

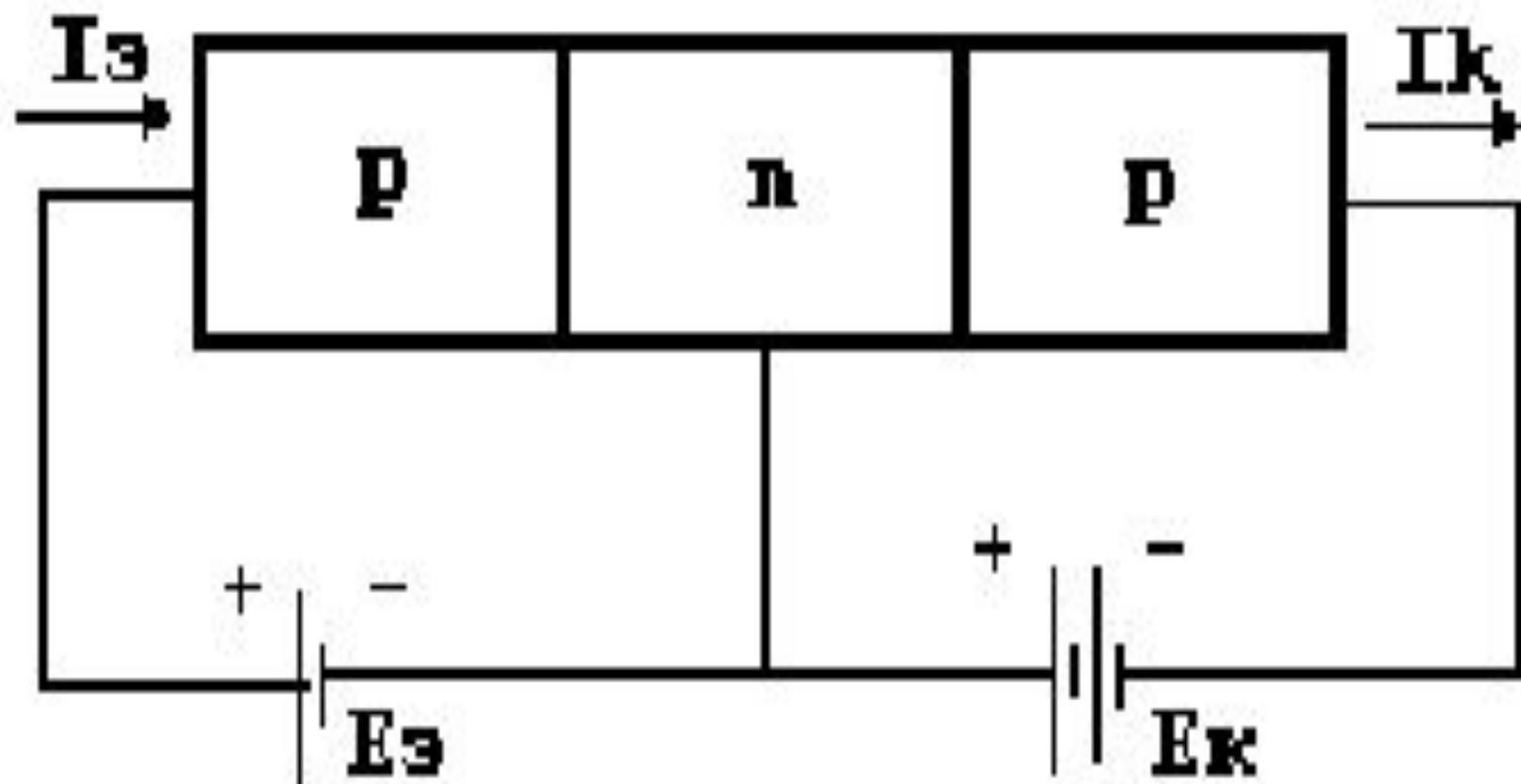
Биполярные транзисторы

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

э

б

к

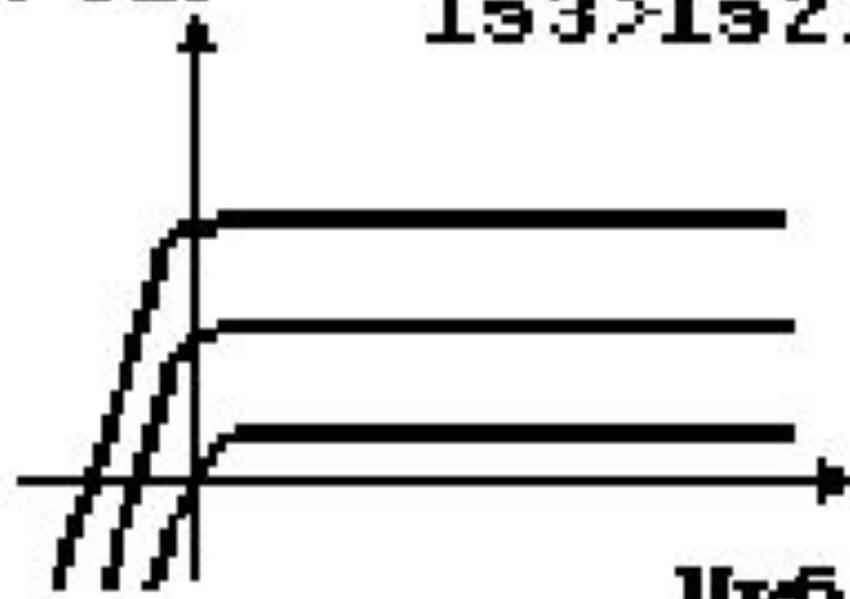


Принцип работы

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 ***I_{кбо}***. 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 создается главным образом неосновными носителями: дырками, генерируемыми в базе в результате тепловых колебаний, и электронами, генерируемыми в К.

$$I_{\text{э}3} > I_{\text{э}2} > I_{\text{э}1}$$

I_k mA



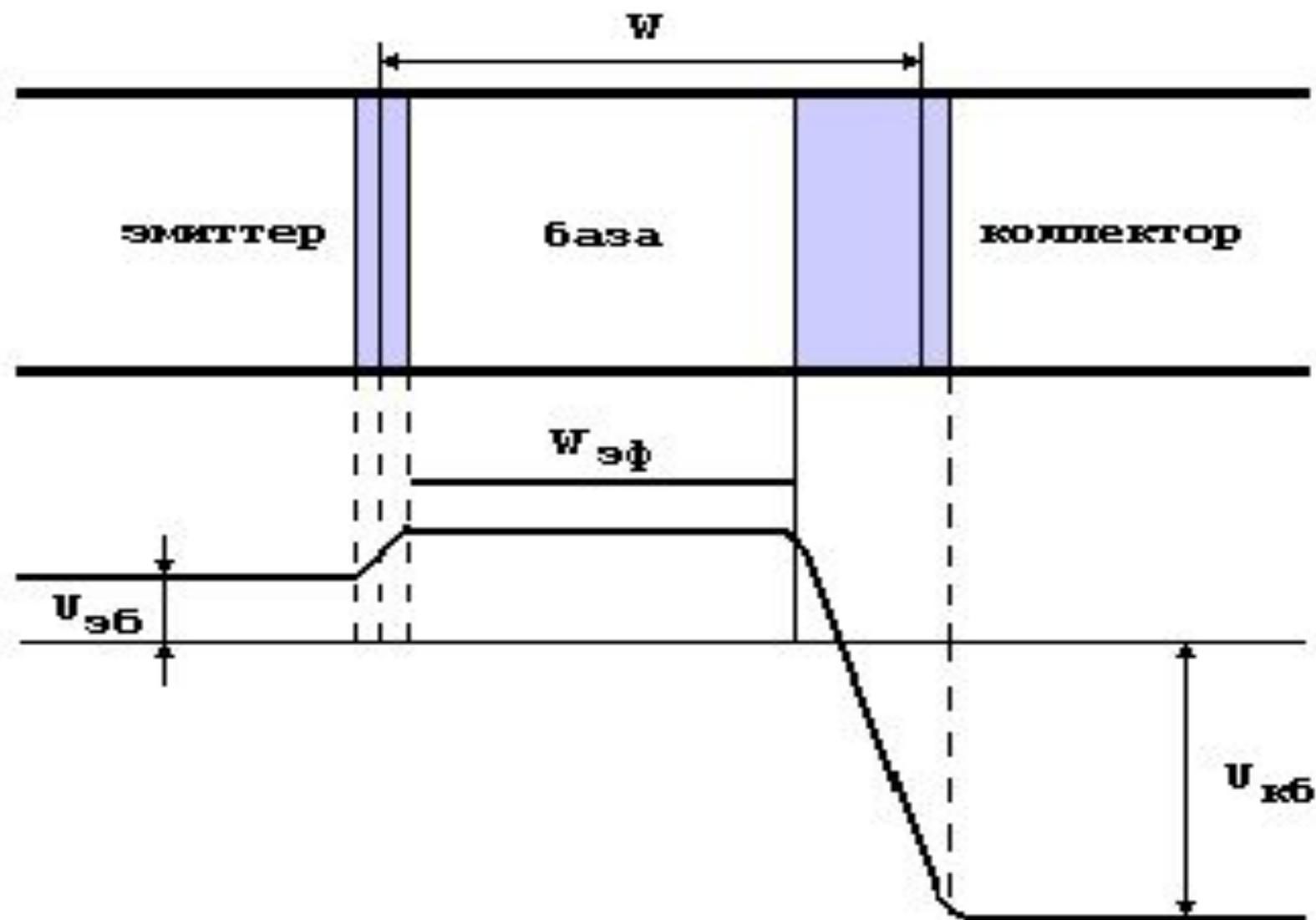
$I_{\text{э}3}$

$I_{\text{э}2}$

$I_{\text{э}1}$

$U_{кб}$ В

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



Потенциальная диаграмма

- Эффективная толщина базы $W_{эф}$, 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 $K-B$. Коллекторный ток при этом увеличивается, так как меньшая часть дырок теряется в базе вследствие рекомбинации с электронами

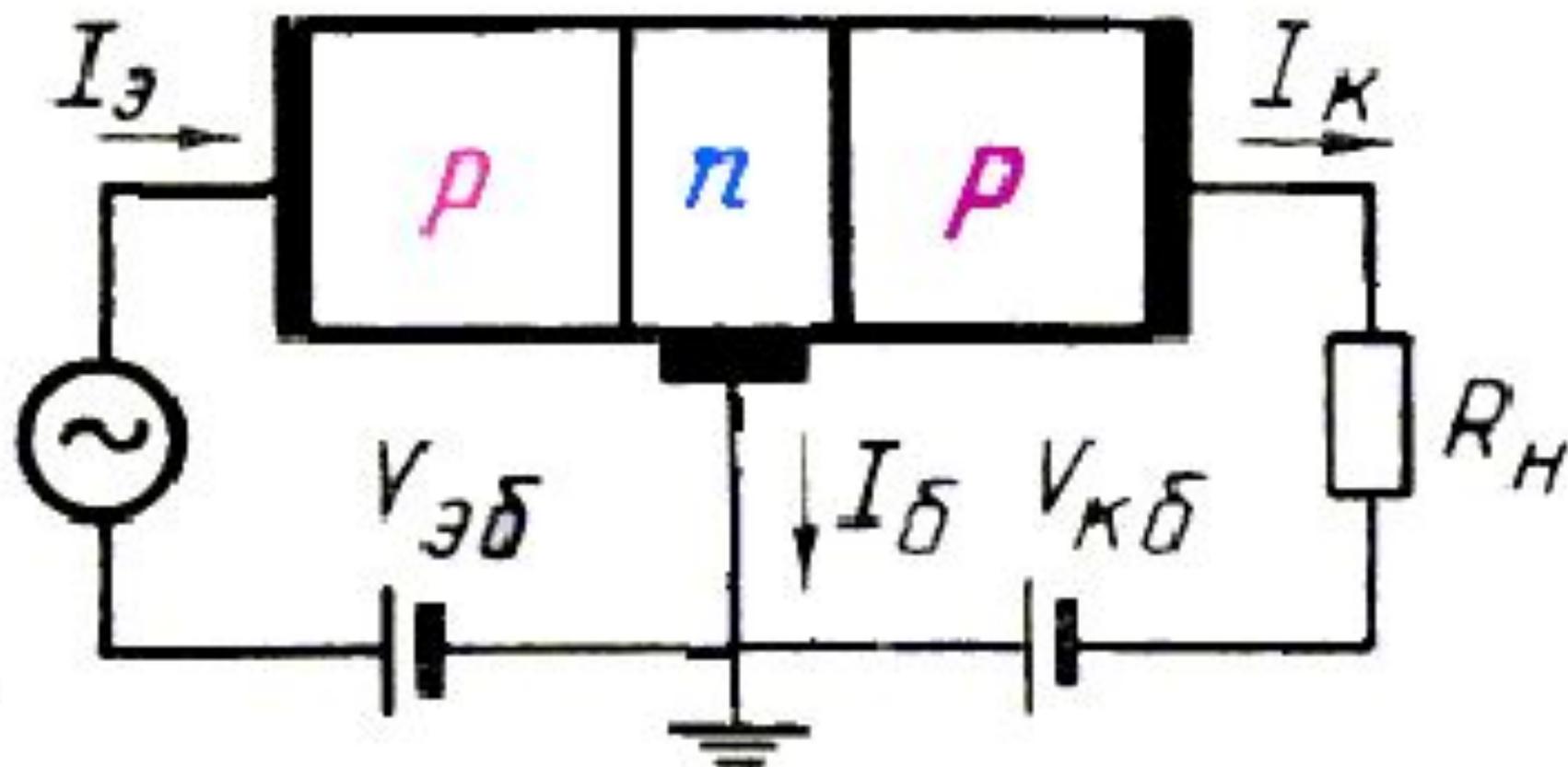
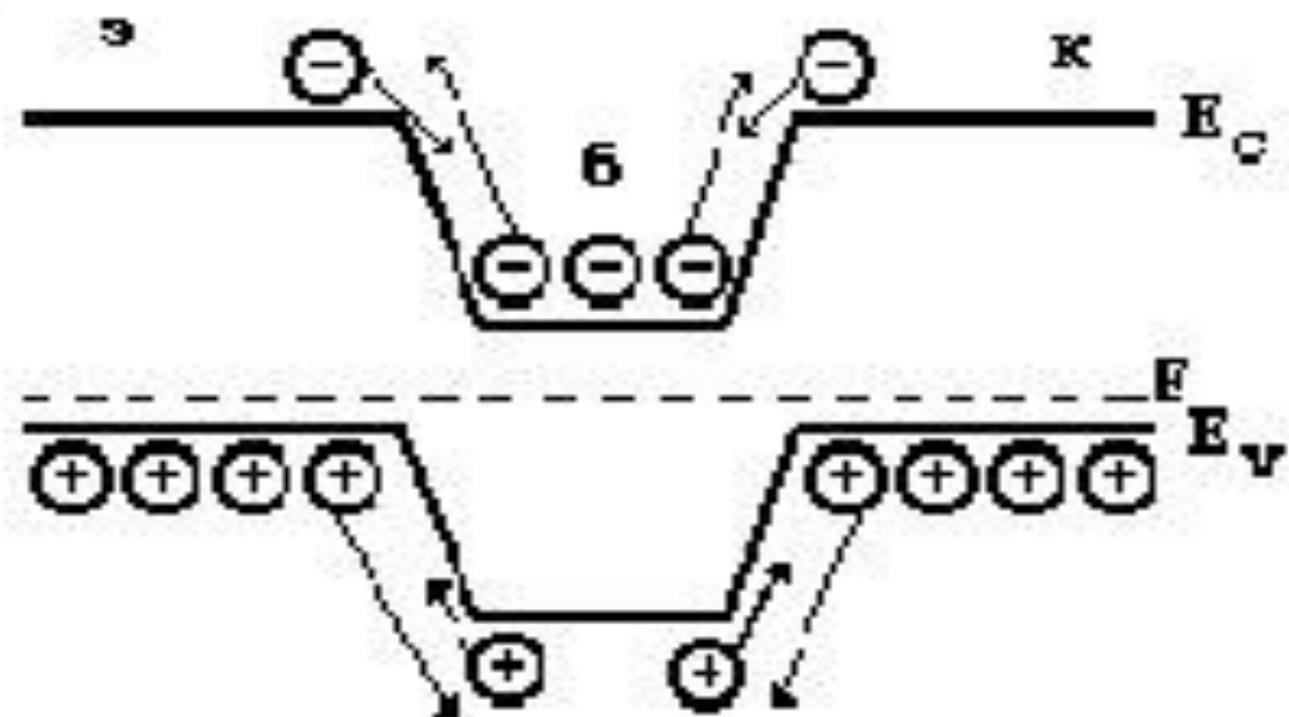


Рис. 1. Биполярный p-n-p транзистор, включенный по схеме с общей базой

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.

a)



- 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 ($\text{Э} - \text{Б}$), называют равновесным (*рис.а*). В равновесном состоянии на обоих переходах устанавливается динамическое равновесие между потоками дырок и электронов, протекающих в обе стороны.

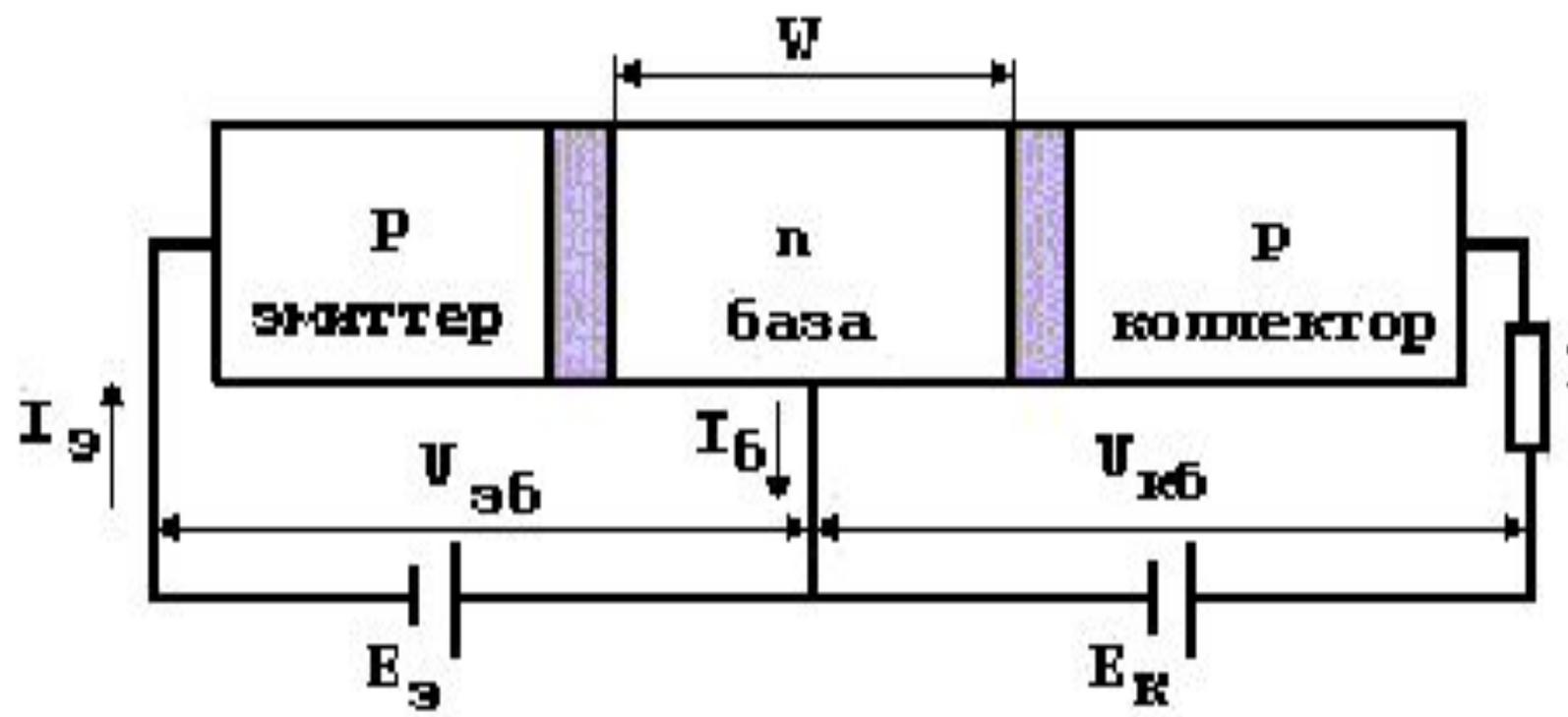
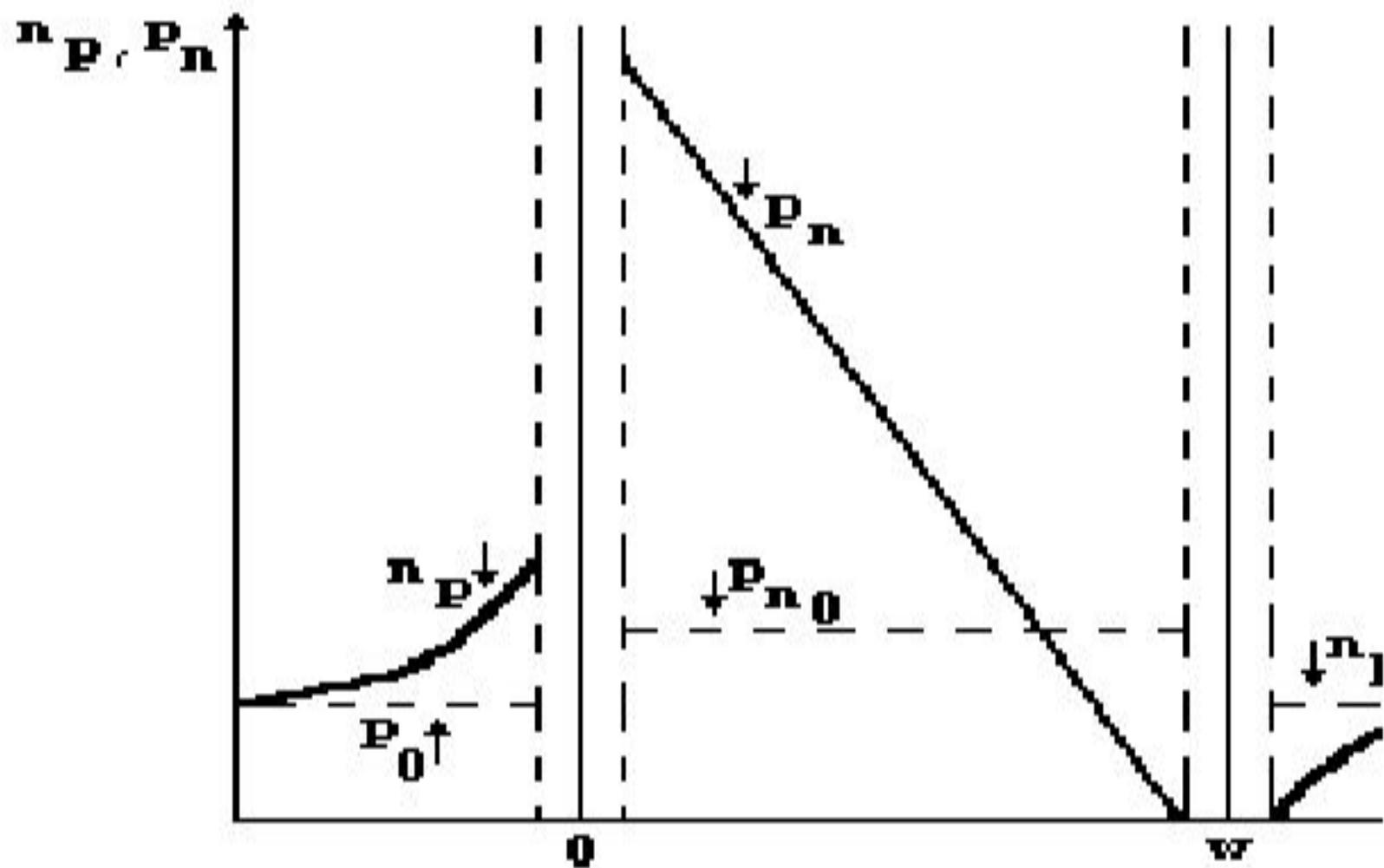
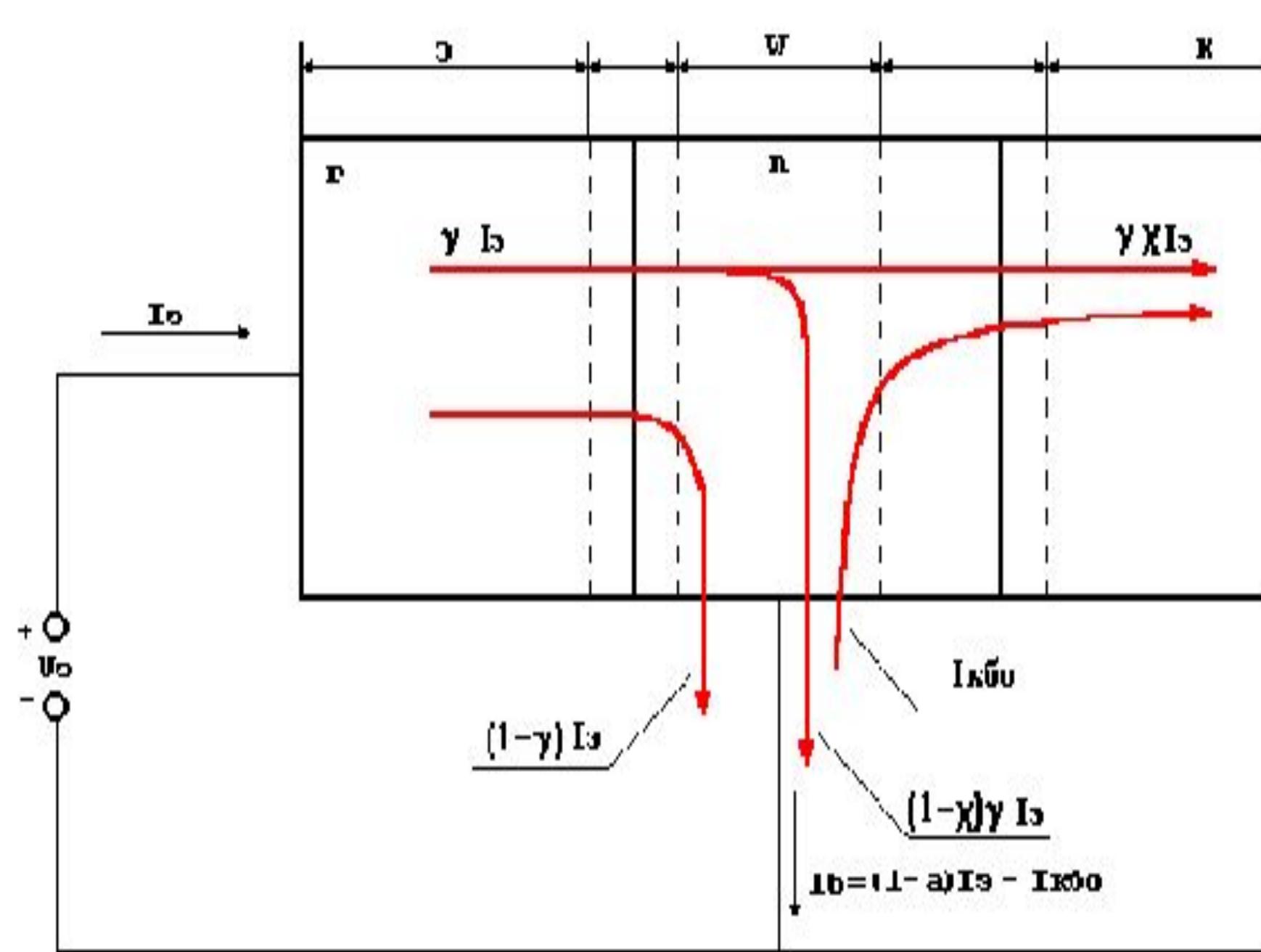


рис. 1

- В рабочем режиме на переходы транзистора подаются постоянные напряжения $U_{эб}$ и $U_{кб}$, которые создаются источниками э.д.с. $E_э$ и $E_к$ в эмиттерной и коллекторных цепях.
- При подаче на эмиттерный переход прямого напряжения смещения $U_{эб}$ 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 $I_к$, протекающий через нагрузочное сопротивление $R_н$. Небольшая часть дырок рекомбинирует в базе, образуя ток базы $I_б$. Этот ток очень мал, так как база имеет незначительную длину (меньше длины свободного пробега) и рекомбинация в ней мала.



- распределение носителей P_n , 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 N_p 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.



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 эмиттерного перехода объемный положительный заряд почти мгновенно компенсируется зарядом электронов входящих в базу от источника $U_{эб}$. Цепь тока Эмиттер-База замкнута. Электроны, устремившиеся в базу, создают вблизи эмиттерного 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.

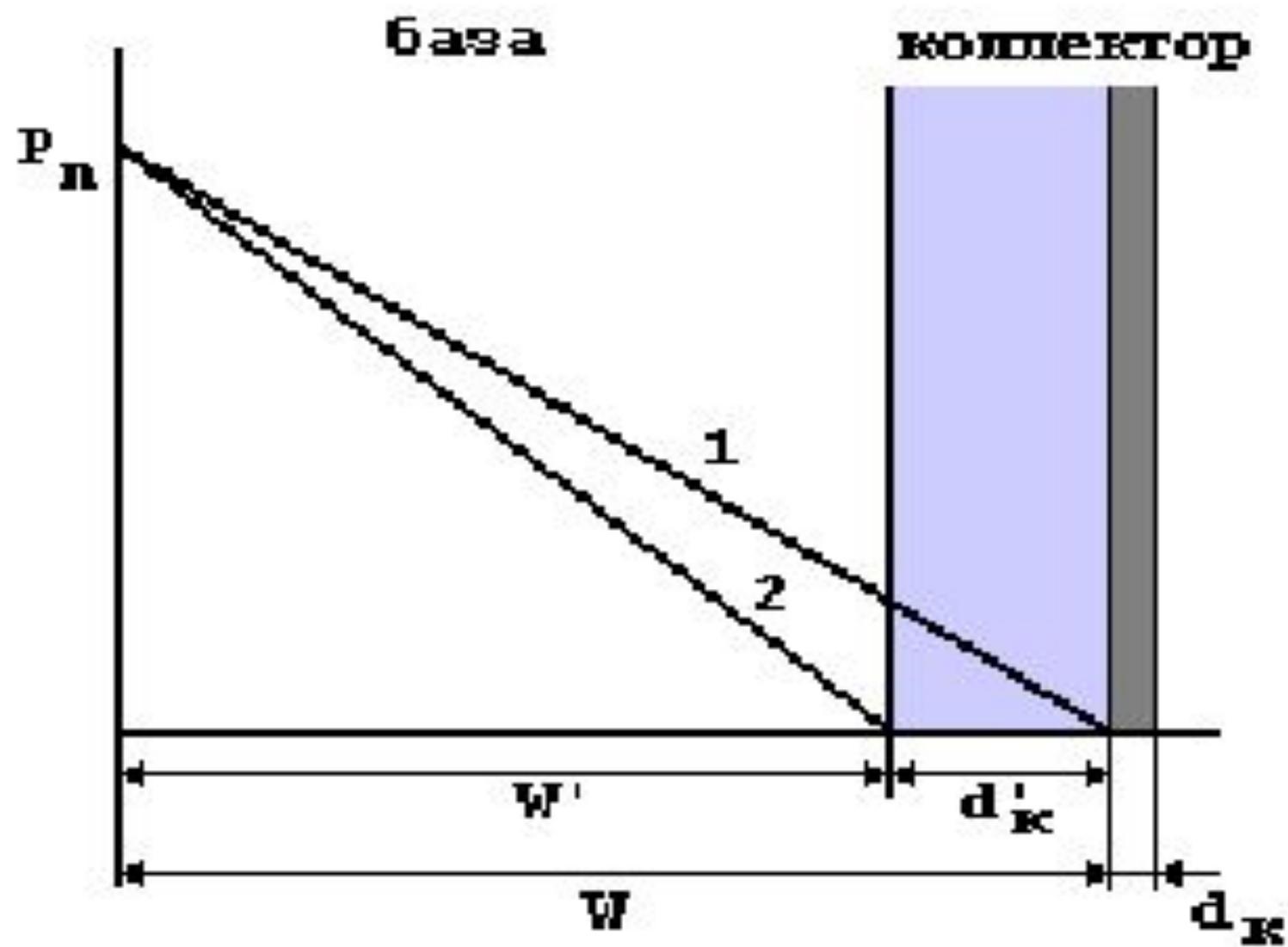


Схема замещения транзистора и ее параметры

- Рассмотрим значение толщины базы W , W' и коллектора dk , dk' при различных значениях коллекторного напряжения $U_{кб}$ и $U'_{кб}$ с помощью диаграмм (рис.2).
- Видно, что при заданном значении тока $I_{э}$ на входе и изменении напряжения $U_{кб}$ 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.

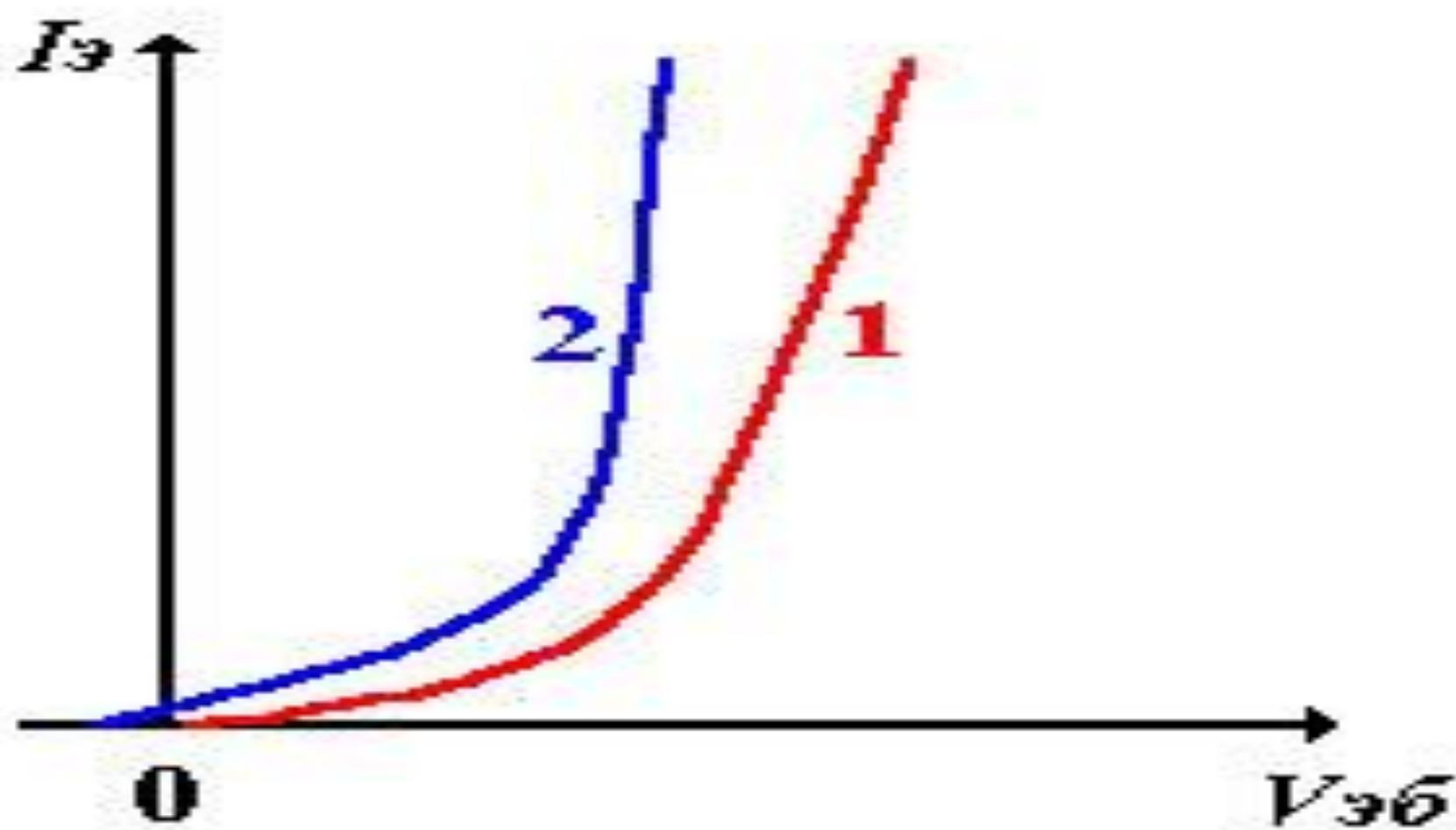


Рис. 2. Входные хар-ки р-н-р транзистора, включенного по схеме с общей базой: 1 - $V_{кб} = 0$; 2 - $V_{кб} < 0$

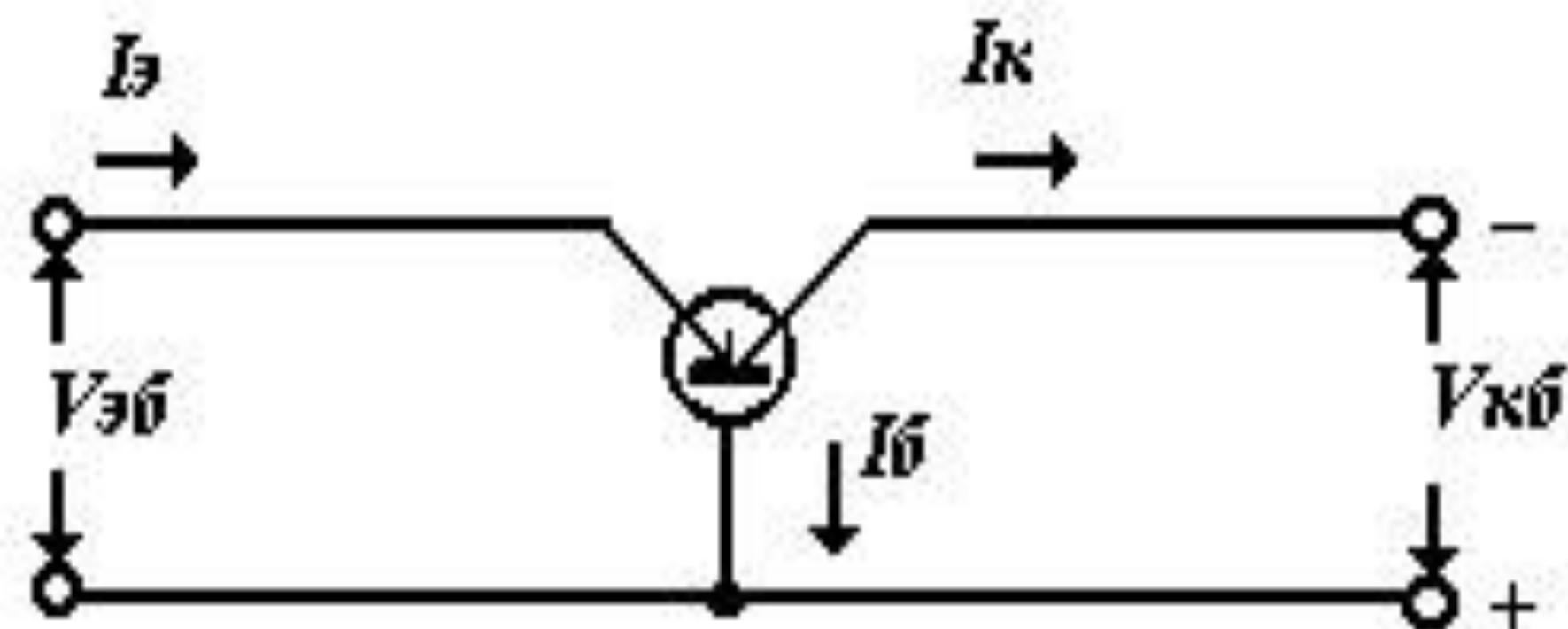


Рис. 1

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 $V_{кб}=0$, то $I_{э} \sim [\exp(q * V_{эб} / k * T) - 1]$ (рис.2, кривая 1). При $V_{кб} < 0$ и $V_{эб}=0$ эмитерный ток, как следует из (2) отличается от нуля. Обычно при работе транзистора в режиме усиления $| V_{кб} | > 2,3k * T / q$, но тогда $p(W) = -pn$, а $p = pn$. Таким образом, в рассматриваемой ситуации в базе транзистора существует градиент концентрации дырок и $I_{э}$ не равно 0. Для компенсации этого тока на эмитерный переход необходимо подать смещение в запиорном направлении (рис. 2, кривая 2).

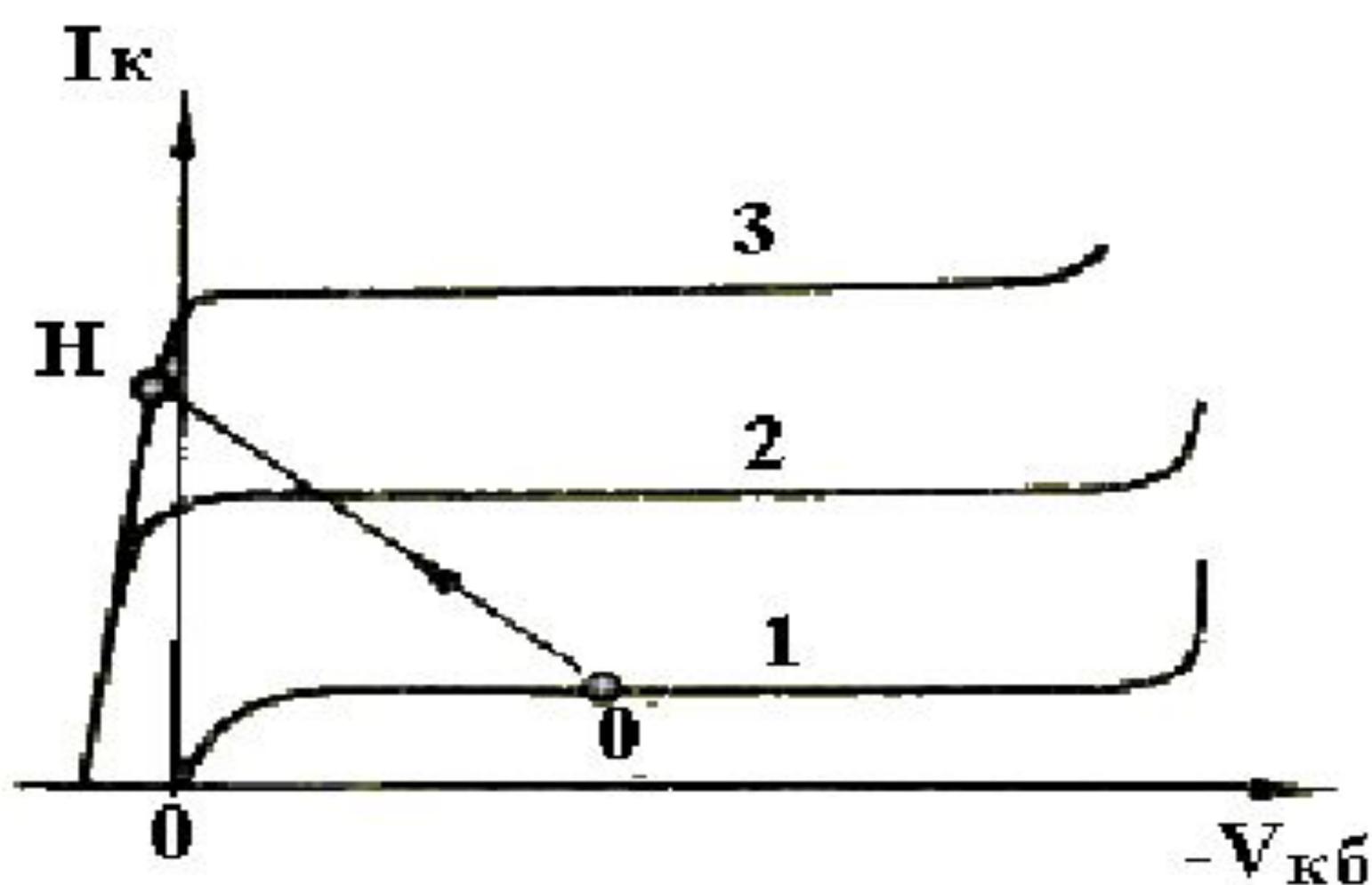


Рис. 3 Выходные хар-ки
 р-п-р транзистора, включенного
 по схеме общей базой:

1 - $I_3 = 0$; 2 - $I_3 = I_1$;

3 - $I_3 = I_2 = I_1$

- все выходные характеристики при $I_{\text{Э}}$ не равному 0 начинаются в области положительных значений $V_{\text{кб}}$ (рис. 3, кривые 2 и 3). Поскольку $a_0 \sim 1$, $I_{\text{к0}} \ll I_{\text{Э}} \ll i$, то из (5) видно, что $I_{\text{к}}$ $I_{\text{Э}}$ и фактически не зависит от $V_{\text{кб}}$ 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 $I_{\text{к}}$ от $V_{\text{кб}}$ (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 $V_{\text{кб}}$.

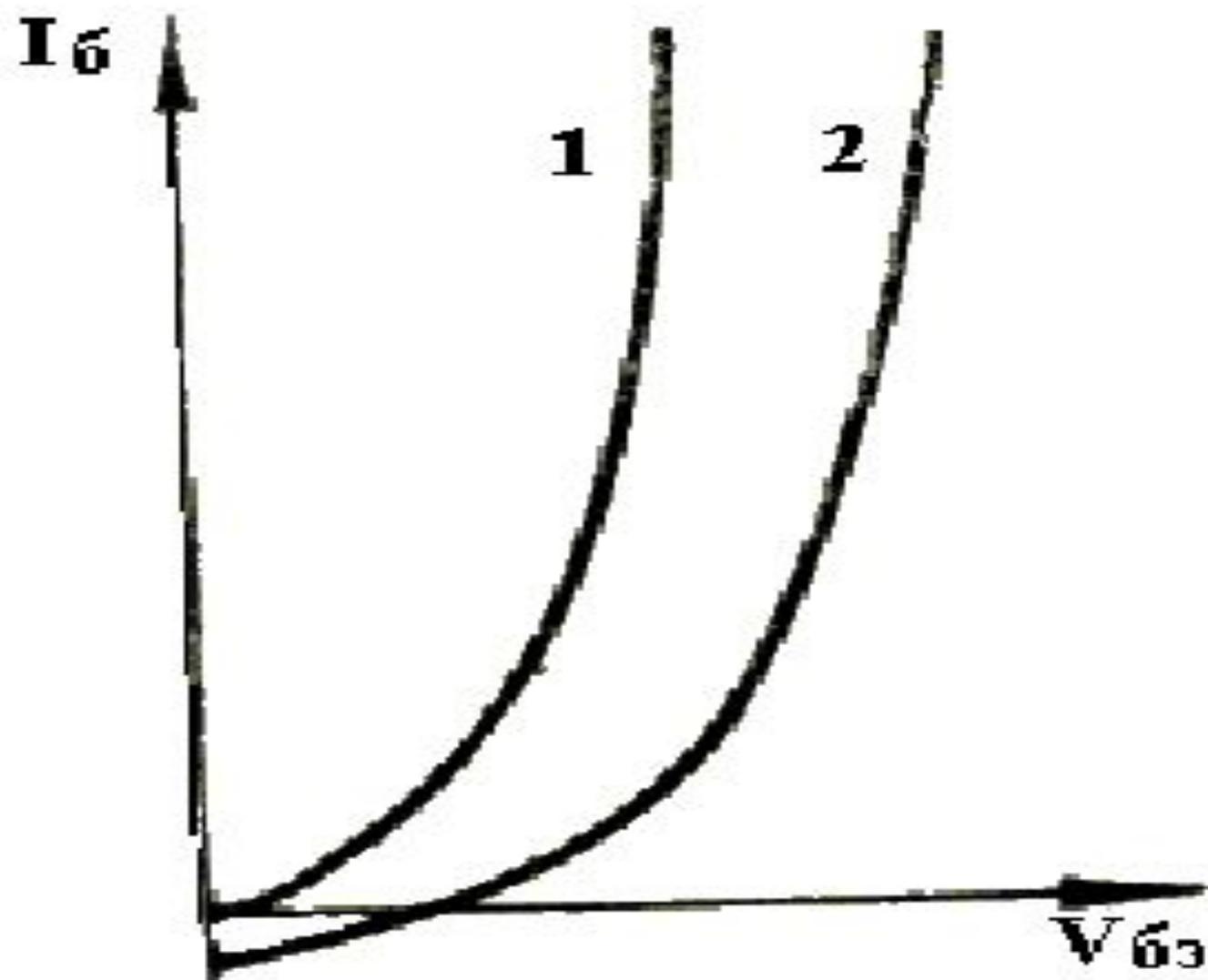


Рис. 5 Входные хар-ки р-п-п транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:
 1 - $V_{кэ} = 0$; 2 - $V_{кэ} < 0$

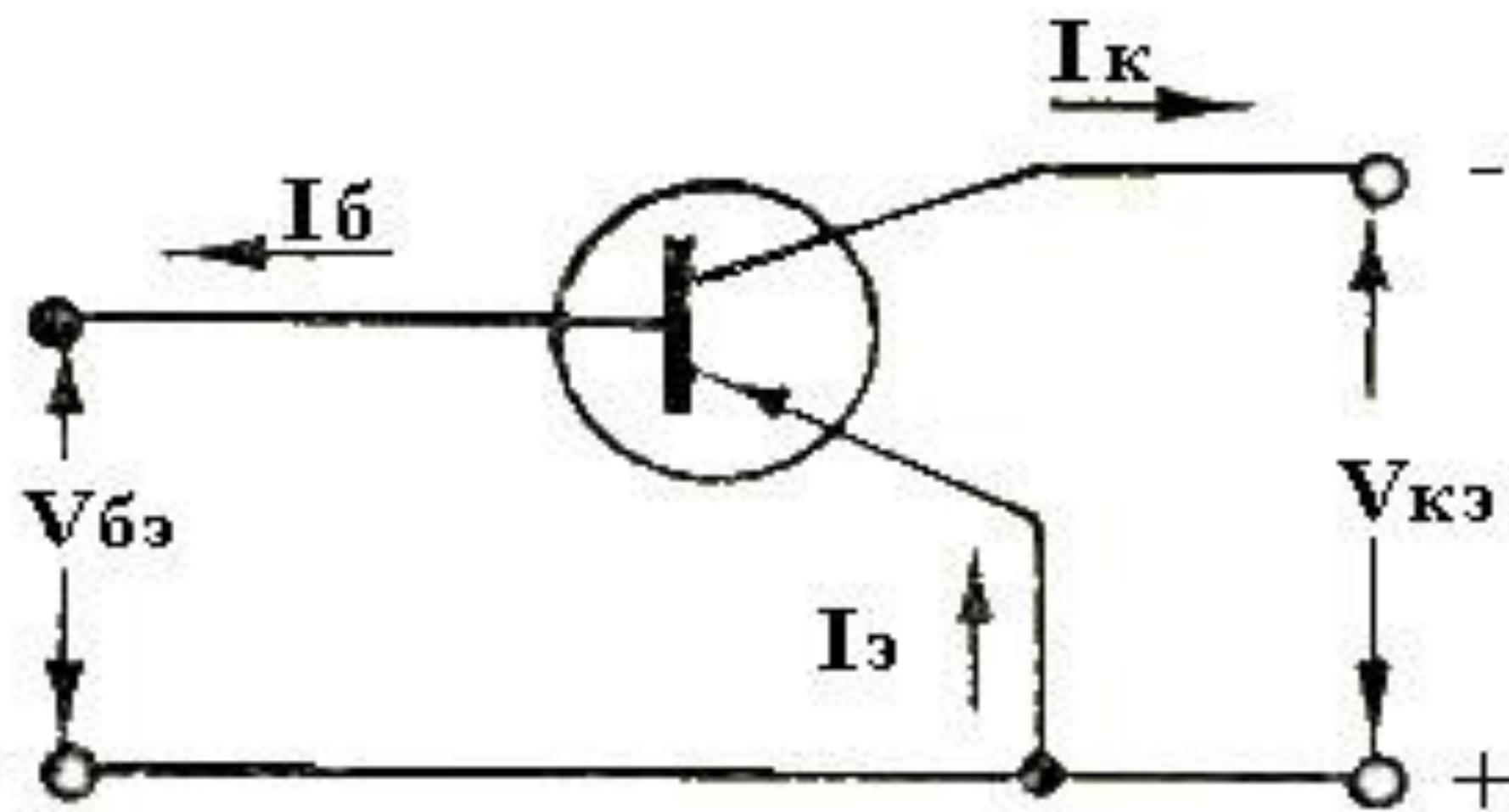


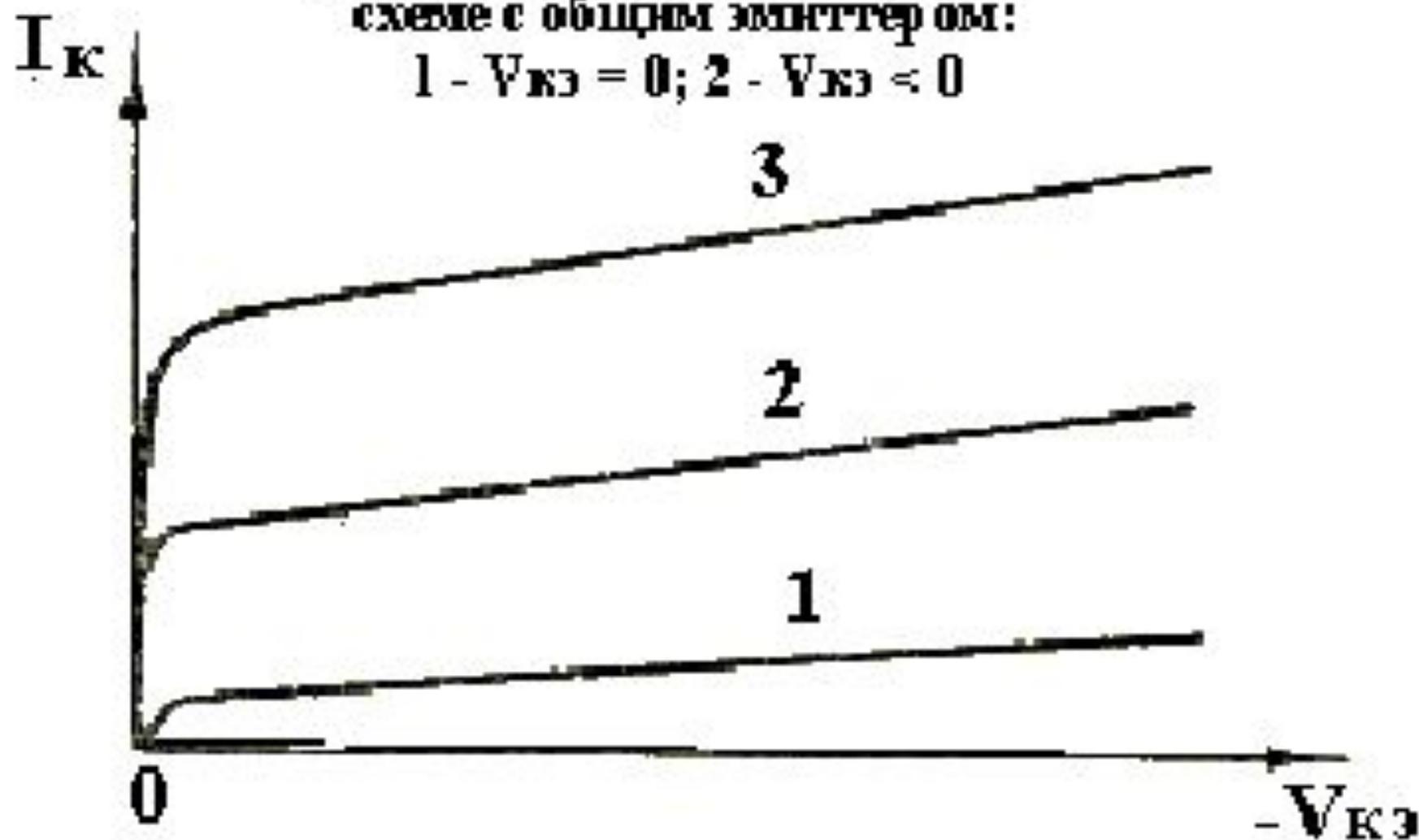
Рис. 4 Схема с
общим эмиттером

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 I_B от $V_{BЭ}$ при фиксированных значениях $V_{КЭ}$
- Если $V_{КЭ}=0$, то входная характеристика должна изображаться кривой, выходящей из начала координат (рис. 5, кривая 1), так как при $V_{BЭ} = 0$ $V_{БК}$ и $I_{К0}$ также равны нулю. При $V_{КЭ} < 0$ и $V_{BЭ} = 0$ коллектор должен быть смещен в запиорном направлении. Тогда при $V_{BЭ} = 0$ $I_B = - I_{К0}$, то есть начало входной характеристики располагается в области отрицательных значений тока (рис. 5, кривая 2). В целом ход зависимости I_B от $V_{BЭ}$ определяется эмиттерным током ($I_Э \exp(q * V_{BЭ} / k * T) - 1$), и по своей форме входные характеристики подобны вольтамперной характеристике p-n-перехода, смещенного в пропускном направлении.

Рис. 7 Выходные хар-ки р-п-р-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 $V_{кб}$ в области малых значений $V_{кэ}$ положительно, затем переходит через нуль, меняет знак на противоположный и непрерывно увеличивается. По мере увеличения $V_{кб}$, за счет расширения ООЗ коллекторного перехода уменьшается ширина базы транзистора и, следовательно, увеличивается a_0 . Это приводит к существенному росту V_0 [см. (6)] и I_k [см. (8)] при увеличении $V_{кэ}$

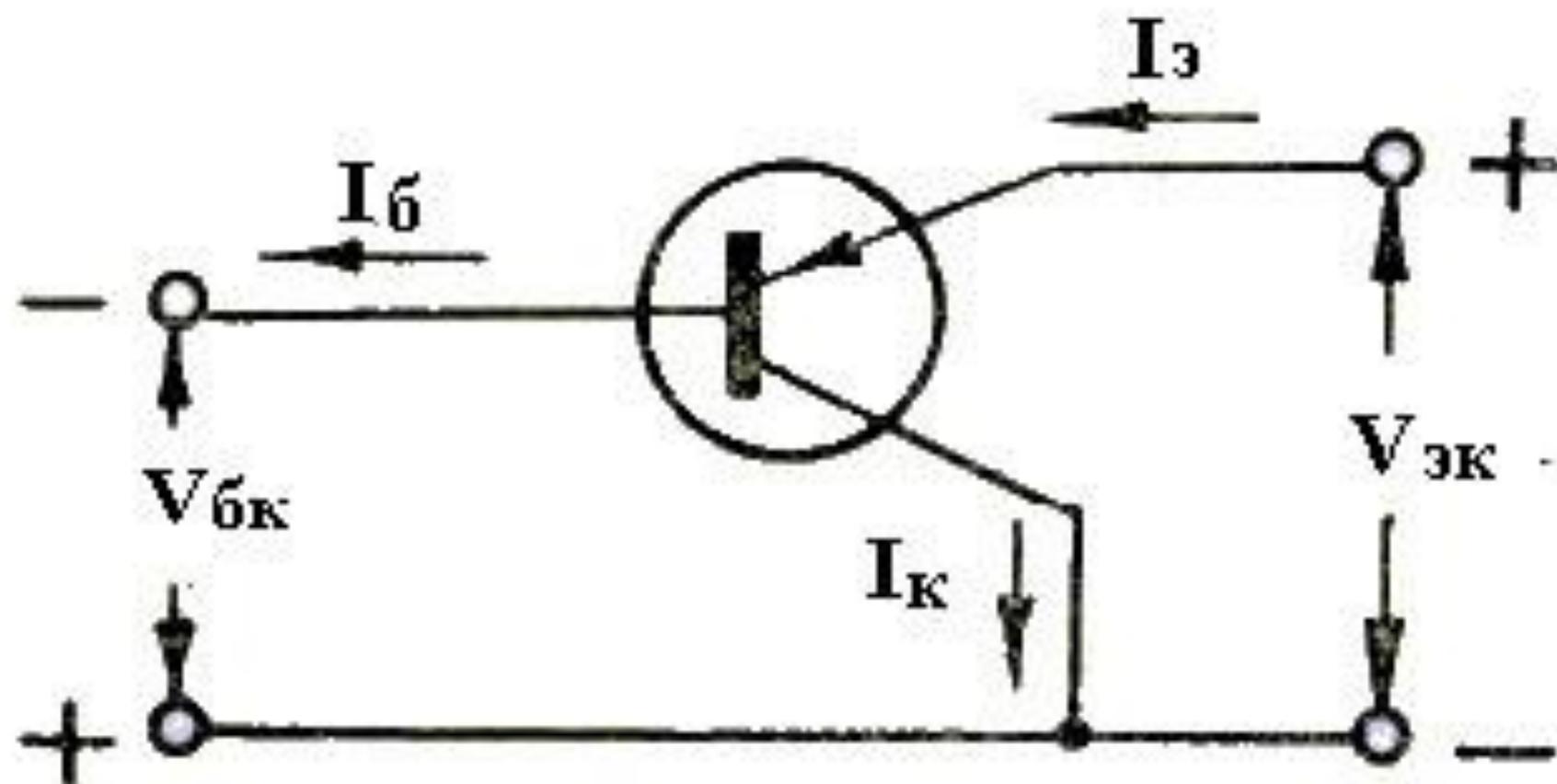
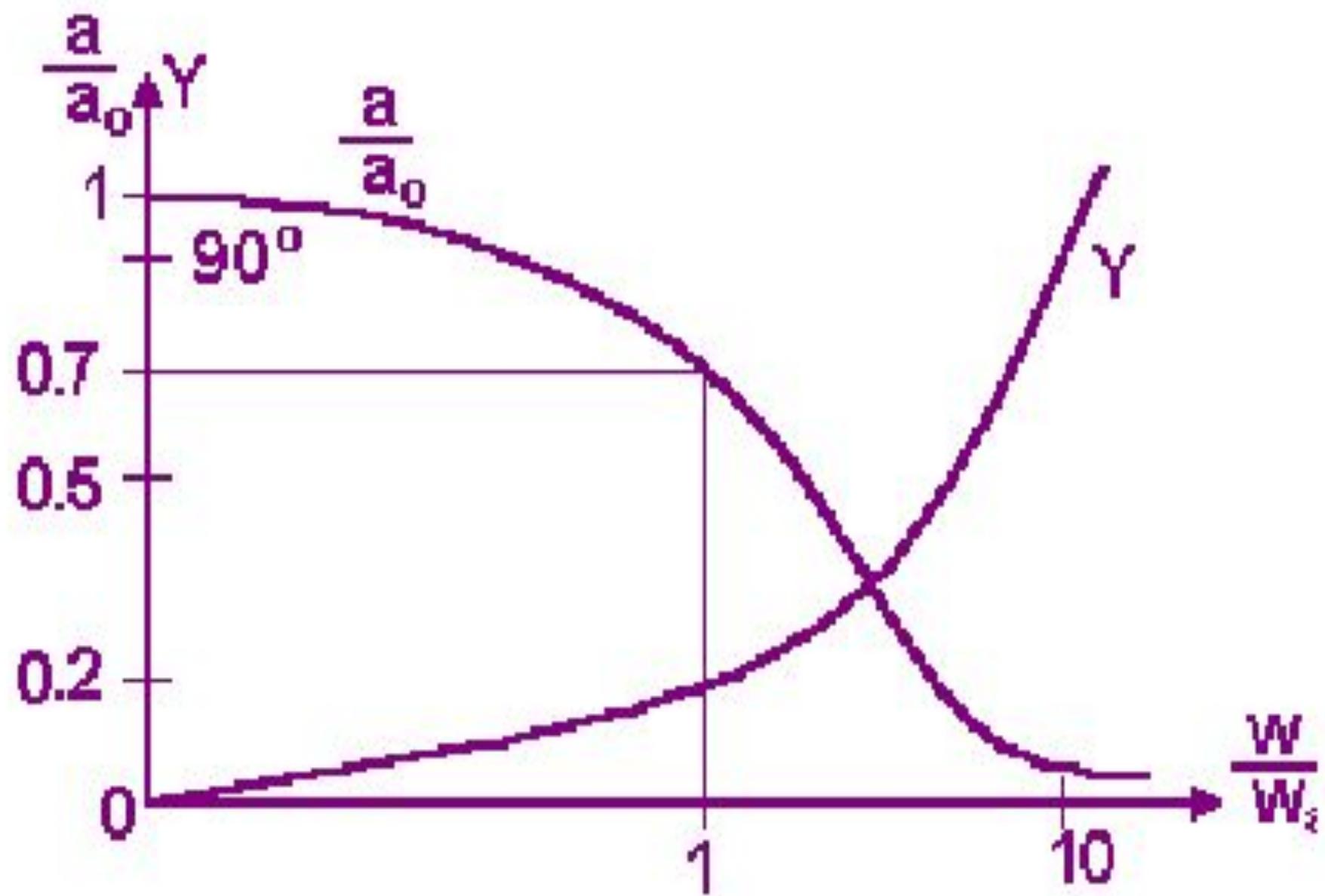


Рис. 7 Схема с
общим коллектором

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 $\alpha_0 \sim 1$, то $\beta_0^* \gg 1$. 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.



Работа на высокой частоте.

- Чтобы охарактеризовать частотные свойства транзистора широко используются частотные характеристики; представляющие собой зависимость модуля коэффициента передачи a от частоты ($AЧХ$) 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 .



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 i_1, u_1, i_2, u_2 , 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.