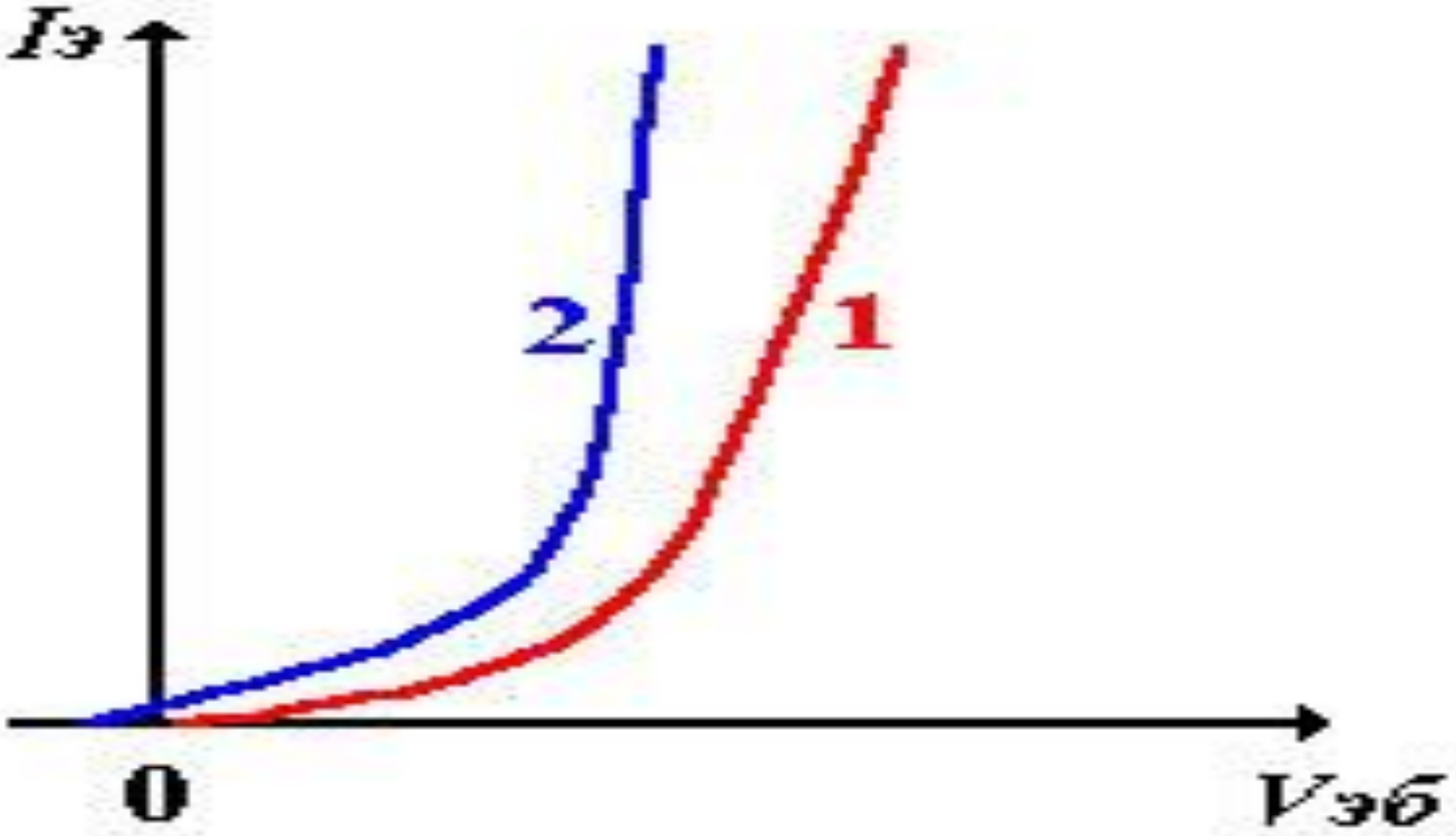


Рис. 2. Входные хар-ки р-п-р транзистора, включенного по схеме с общей базой: 1- Vкб =0; 2-Vкб<0

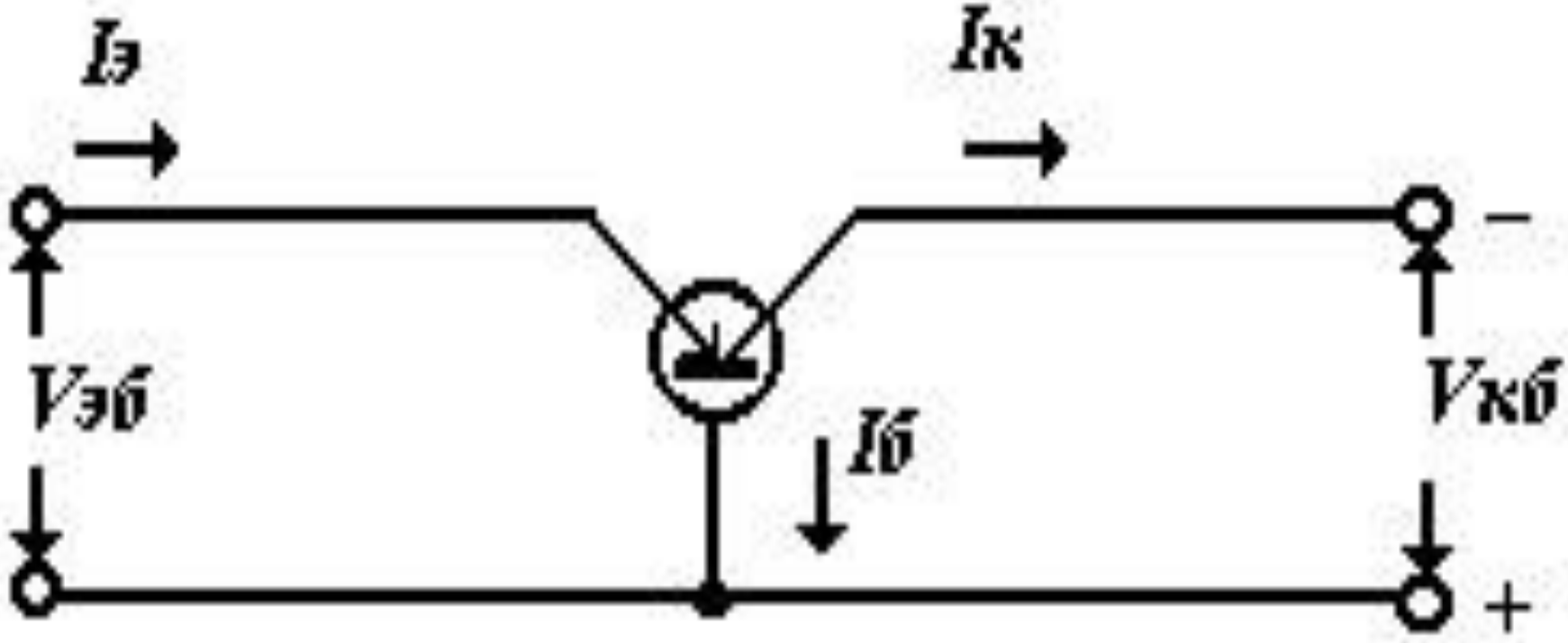


Рис. 1

Схема с общей базой

Схема с общей базой

- При включении транзистора по схеме с общей базой *(рис.1)* входным является ток эмиттера, а выходным - коллектора.
- Если ***Vкб=0***, то ***Iэ ~ [exp(q * Vэб / k * T) - 1]*** *(рис.2, кривая 1)*. При ***Vкб < 0*** и ***Vэб=0*** эмитерный ток, как следует из *(2)* отличается от нуля. Обычно при работе транзистора в режиме усиления ***| Vкб | > 2,3k * T / q***, но тогда ***p(W) = -pn***, а ***p = pn***. Таким образом, в рассматриваемой ситуации в базе транзистора существует градиент концентрации дырок и ***Iэ*** не равно 0. Для компенсации этого тока на эмитерный переход необходимо подать смещение в запорном направлении *(рис. 2, кривая 2)*.

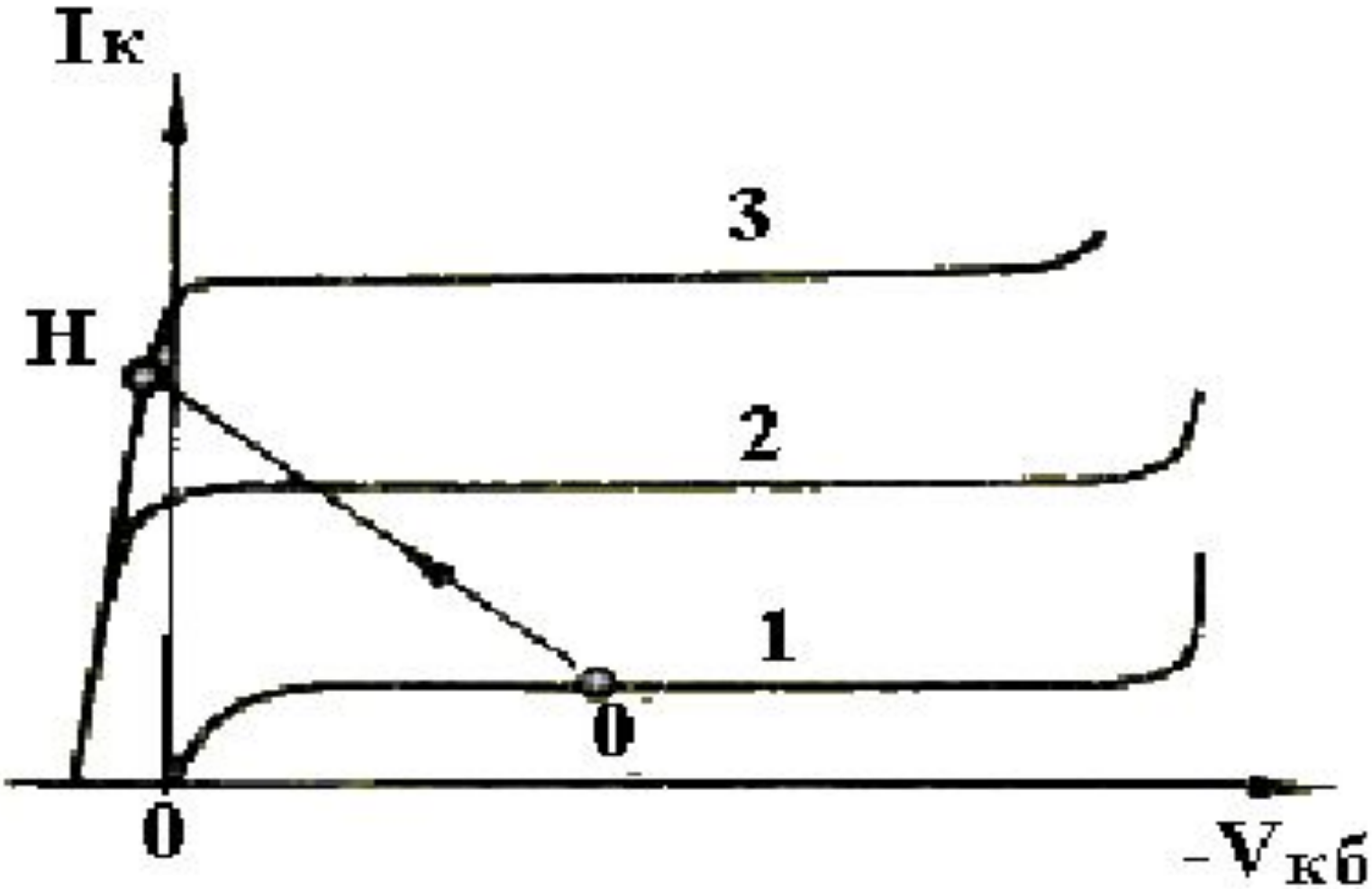


Рис. 3 Выходные хар-кн
p-n-p транзистора, включенного
по схеме общей базой:
1 - Iэ = 0; 2 - Iэ1;
3 - Iэ2 > Iэ1

- все выходные характеристики при ***Iэ*** не равному 0 начинаются в области положительных значений ***Vкб*** *(рис. 3, кривые 2 и 3)*.Поскольку ***а0 ~ 1***, ***Iк0<<IЭ< i>***, *то из (5) видно, что* ***Iк Iэ*** *и фактически не зависит от* ***Vкб*** *в области его отрицательных значений. При достаточно больших обратных смещениях на коллекторном переходе в нем развивается обычно лавинный пробой и на выходной характеристике появляется участок резкой зависимости* ***Iк*** *от* ***Vкб*** *(рис. 3). Большой ток может протекать через транзистор и в случае прокола базы, когда эмиттерный и коллекторный переходы сомкнутся за счет расширения ООЗ последнего при увеличении* ***Vкб****.*

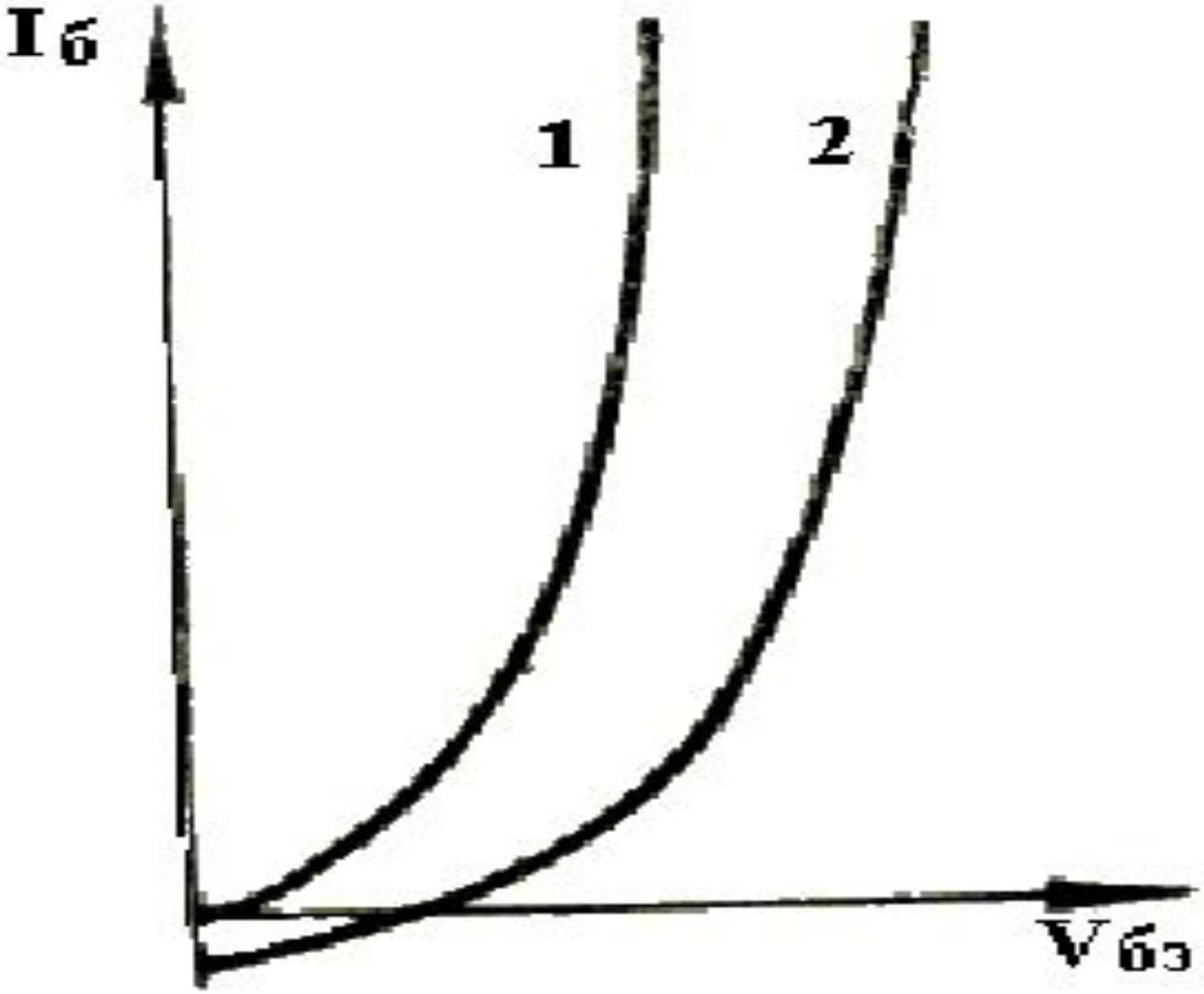


Рис. 5 Входные хар-ки p-n-p транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:
1 - Vкэ = 0; 2 - Vкэ < 0

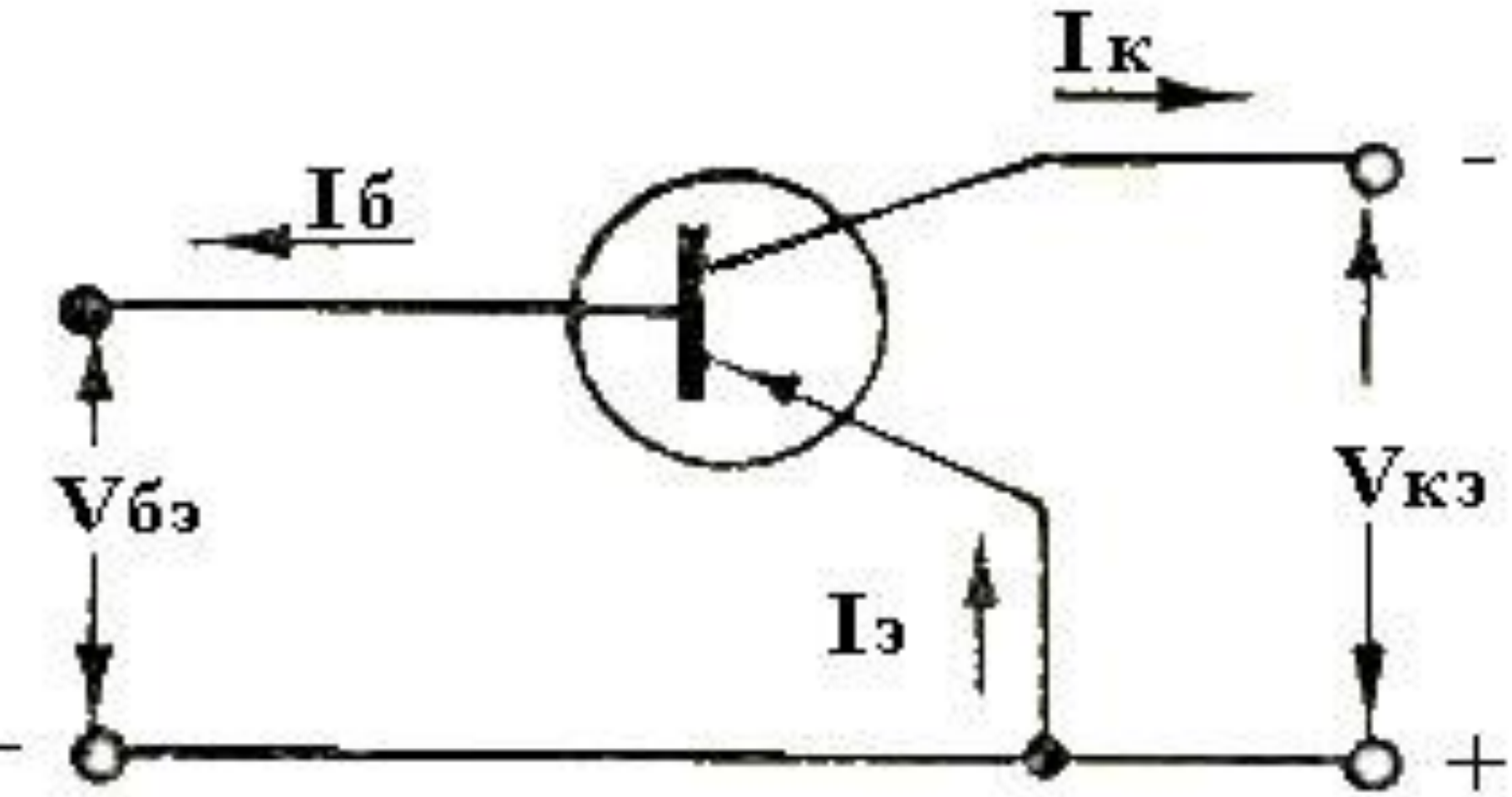
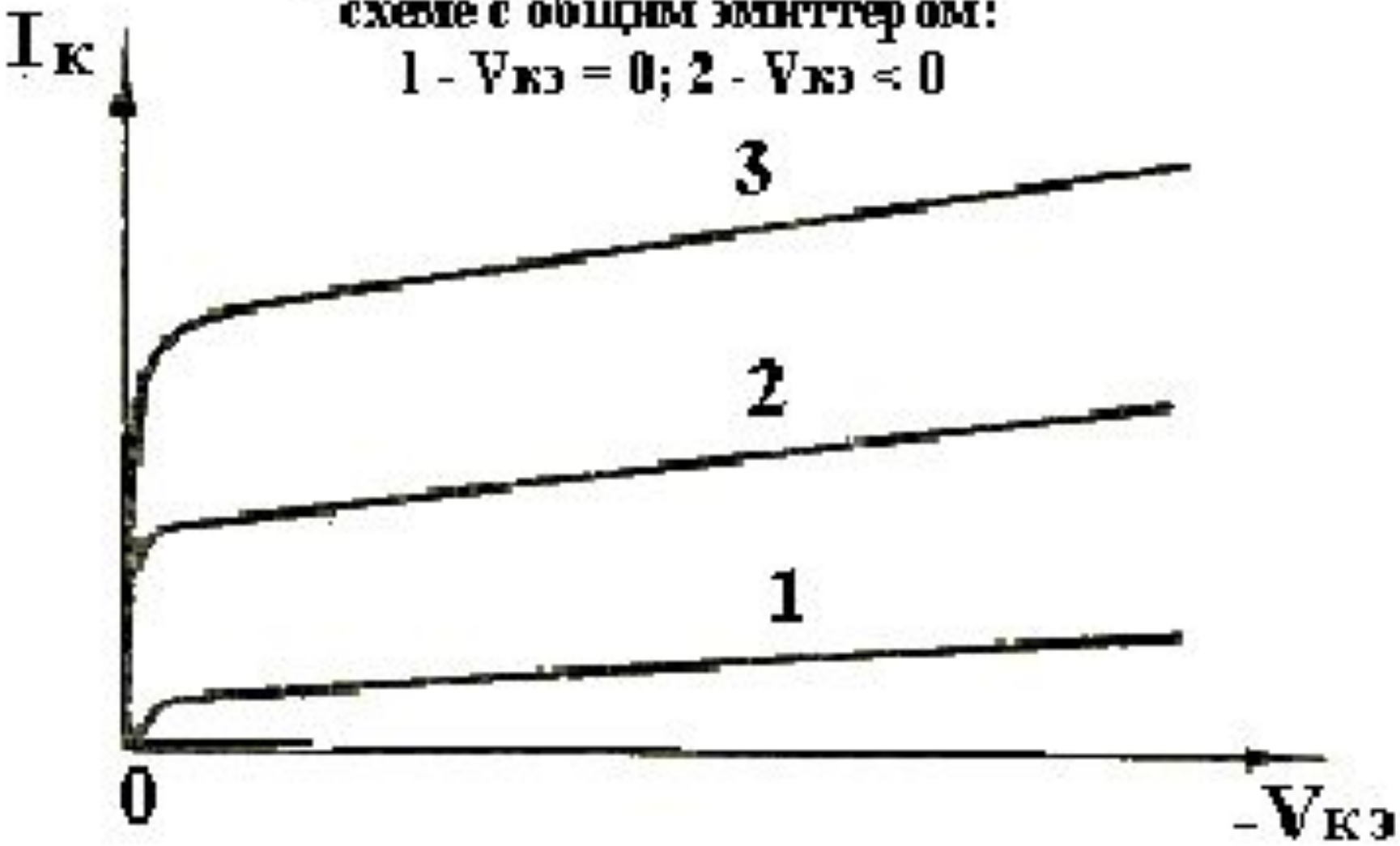


Рис. 4 Схема с общим эмиттером

Схема с общим эмиттером

- *На практике довольно часто используются транзисторы, включенные по схеме с общим эмиттером .*
- *В этой схеме входным является ток базы, а выходным, как и в предыдущем случае, ток коллектора.*
- *Анализ общего вида входных характеристик, представляющих собой зависимость **Iб** от **Vбэ** при фиксированных значениях **Vкэ***
- *Если **Vкэ=0**, то входная характеристика должна изображаться кривой, выходящей из начала .координат (рис. 5, кривая 1), так как при **Vбэ = 0 Vбк** и **Iк0** также равны нулю. При **Vкэ < 0** и **Vбэ = 0** коллектор должен быть смещен в запорном направлении. Тогда при **Vбэ = 0 Iб = - Iк0**, то есть начало входной характеристики располагается в области отрицательных значений тока (рис. 5, кривая 2). В целом ход зависимости **Iб** от **Vбэ** определяется эмиттерным током **(Iэ exp(q * Vбэ / k * T) - 1)**, и по своей форме входные характеристики подобны вольтамперной характеристике p-n-перехода, смещенного в пропускном направлении.*

Рис. 7 Выходные хар-ки p-n-p-транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:
1 - $V_{кэ} = 0$; 2 - $V_{кэ} < 0$



- *При перемещении вдоль выходной характеристики в сторону увеличения тока падение напряжения на коллекторном переходе Vkб в области малых значений Vкэ положительно, затем переходит через нуль, меняет знак на противоположный и непрерывно увеличивается. По мере увеличения Vкб, за счет расширения ООЗ коллекторного перехода уменьшается ширина базы транзистора и, следовательно, увеличивается a0 . Это приводит к существенному росту Во [см. (6)] и Iк [см. (8)] при увеличении Vкэ*

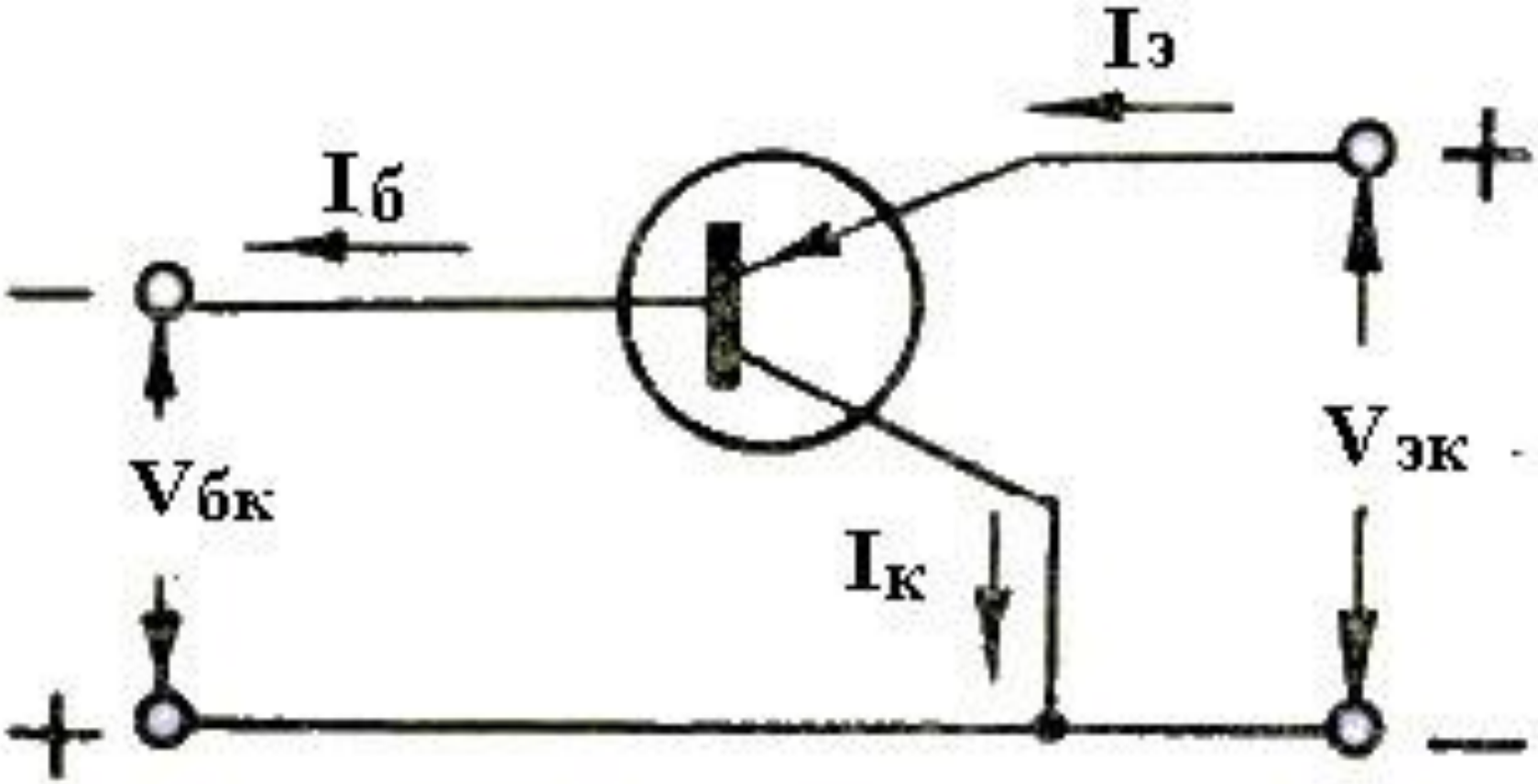
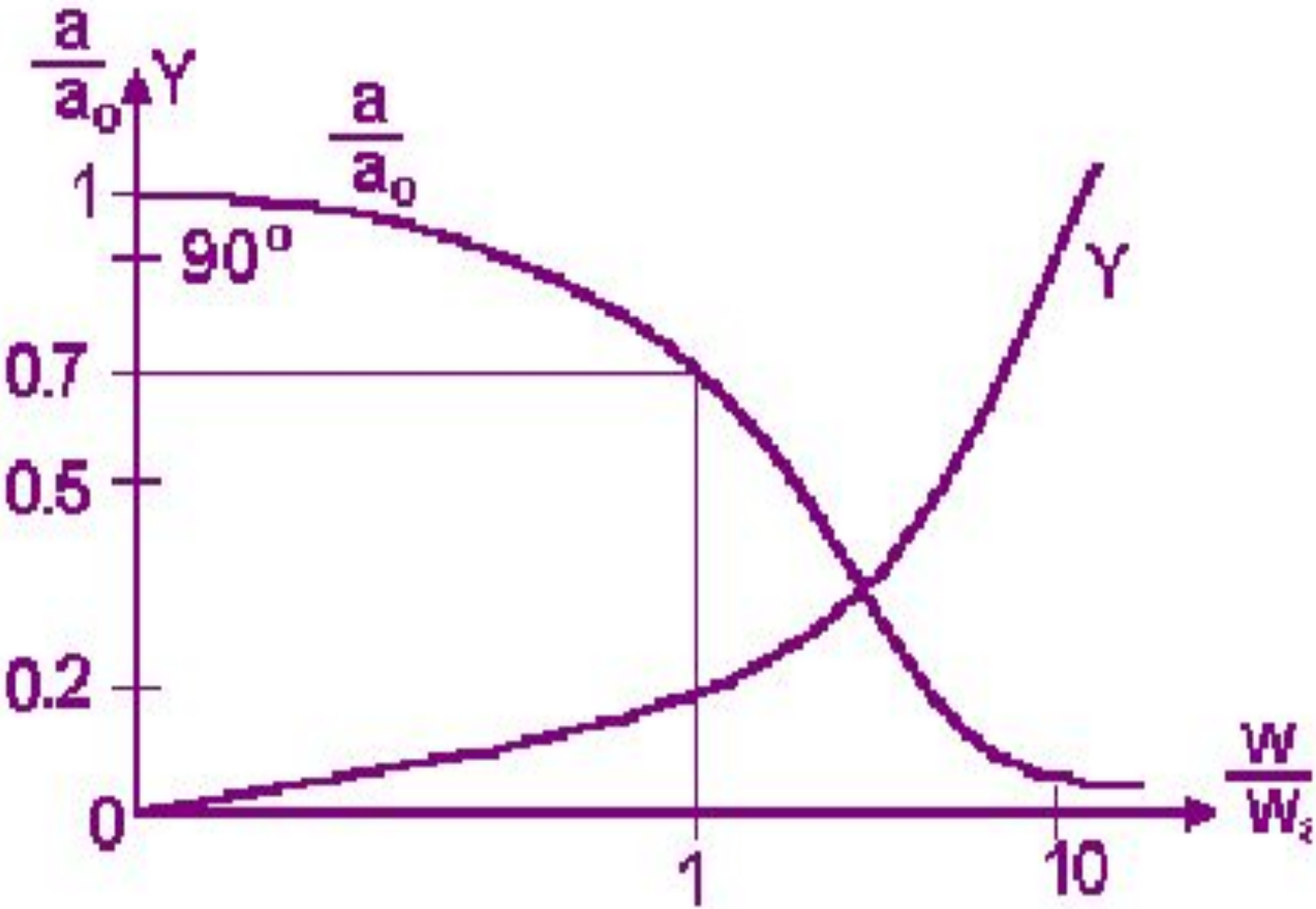


Рис. 7 Схема с общим коллектором

Схема с общим коллектором

- *В этой схеме включения так же, как и в предыдущем случае, управляющим (или входным) является ток базы, но роль выходного играет ток эмиттера .*
- *Поскольку **a0 ~ 1**, то **B0*>>1**. Входной ток в данном случае практически не зависит от входного напряжения.*
- *выходные характеристики подобны характеристикам транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.*
- *транзистор, включенный по схеме с общим коллектором, обладает высоким сопротивлением на входе и малым на выходе. Это свойство транзистора используется для согласования схем с различными сопротивлениями.*


a/a0
Y
a/a0
1
90°
0.7
0.5
0.2
0
Y
W/Ws
1
10

Работа на высокой частоте.

- Чтобы охарактеризовать частотные свойства транзистора широко используются частотные характеристики; представляющие собой зависимость модуля коэффициента передачи ***a*** от частоты *(АЧХ)* и фазы ***Y(a)*** *(ФЧХ) (рис.1)*. С увеличением частоты ***W*** увеличивается сдвиг по фазе ***Y***, обусловленный влиянием инерционных процессов при прохождении неосновных носителей через базу; и в конечном счете уменьшается коэффициент ***a***. В схеме с общим эмиттером величина коэффициента передачи тока базы в более сильной степени зависит от частоты, что приводит к уменьшению граничной частоты в схеме с *ОЭ*. Уменьшение коэффициента ***a*** происходит в результате того, что с повышением частоты ток коллектора отстает от тока эмиттера .

i1
i2
u1
u2

Параметры транзистора как элемента цепи

- Транзистор является управляемым элементом цепи. Если на входе транзистора нет управляющего сигнала, то он является пассивным элементом. Если к входу транзистора приложено переменное напряжение, то транзистор приобретает свойства активного элемента и отдаёт мощность нагрузке. В усилительном режиме на входе транзистора действует переменное напряжение, поэтому он является активным четырёхполюсником.
- Если переменные напряжения на переходах транзистора достаточно малы, токи в нём оказываются линейными функциями этих напряжений. Транзистор можно рассматривать как линейный четырёхполюсник.
- Переменные величины ***i1, u1, i2, u2***, характеризующие электрические свойства транзистора, взаимно связаны. Если любые две из них заданы, то оставшиеся определяются однозначно по параметрам транзистора. За независимые переменные можно принять две любые из этих величин, а две другие - представить в виде функции независимых переменных.