

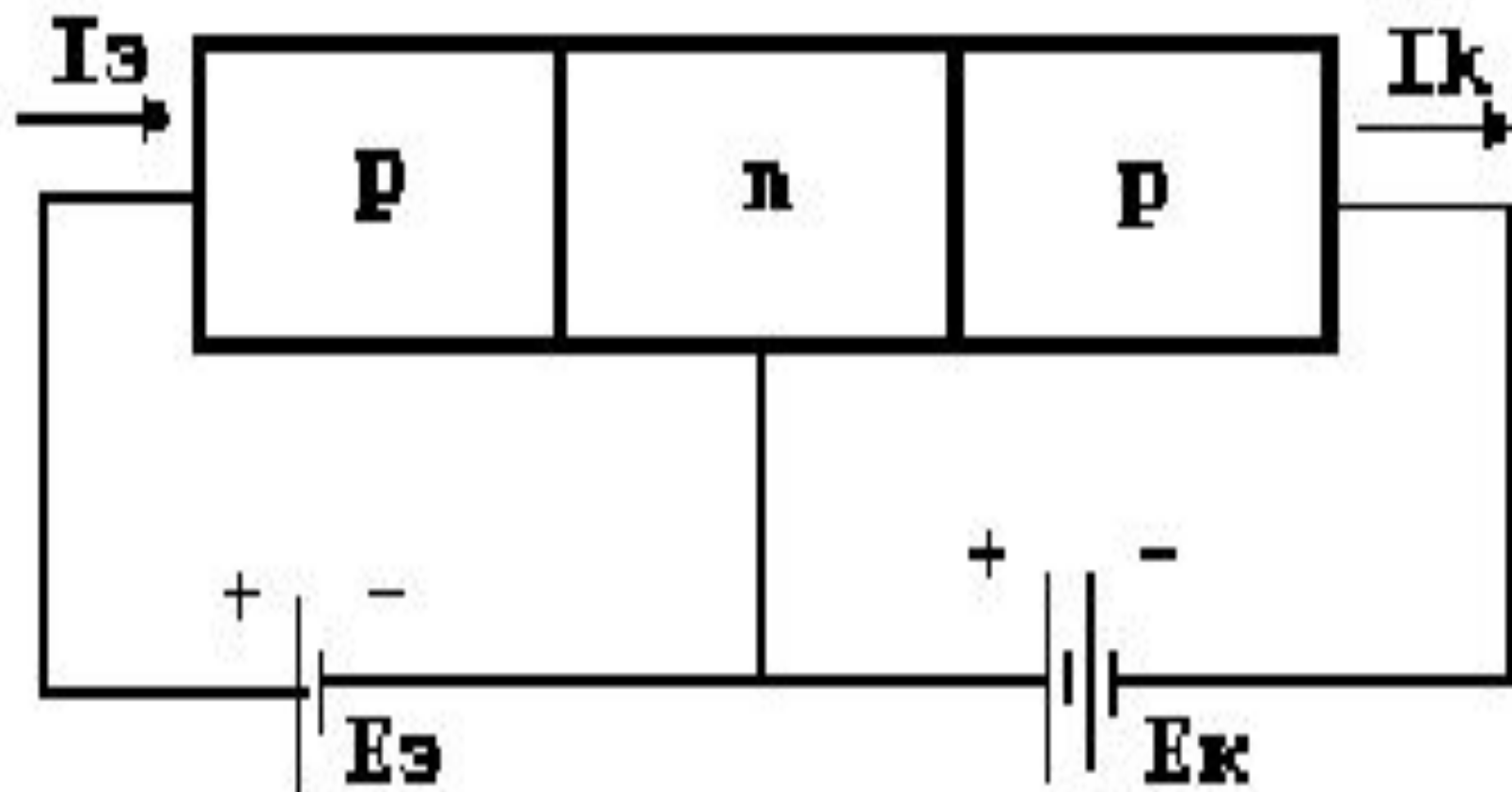
# Биполярные транзисторы

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

э

б

к

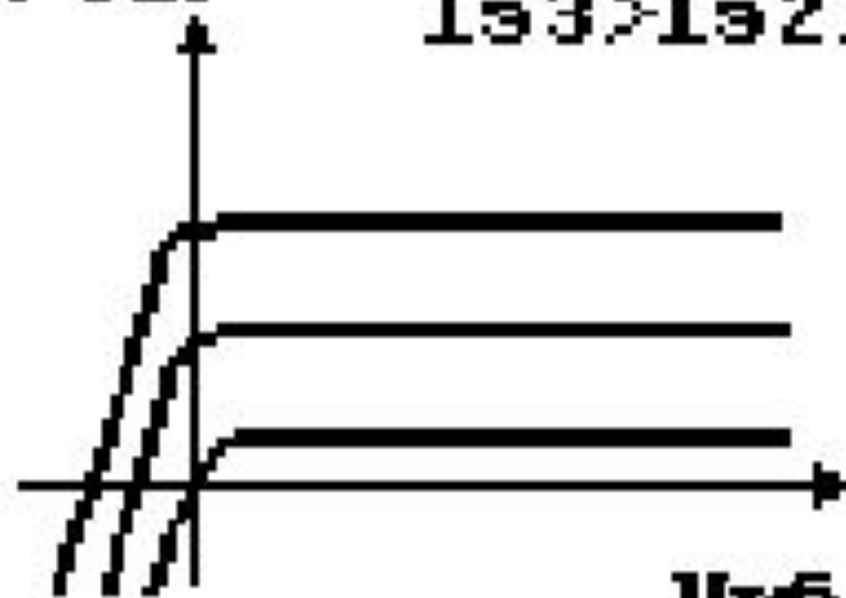


# Принцип работы

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<sub>кбо</sub>***. 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.

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

$I_k$  mA



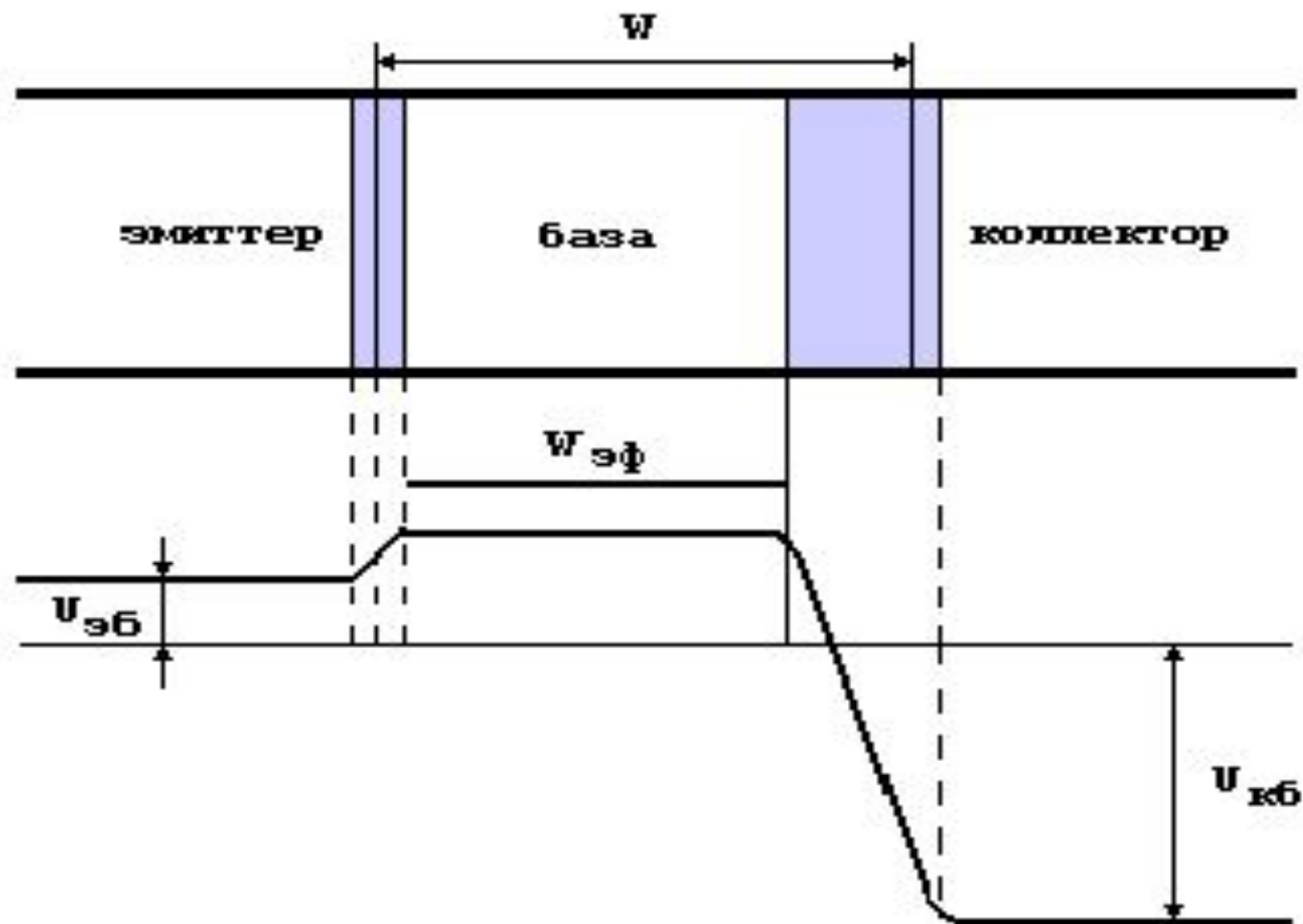
$I_{\text{э}3}$

$I_{\text{э}2}$

$I_{\text{э}1}$

$U_{кб}$  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

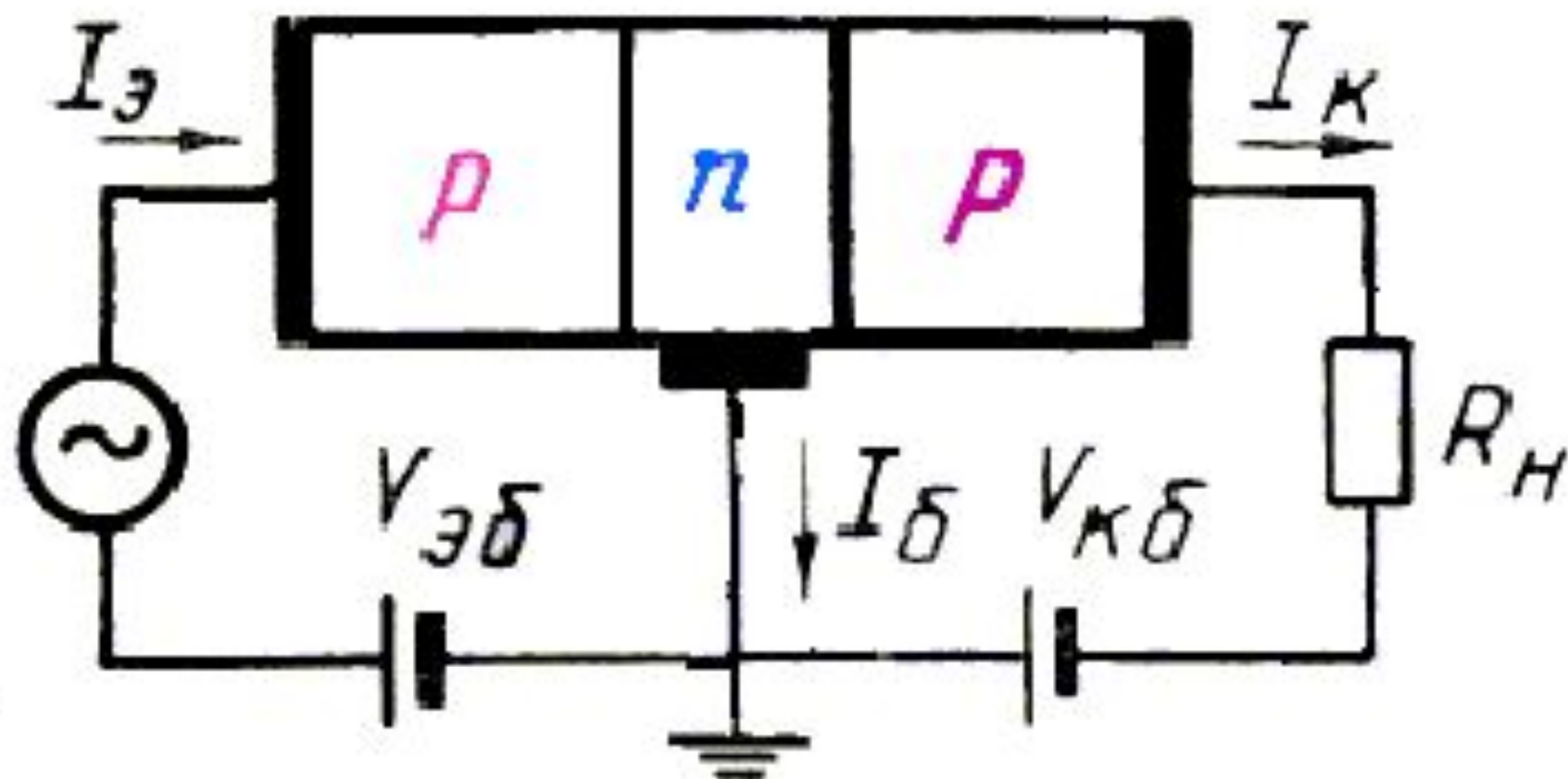


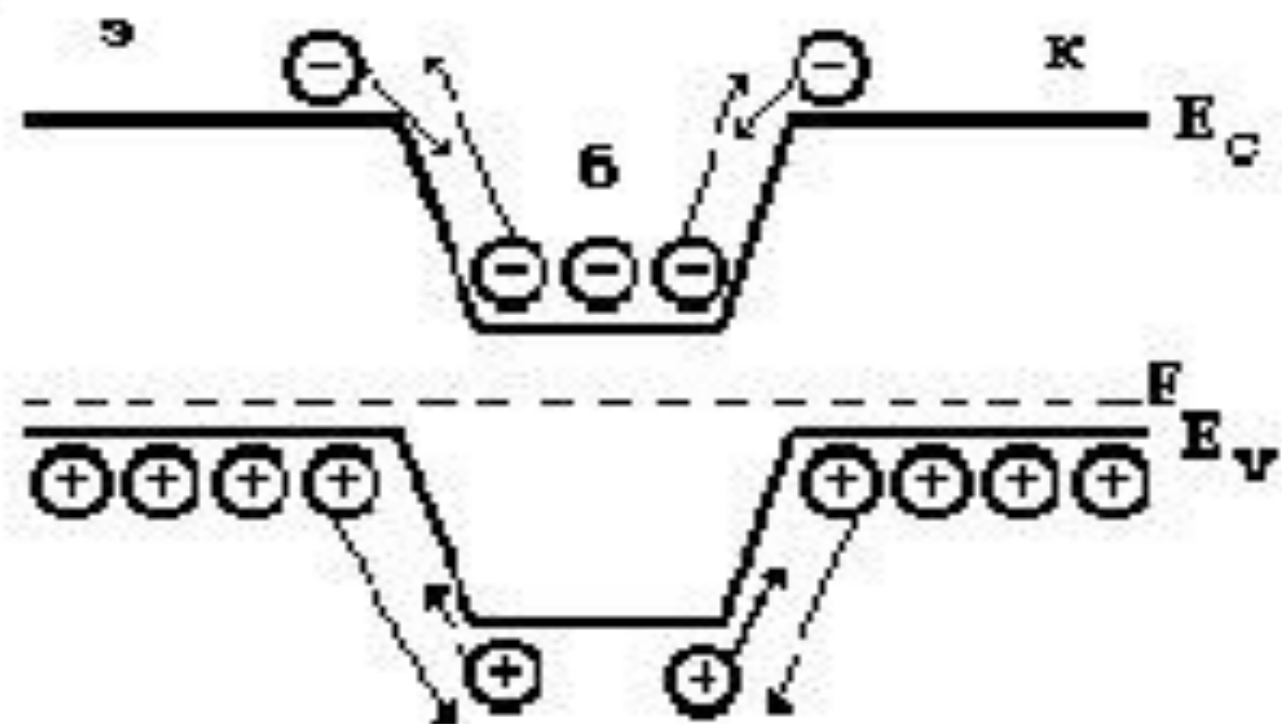
Рис. 1. Биполярный р-п-р транзистор, включенный по схеме с общей базой



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

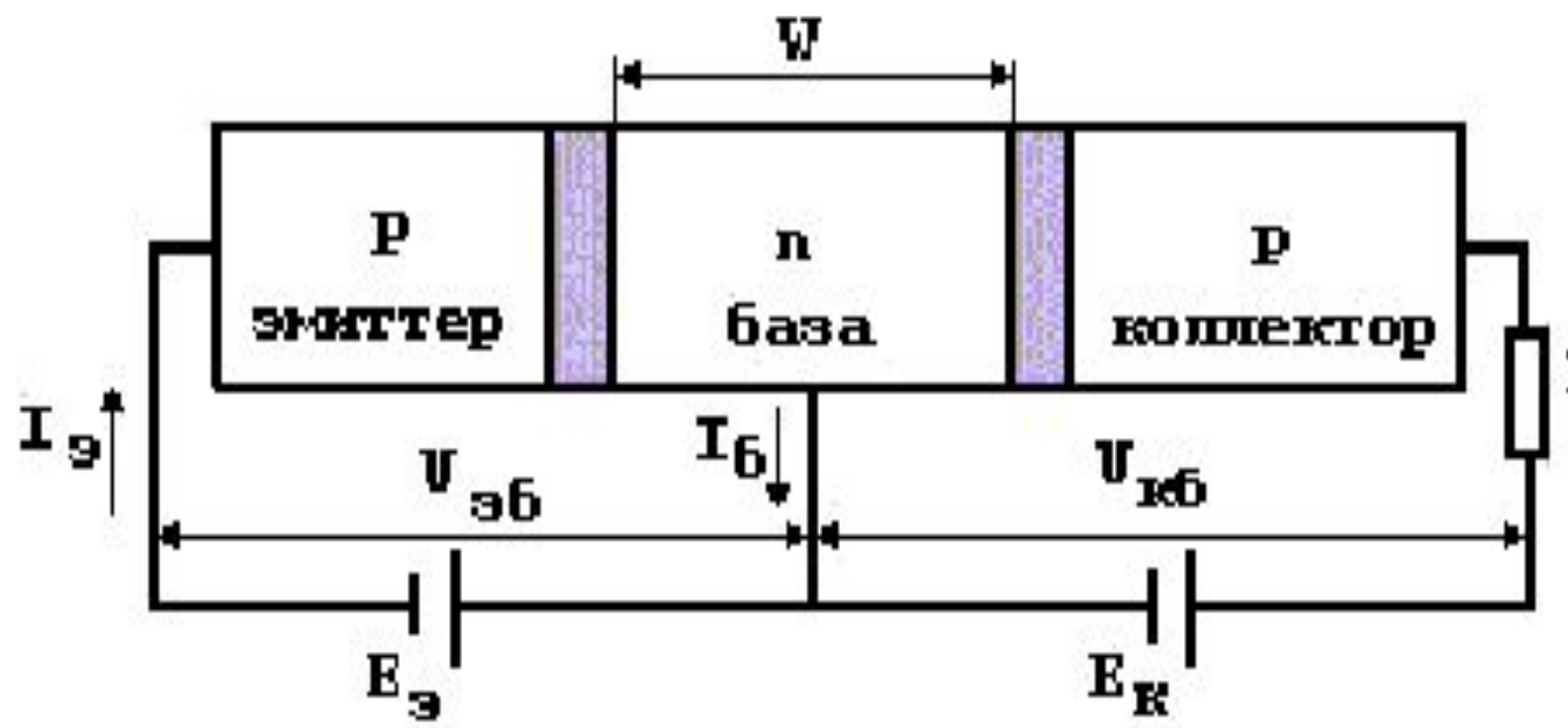
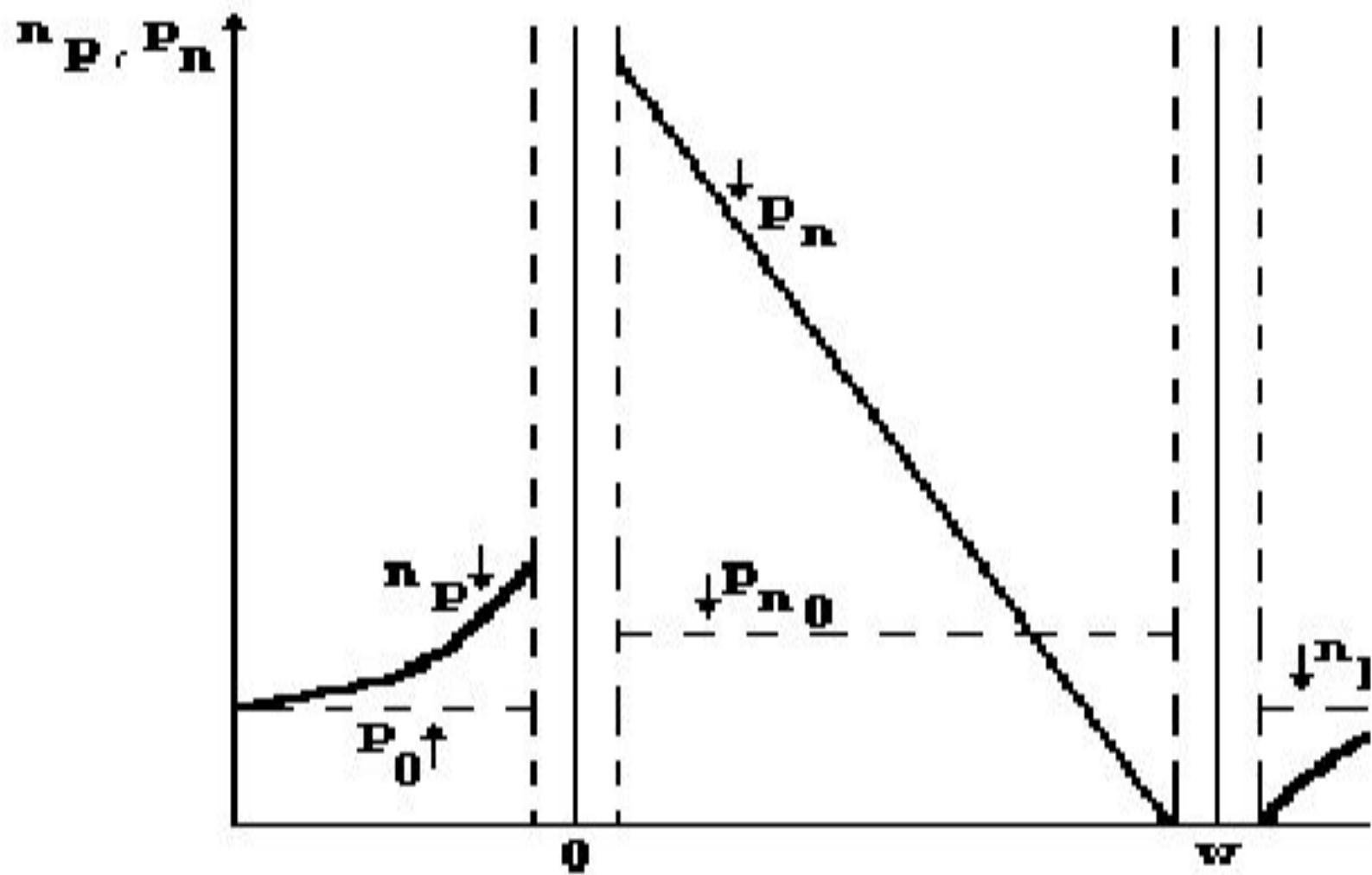


рис. 1

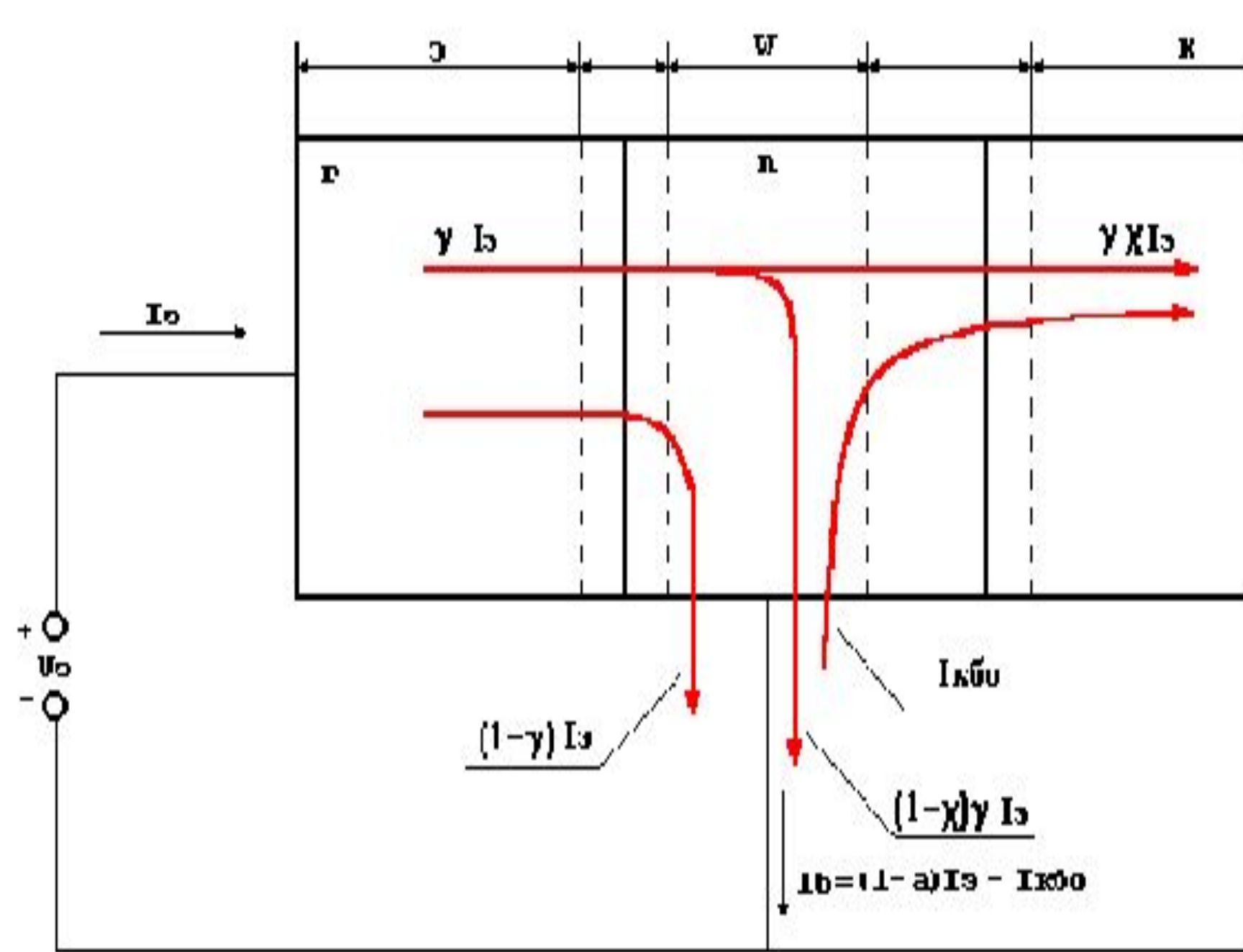


- В рабочем режиме на переходы транзистора подаются постоянные напряжения  $U_{эб}$  и  $U_{кб}$ , которые создаются источниками э.д.с.  $E_э$  и  $E_к$  в эмиттерной и коллекторных цепях.
- При подаче на эмиттерный переход прямого напряжения смещения  $U_{эб}$  потенциальный барьер этого перехода уменьшается 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.



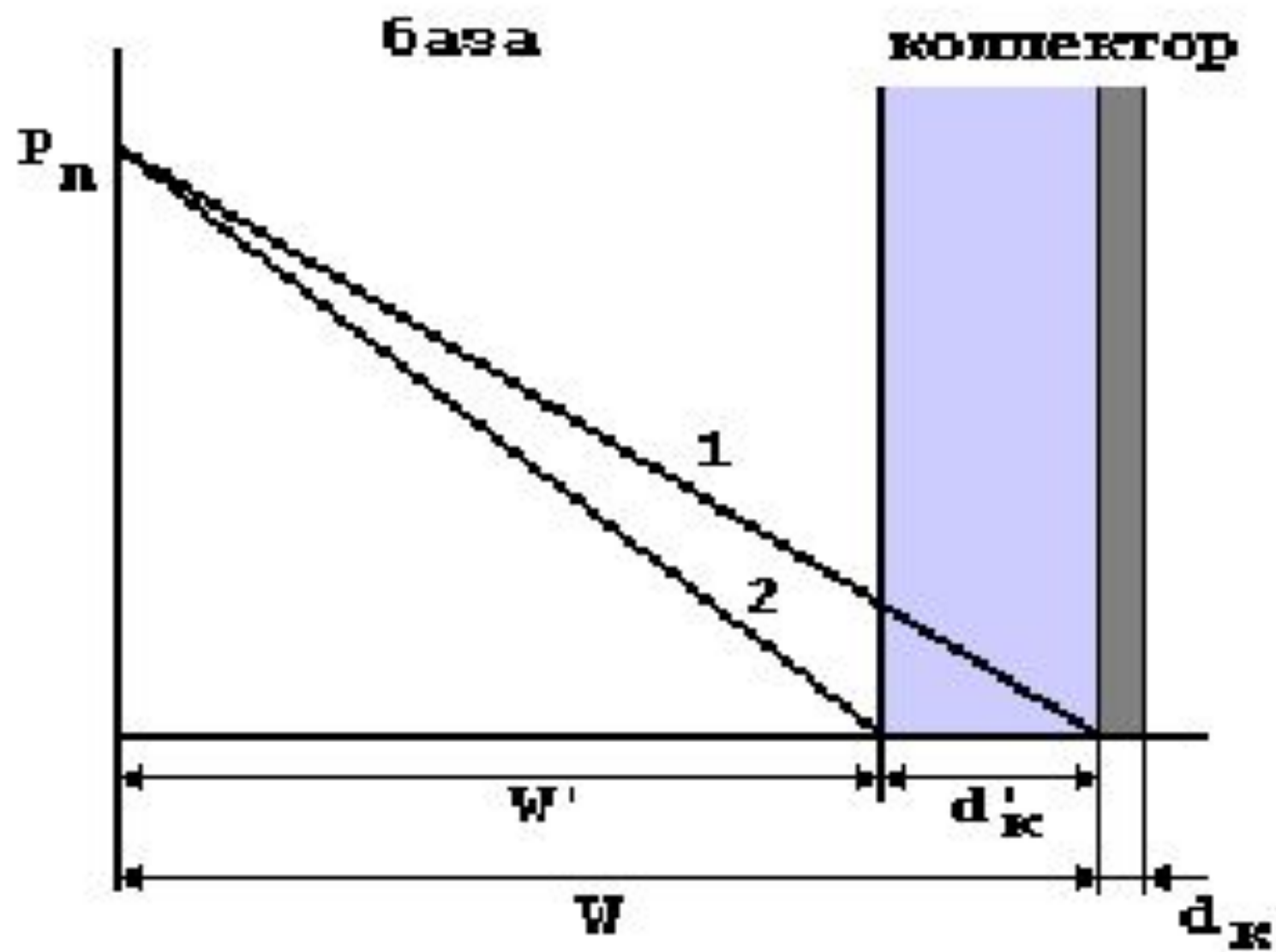


- распределение носителей  $P_n$ , инжектированных эмиттером в базу, изменяется по линейному закону .
- Следует отметить, что реальное распределение носителей несколько отличается от линейного закона, что объясняется процессом рекомбинации некоторого числа дырок с электронами. На *рис.2* индексом "0" 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

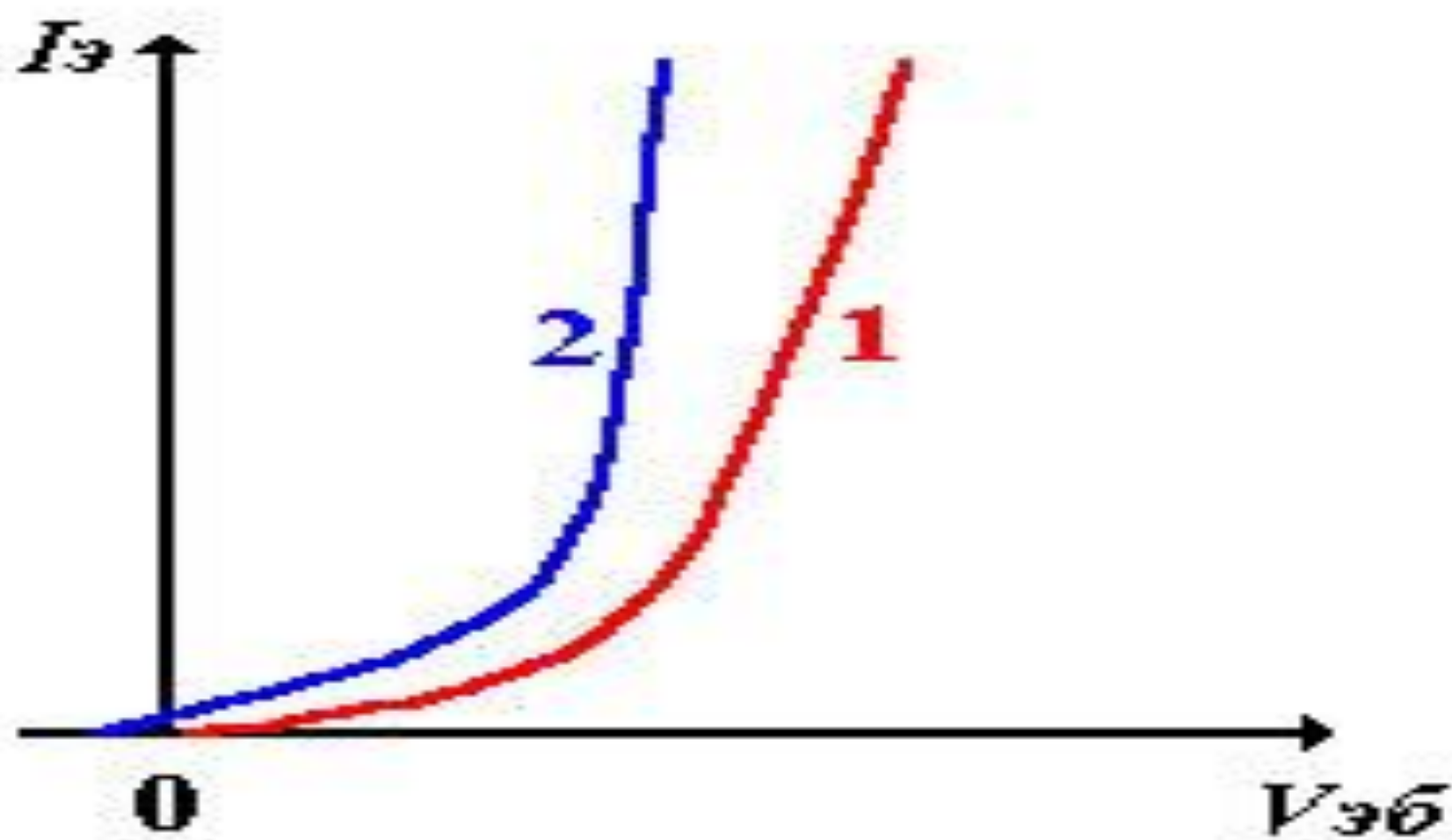
- В результате снижения потенциального барьера на эмиттерном переходе из эмиттера в базу начинается диффузионное движение основных носителей. Так как дырок(электронов) в эмиттере (базе) много больше, чем в базе(эмиттере), то коэффициент инжекции весьма высок. Концентрация дырок в базе увеличивается. 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.



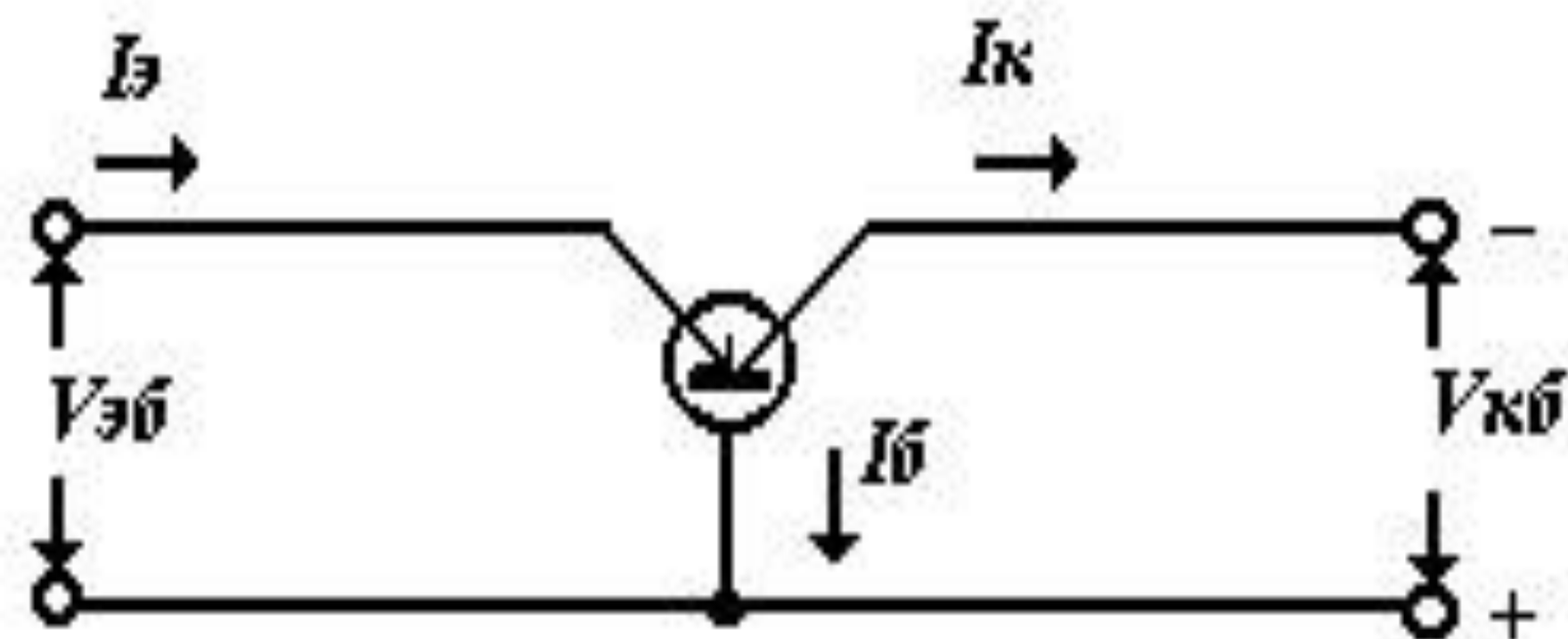


# Схема замещения транзистора и ее параметры

- 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).

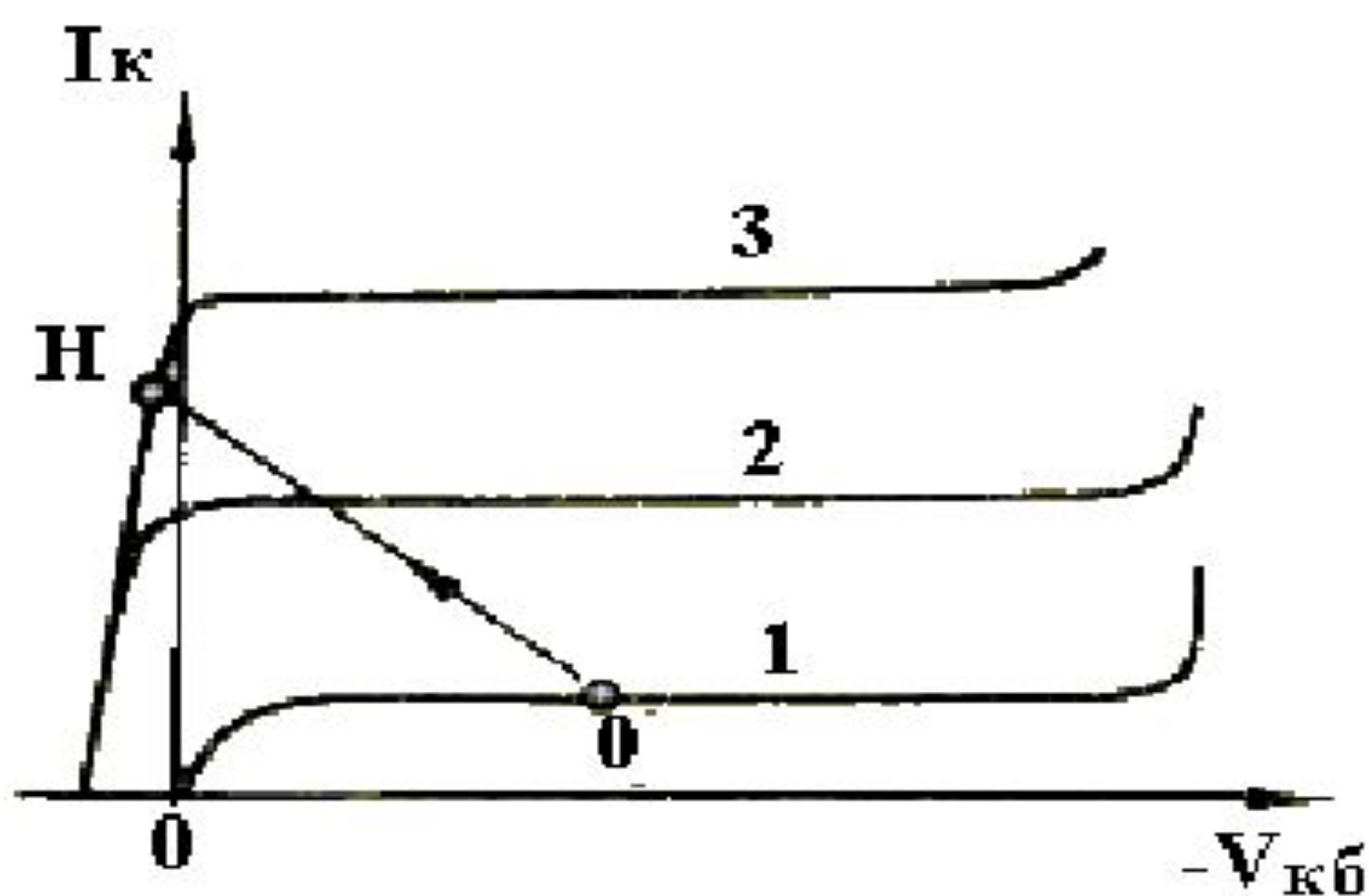


Рис. 3 Выходные хар-ки  
 р-п-р транзистора, включенного  
 по схеме общей базой:

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  $I_{\text{к}}$  при  $I_{\text{Э}}$  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  $V_{\text{кб}}$ .

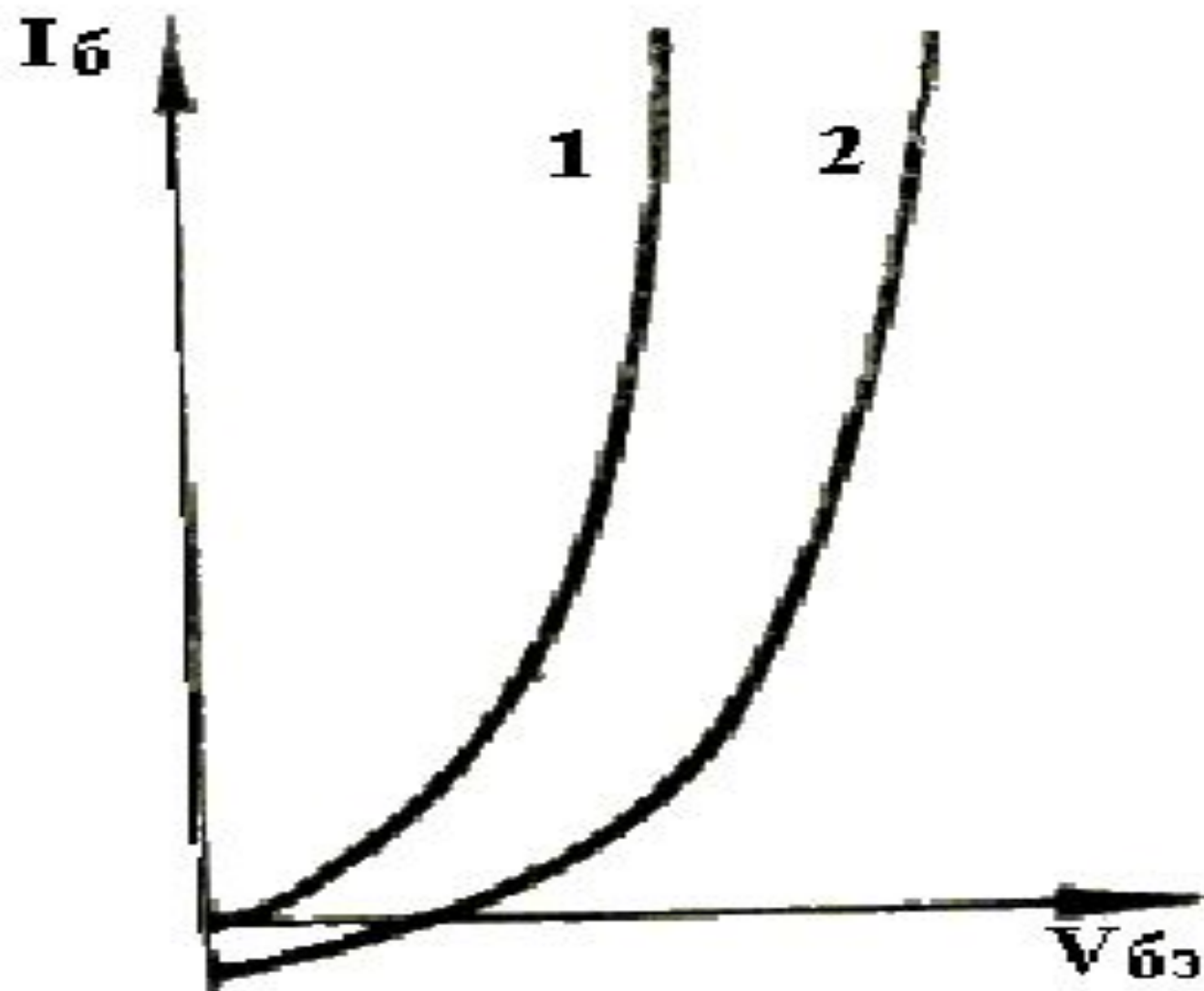


Рис. 5 Входные хар-ки р-п-п транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:  
 1 -  $V_{кэ} = 0$ ; 2 -  $V_{кэ} < 0$

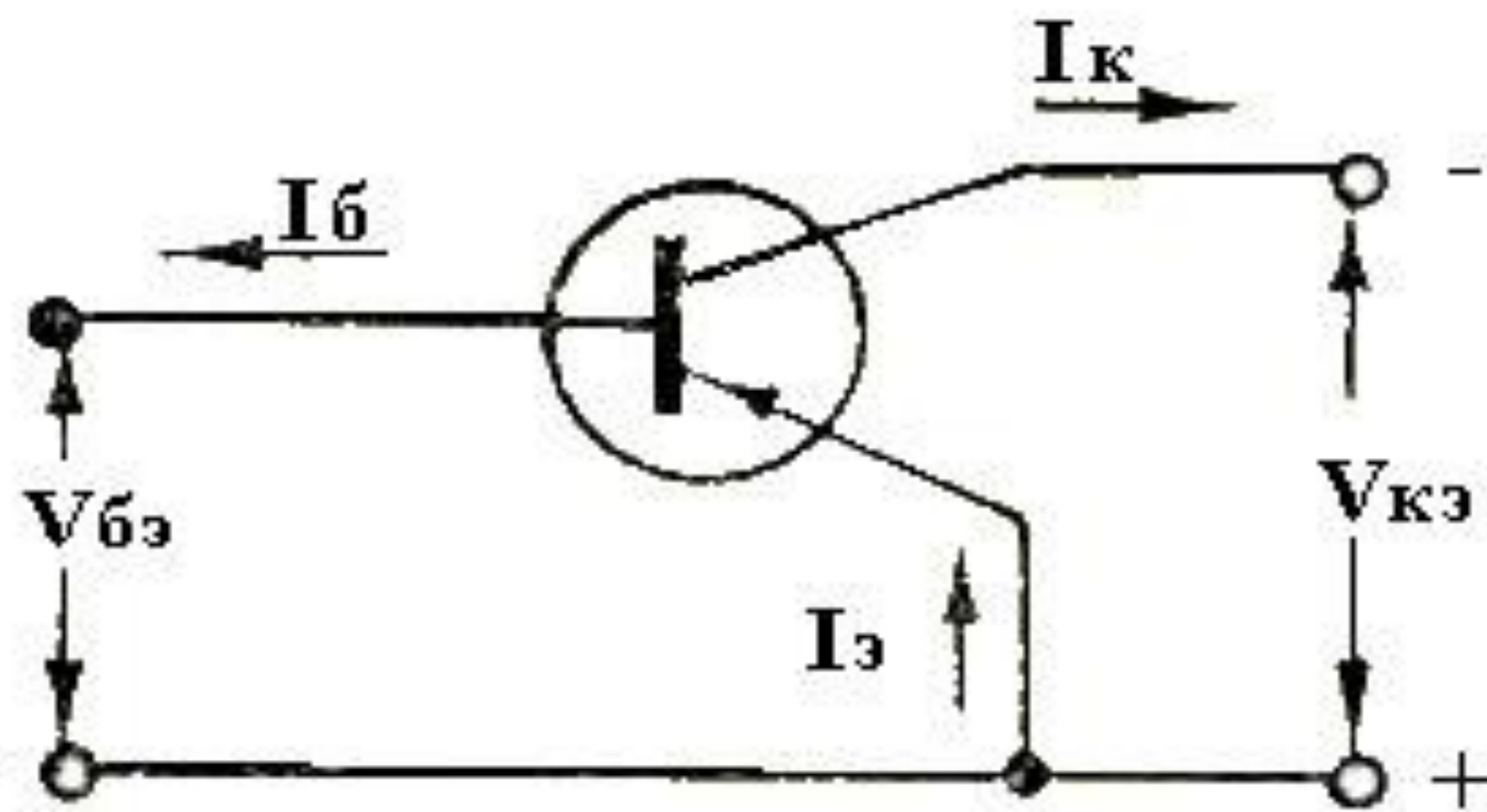


Рис. 4 Схема с  
общим эмиттером

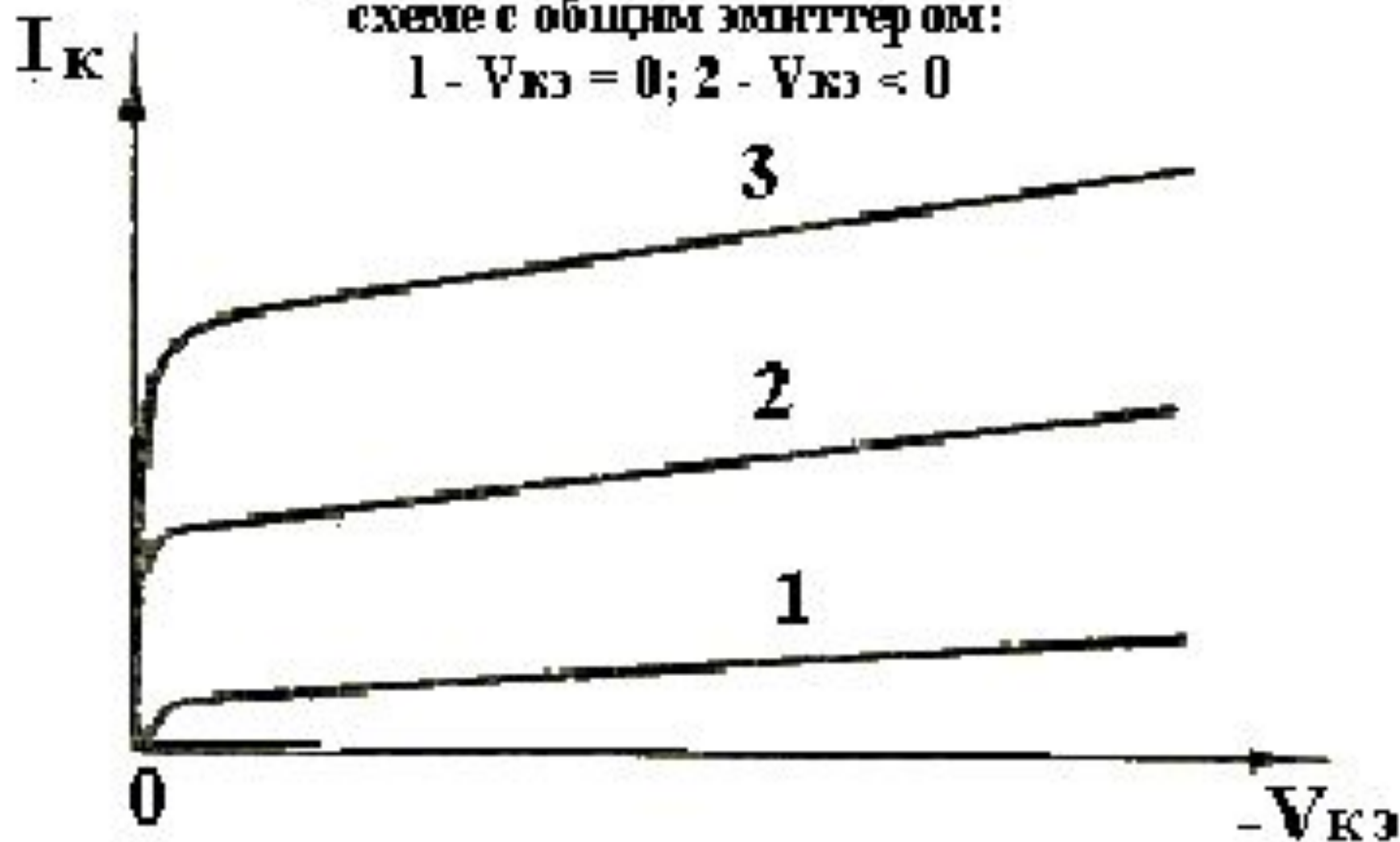
# Схема с общим эмиттером

- 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  $V_{KЭ}$
- Если  $V_{KЭ}=0$ , то входная характеристика должна изображаться кривой, выходящей из начала координат (рис. 5, кривая 1), так как при  $V_{BЭ} = 0$   $V_{BK}$  и  $I_{K0}$  также равны нулю. При  $V_{KЭ} < 0$  и  $V_{BЭ} = 0$  коллектор должен быть смещен в запиорном направлении. Тогда при  $V_{BЭ} = 0$   $I_B = - I_{K0}$ , 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  $V_{кэ}$

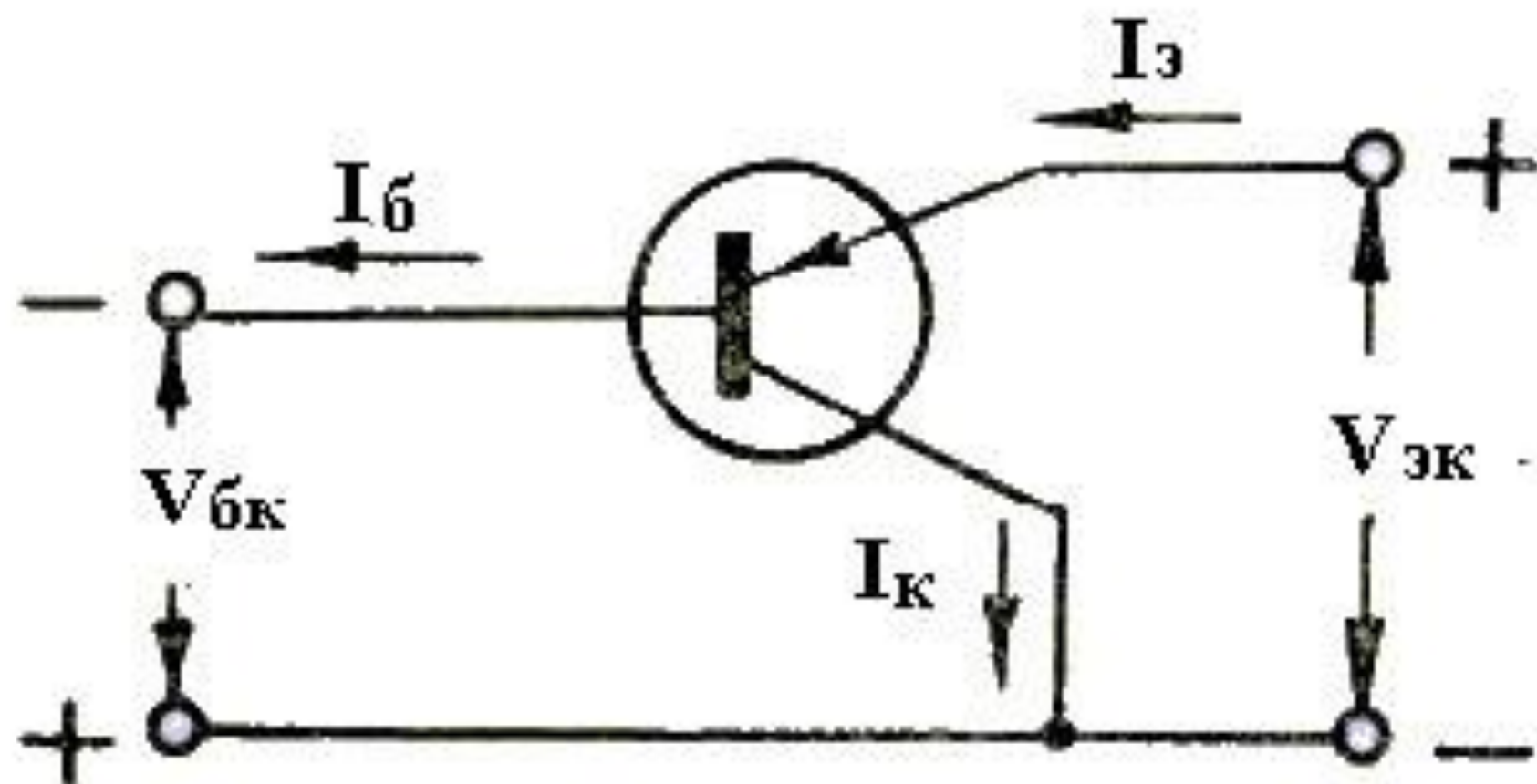
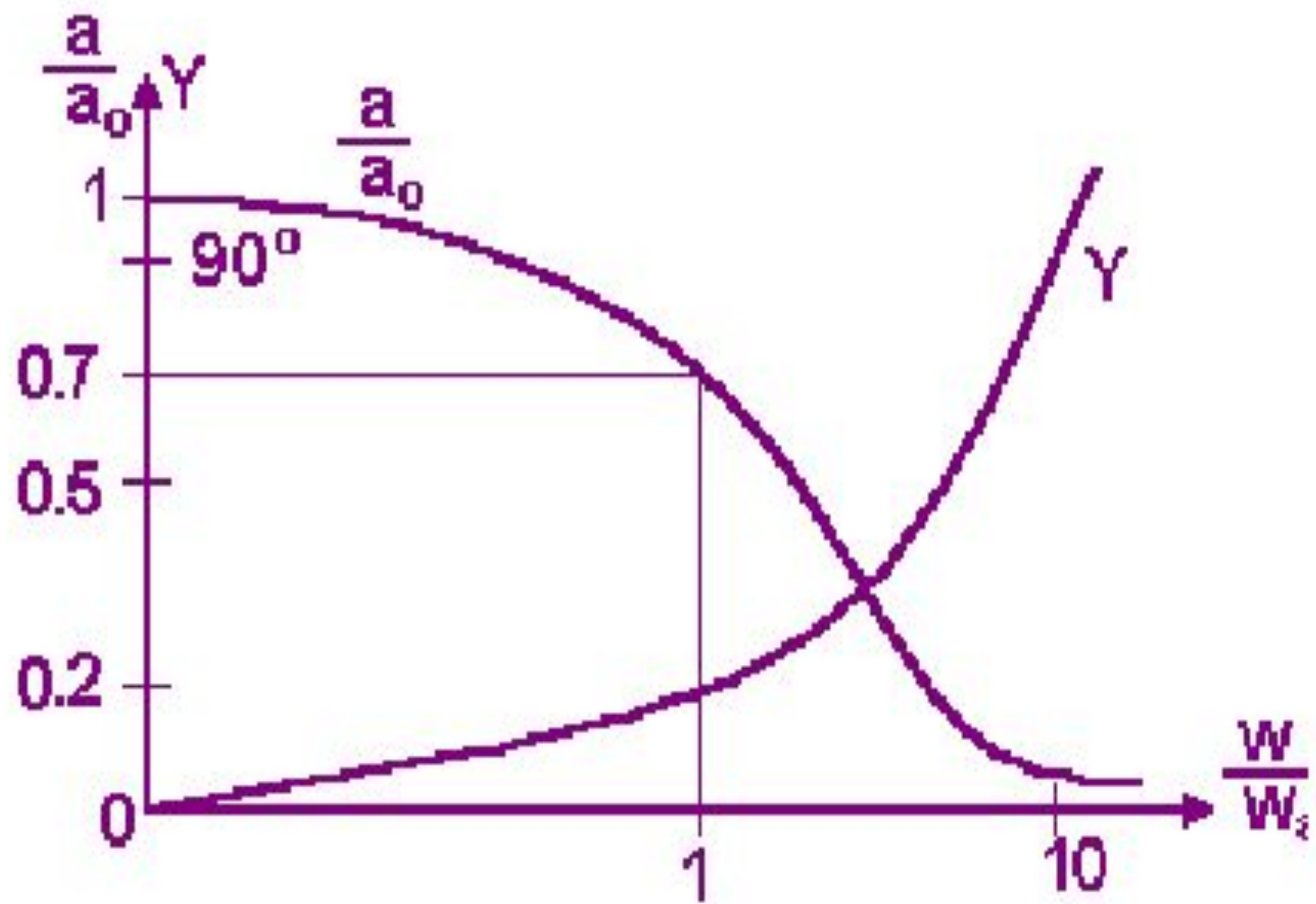


Рис. 7 Схема с  
общим коллектором

# 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.