

# Тема 7. Биполярные транзисторы

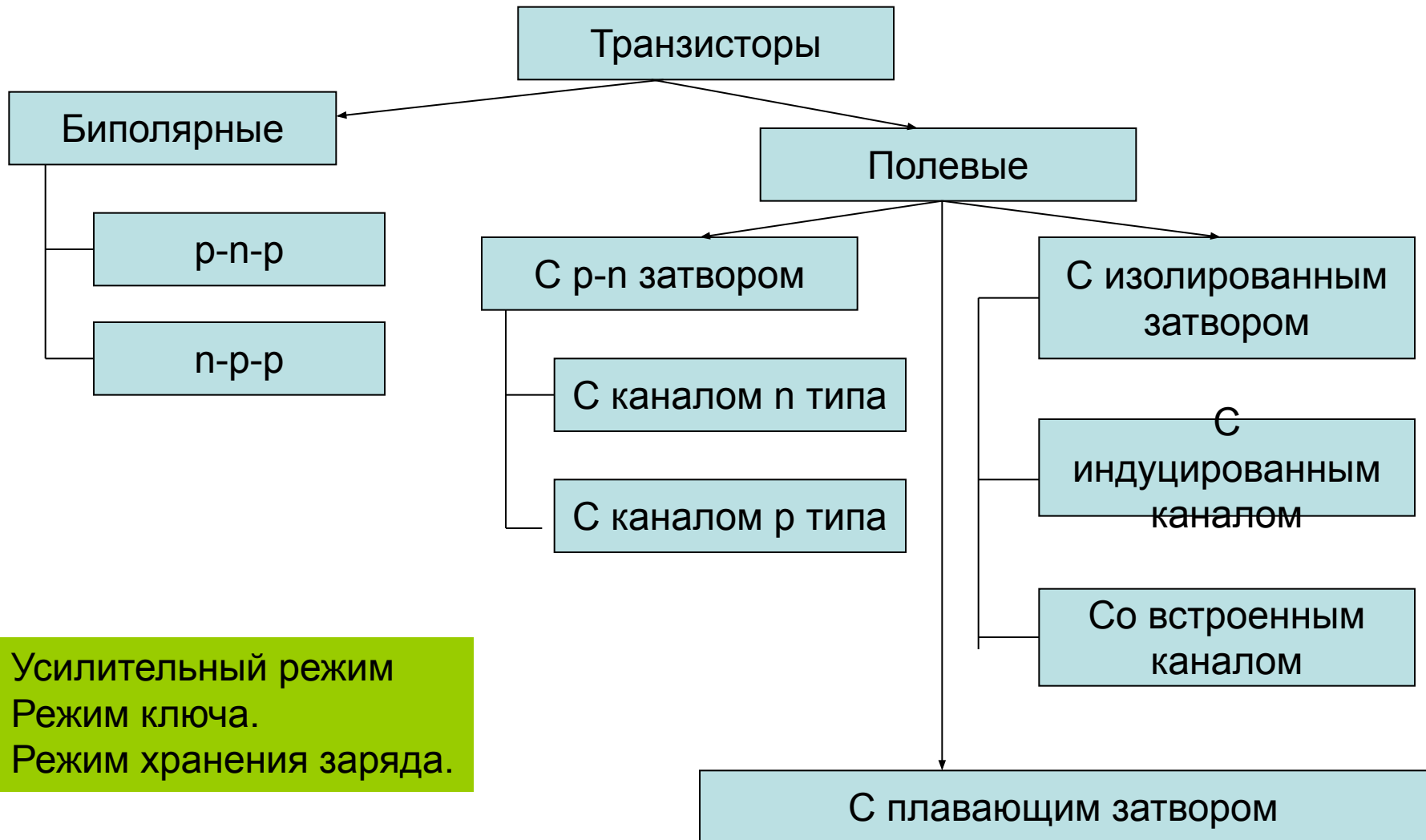
Цель лекции: транзисторы р-п-р, п-р-п  
типа; характеристики; режимы работы;  
транзисторный переключатель;  
эмиттерный повторитель

# Изобретатели действующей модели транзистора



В 1947 году Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн в лабораториях Bell Labs впервые создали действующий биполярный транзистор

# Классификация транзисторов



Усилительный режим  
Режим ключа.  
Режим хранения заряда.

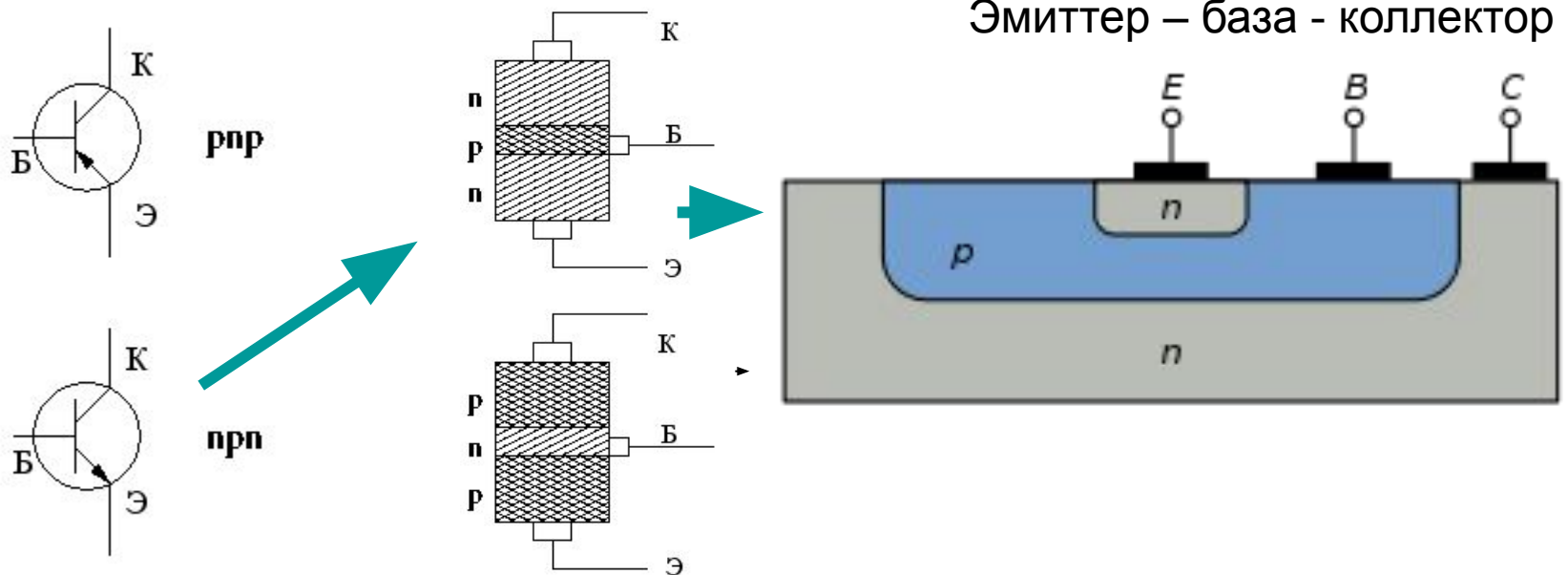
# Классификация транзисторов по мощности и частоте

- *Маломощные транзисторы* до 100 мВт
- *Транзисторы средней мощности* от 0,1 до 1 Вт
- *Мощные транзисторы* (больше 1 Вт).
- Низкочастотные – до 3 МГц,
- Среднечастотные – от 3 до 30 МГц,
- Высокочастотные – от 30 до 300 МГц,
- Сверхвысокочастотные – более 300 МГц.



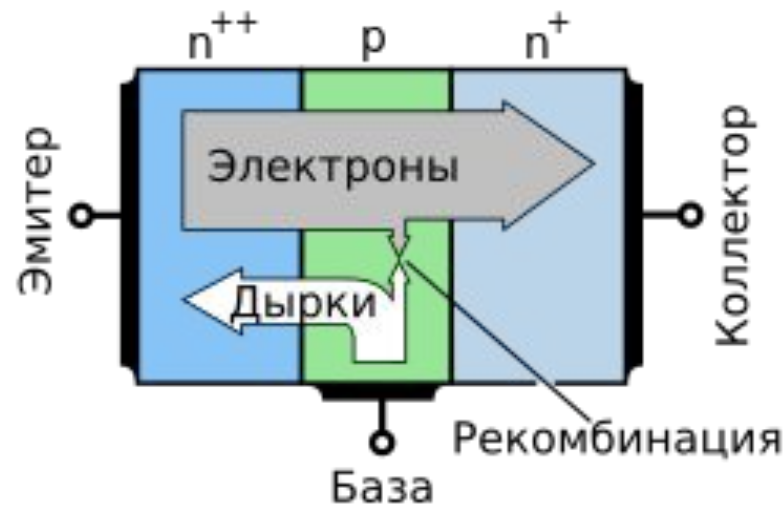
# Биполярный транзистор

- Полупроводниковый прибор с двумя р-п переходами. Биполярный, так как использует два типа носителей дырки и электроны.



# ВАЖНО

- Уникальность транзистора состоит в том, что этот элемент способен усиливать сигнал по мощности.
- **ВОПРОС.** Трансформатор это усилительный элемент?
- **ВОПРОС.** Что является источником повышения мощности?



# Первая модель биполярного транзистора: усилитель тока

- Для транзистора n-p-n типа действуют следующие правила:
- 1. Коллектор имеет более положительный потенциал, чем эмиттер.
- 2. Цепи база-эмиттер и база коллектор работают как диоды. Обычно диод база эмиттер открыт, а диод база коллектор смещен в обратном направлении и ток через него не протекает.
- 3. Каждый транзистор характеризуется максимальными значениями: тока коллектора; тока базы и напряжения коллектор – эмиттер. **Превысил – убил транзистор.**



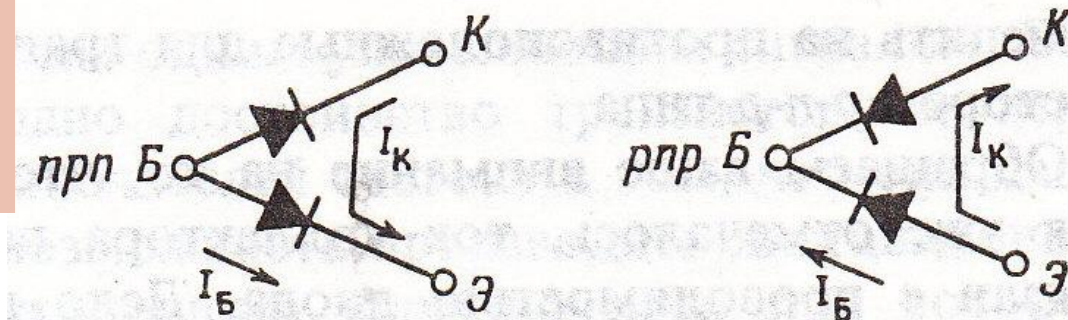
# Первая модель транзистора: усилитель тока

- 4. Если правила 1- 3 соблюдены, то ток в коллекторе прямо пропорционален току базы и можно записать соотношение:

$$I_{\text{к}} = h_{21э} I_{\text{б}} = \beta I_{\text{б}}$$

Коэффициент усиления по току

ЗАМЕЧАНИЕ: ток коллектора не связан с прямой проводимостью диода база-коллектор!!!  
Так работает транзистор



ВЫВОД: малый ток базы управляет большим током коллектора

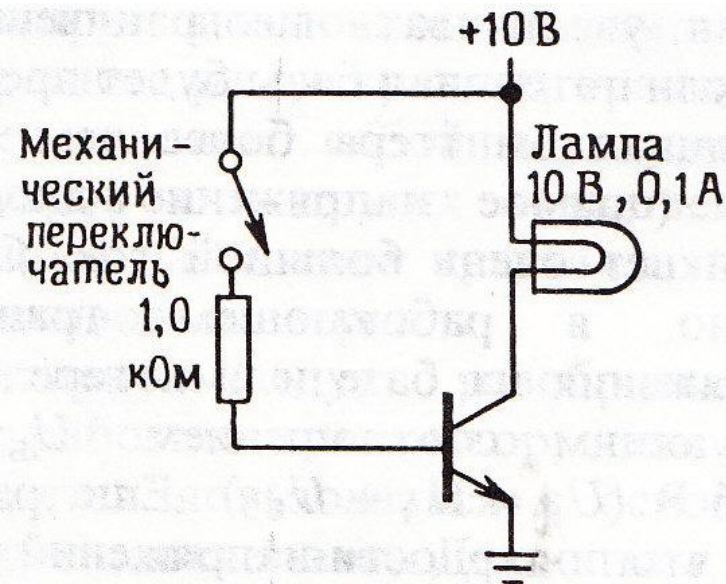
# Первая модель транзистора: усилитель тока

- **Рассмотрим правило 2.** Из него следует, что напряжение между базой и эмиттером нельзя увеличивать неограниченно, так как если потенциал базы будет превышать 0.6 В, то возникнет очень большой ток.
- Следовательно в работающем транзисторе напряжение на базе и эмиттере связаны соотношением:

$$U_{\text{б}} = U_{\text{э}} + 0.6\text{В} = U_{\text{э}} + U_{\text{бэ}}$$

# Транзисторный переключатель

- Эта схема с помощью небольшого управляющего тока может создать в другой схеме – лампе – ток значительно большей величины.



Для переключения достаточен ток 1 мА

- Переключатель разомкнут. Ток в базе нет. Нет тока в коллекторе. Лампа не светится.
- Переключатель замкнут. Напряжение на базе составляет 0.6 В (диод база эмиттер открыт) Падение напряжения на резисторе базы составит 9.4 В. Следовательно ток в базе равен 9.4 мА, если коэффициент усиления равен 100, **ТО МОЖНО ПОЛУЧИТЬ НЕПРАВИЛЬНЫЙ ВЫВОД**, что в коллекторе ток равен 940 мА. Ошибка в том, что правило 4 работает, если выполняется правило 1. Чтобы получить ток выше 100 мА, для этого необходимо, чтобы потенциал коллектора был меньше потенциала земли, что невозможно. Так как транзистор переходит в режим насыщения.

# Режимы работы биполярного транзистора

- Нормальный активный режим.
- Инверсный активный режим.
- Режим насыщения.
- Режим отсечки.

**Эти режимы можно посмотреть и выделить на графиках  
- вольт амперных характеристиках**

# Нормальный активный режим

- Переход эмиттер-база включен в прямом направлении (открыт), а переход коллектор-база — в обратном (закрыт):
  - $U_{эб} > 0$ ;  $U_{кб} < 0$  (для транзистора  $n-p-n$  типа), для транзистора  $p-n-p$  типа условие будет иметь вид  $U_{эб} < 0$ ;  $U_{кб} > 0$ .

# Инверсный активный режим

- Эмиттерный переход имеет обратное смещение, а коллекторный переход — прямое:  $U_{кб} > 0$ ;  $U_{эб} < 0$  (для транзистора  $n$ - $p$ - $n$  типа).

# Режим насыщения

- Оба  $p-n$  перехода смещены в прямом направлении (оба открыты).  
Коллекторный переход отпирается, если напряжение коллектор база будет меньше - 0.4 В.
- В этом режиме ток коллектора не зависит от тока базы. Напряжение насыщения примерно 0.2-0.3 В.

# Режим отсечки

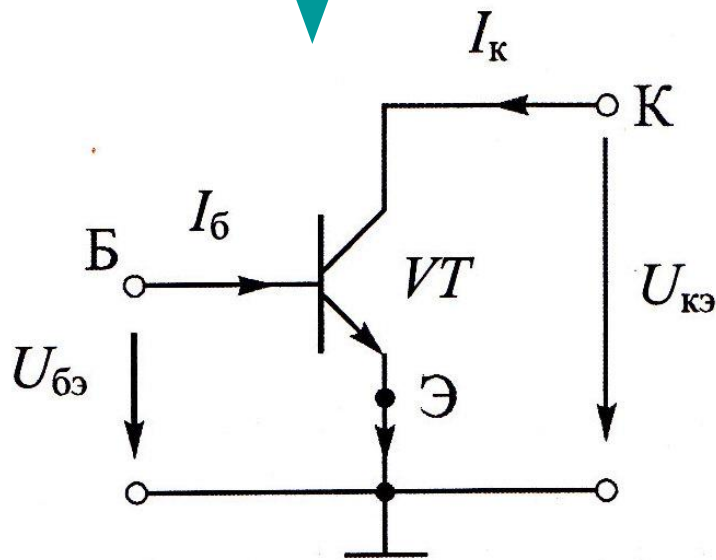
- В данном режиме коллекторный  $p$ - $n$  переход смещён в обратном направлении, а на эмиттерный переход может быть подано как обратное, так и прямое смещение, не превышающее порогового значения, при котором начинается эмиссия неосновных носителей заряда в область базы из эмиттера (для кремниевых транзисторов приблизительно 0,6—0,7 В).
- Режим отсечки соответствует условию  $U_{эб} < 0,6—0,7$  В, или ток базы = 0.



# Вольтамперные характеристики биполярных транзисторов

- Дана схема с общим эмиттером.

Для получения характеристик необходимо построить графики ниже указанных функций



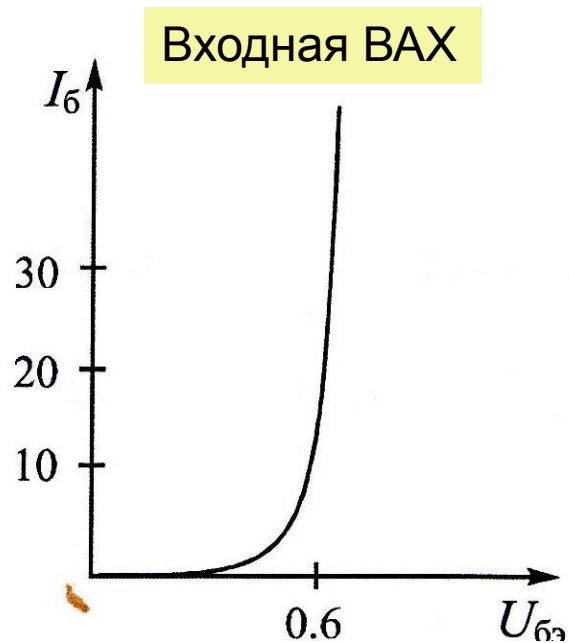
Входная ВАХ

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

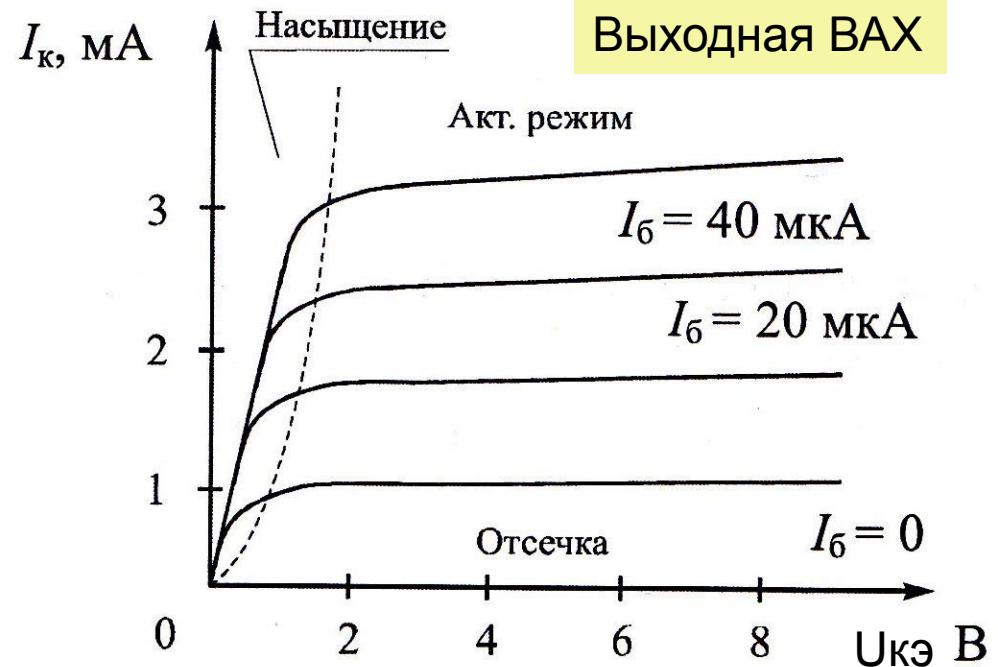
Выходная ВАХ

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

# Вольтамперные характеристики биполярных транзисторов



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



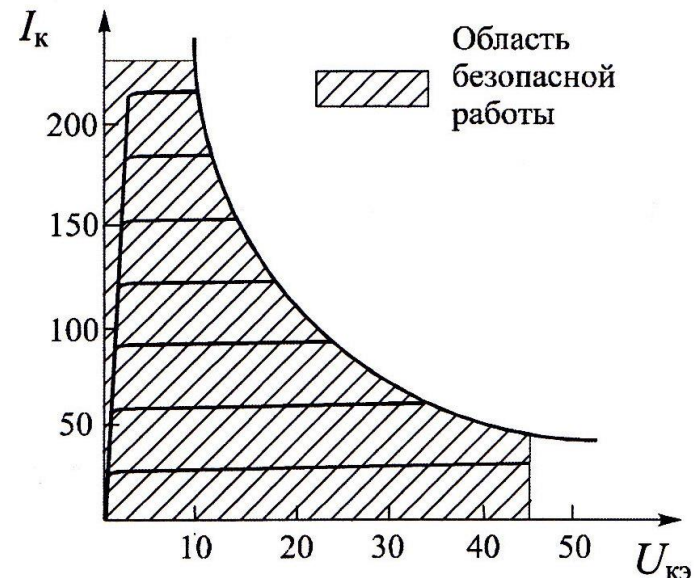
$$I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}}) \Big|_{I_{\text{б}}} = \text{const}.$$

# Область безопасной работы транзистора

- **ВОПРОС.** Какие предельные значения могут принимать токи и напряжения биполярного транзистора!!!
- **ОТВЕТ.** В режиме усилителя тока подавляющая часть рассеиваемой мощности выделяется в области коллекторного перехода  $P = U_{кэ} I_k$ . Поэтому параметры тока и напряжения должны учитывать неравенство

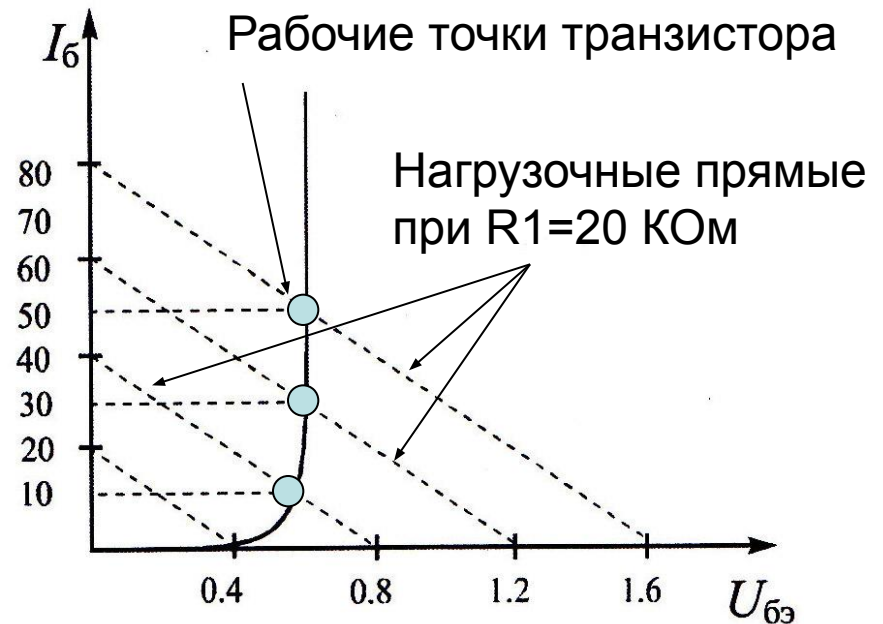
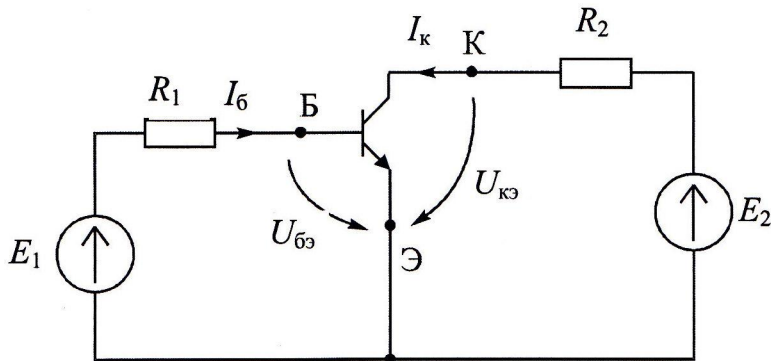
$$P_{\max} < U_{кэ} I_k$$

Это неравенство можно представить следующим графиком



# Определение рабочей точки на входе транзистора

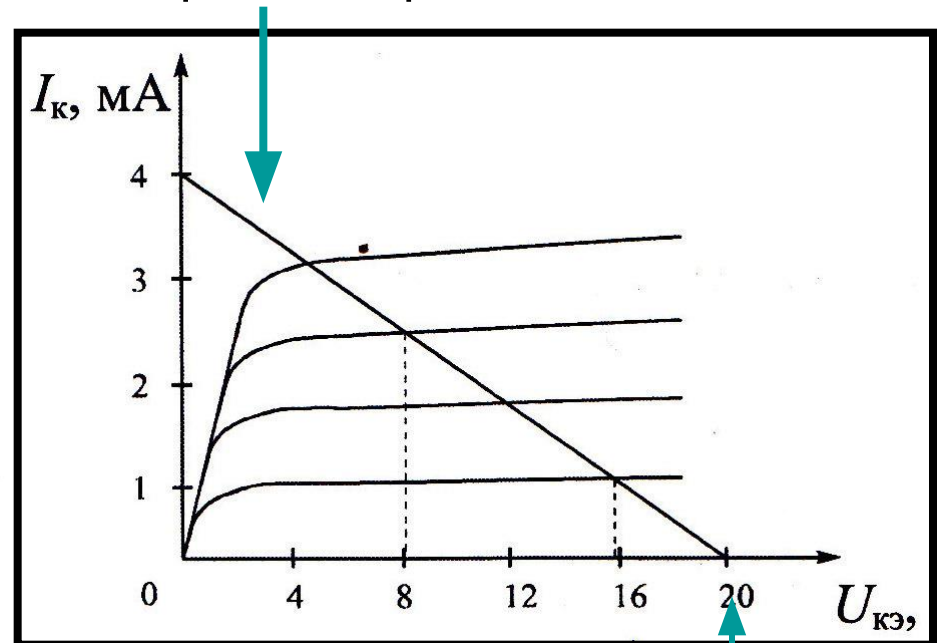
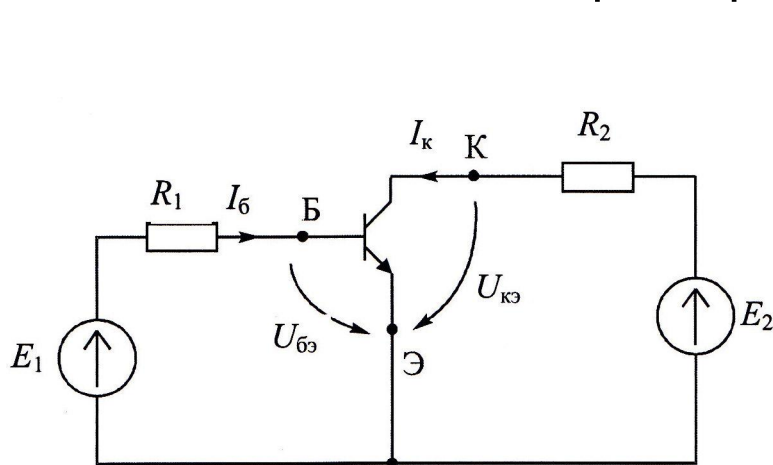
Пусть дана схема с общим эмиттером и  $R_1=20 \text{ КОм}$



При увеличении  $E_1$  от 0.4 В до 1.6 В, ток базы увеличивается от 0 до 80 мкА

# Определение рабочей точки транзистора

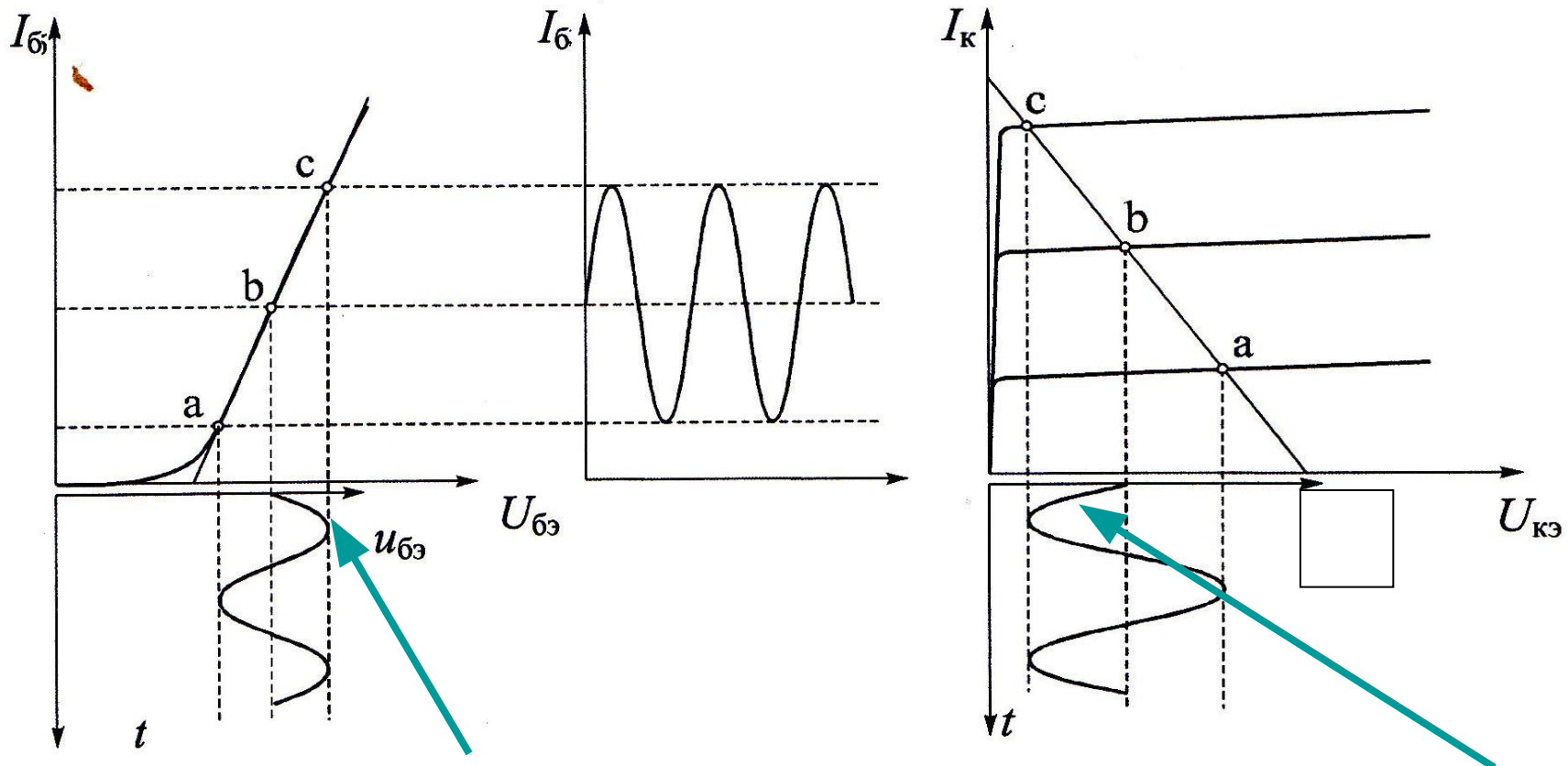
- Рабочая точка выходной цепи транзистора представляет пересечение нагрузочной прямой двухполюсника  $E_2, R_2$  с ветвью выходной характеристики транзистора



Если  $E_1 < 0.6$  В, ток базы примерно равен нулю и транзистор находится в режиме отсечки.

# Определение рабочей точки транзистора

- Транзистор работает как инвертор



Увеличение входного напряжения вызывает уменьшение выходного

# Основные параметры транзистора

- Коэффициент усиления по току.
- Входное сопротивление.
- Выходное сопротивление.
- Обратный ток эмиттера при заданном  $U_{эб}$ .
- Время включения (время задержки).
- Предельная частота коэффициента передачи.
- Емкость коллекторного перехода.
- Обратный ток коллектора при заданном  $U_{кб}$ .
- Максимально допустимые параметры  $U_{кб}$ ,  $U_{кэ}$ ,  $I_{к}$ .
- Максимальная мощность рассеиваемая без теплоотвода.
- Минимальная и максимальная рабочая температура.

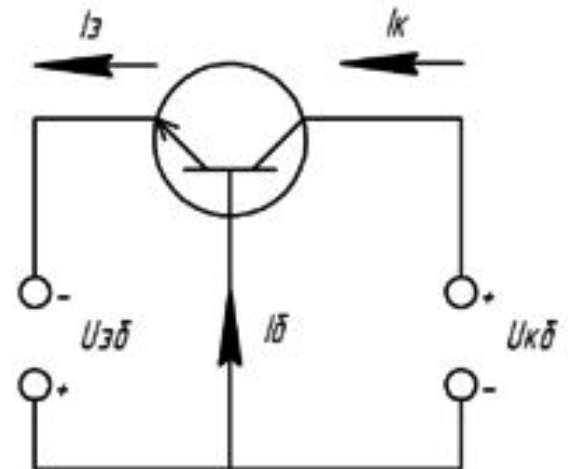
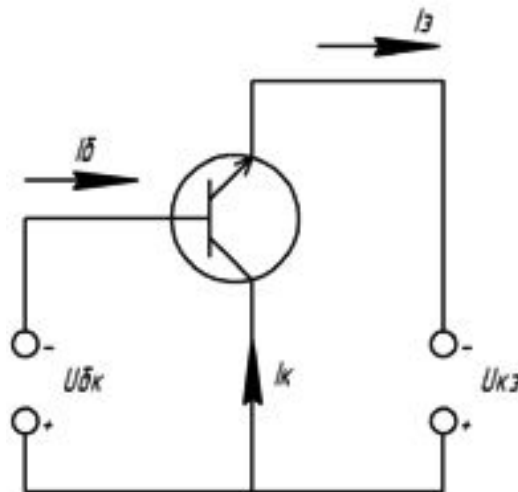
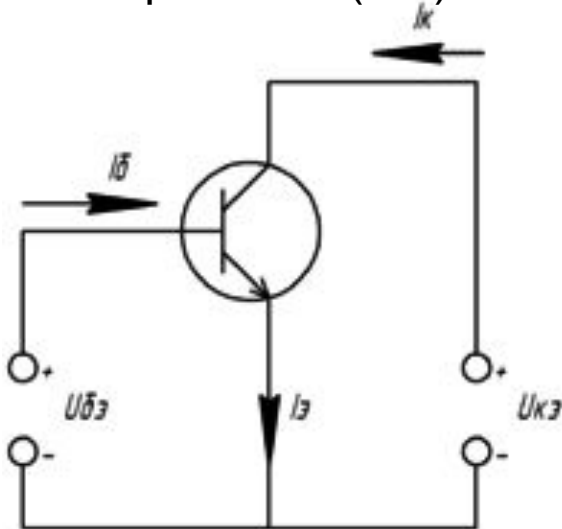
# Схемы включения биполярного транзистора n-p-n

- Схема с общим эмиттером.
- Схема с общим коллектором.
- Схема с общей базой.

$$\beta = \frac{I_k}{I_b} = \frac{I_k}{I_{\text{э}} - I_k} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Во всех трех вариантах регулирование входного и выходного токов достигается изменением напряжения на эмиттерном переходе.

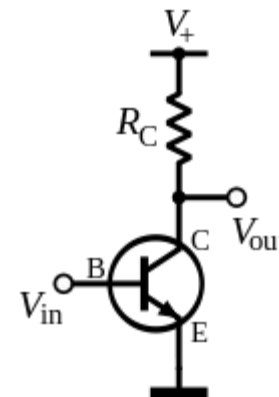
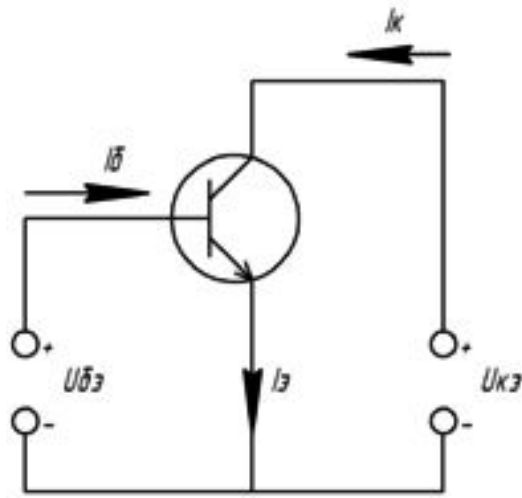
Это изменение может быть достигнуто регулированием входного напряжения (ОБ) или входного тока (ОЭ, ОК)



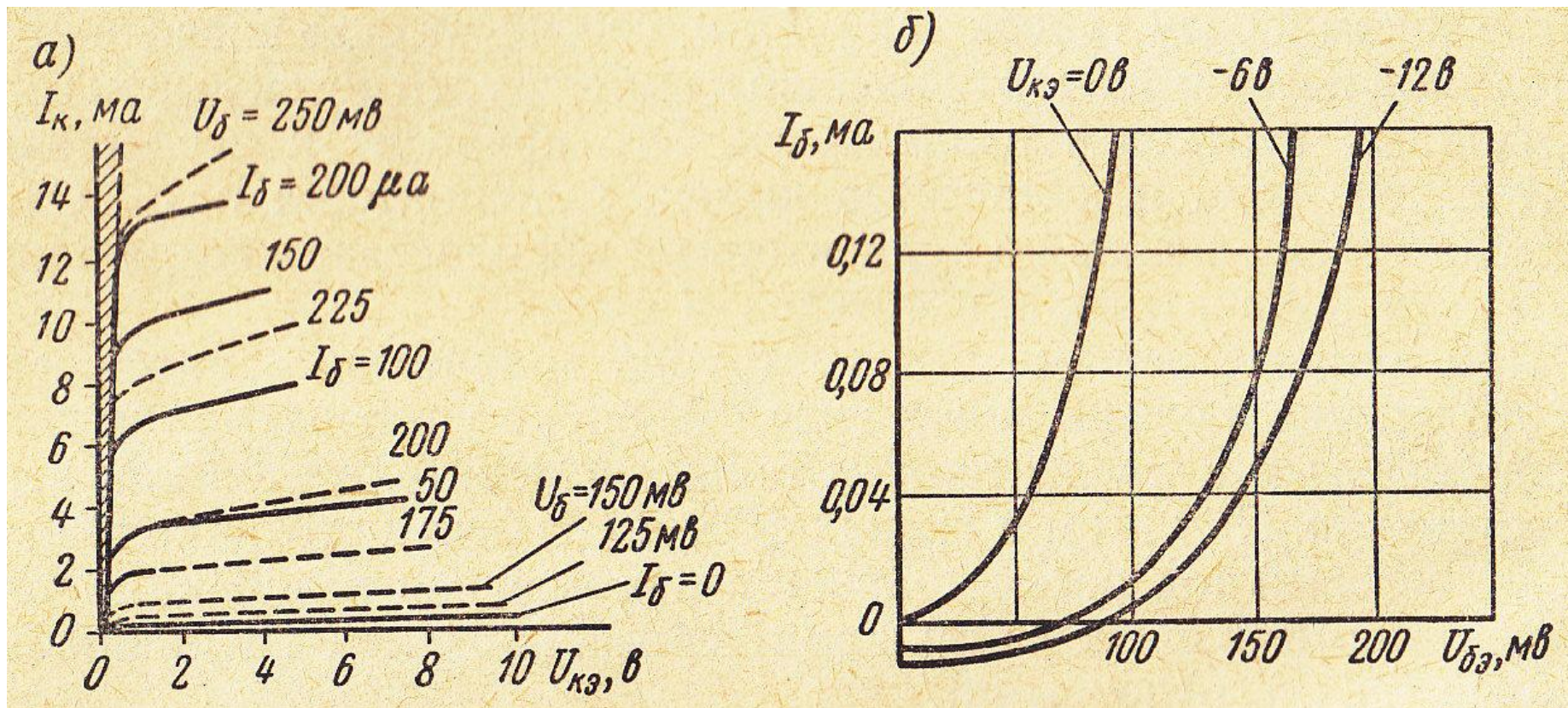


# Схема с общим эмиттером

- **Достоинства**
- Большой коэффициент усиления по току.
- Большой коэффициент усиления по напряжению.
- Наибольшее усиление мощности.
- Можно обойтись одним источником питания.
- Выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного.
- **Недостатки**
- Имеет меньшую температурную стабильность. Частотные свойства такого включения по сравнению со схемой с общей базой существенно хуже, что обусловлено эффектом Миллера.



# Экспериментальное семейство входных и выходных характеристик транзистора по схеме с ОЭ

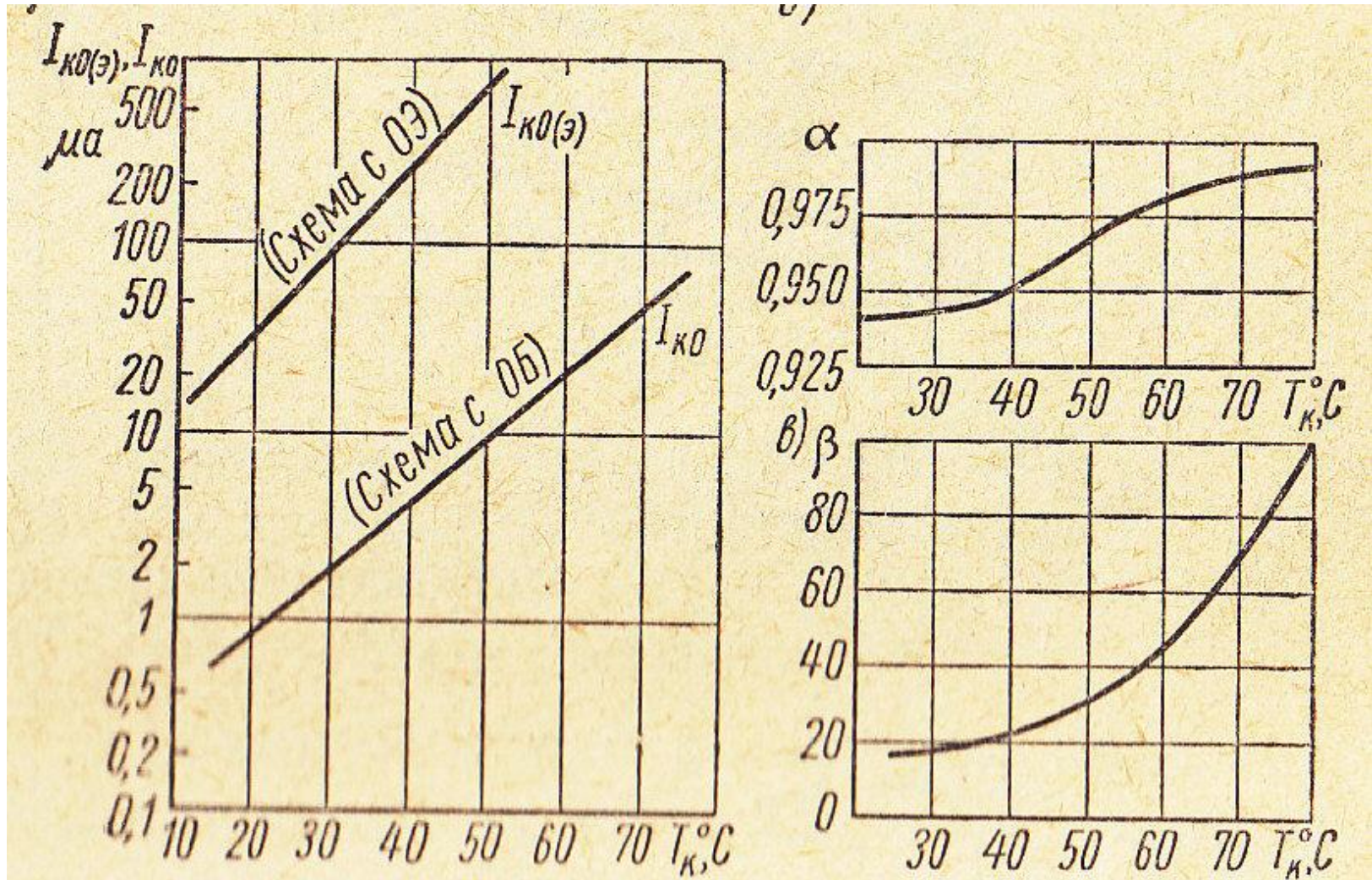


Выходная

Входная

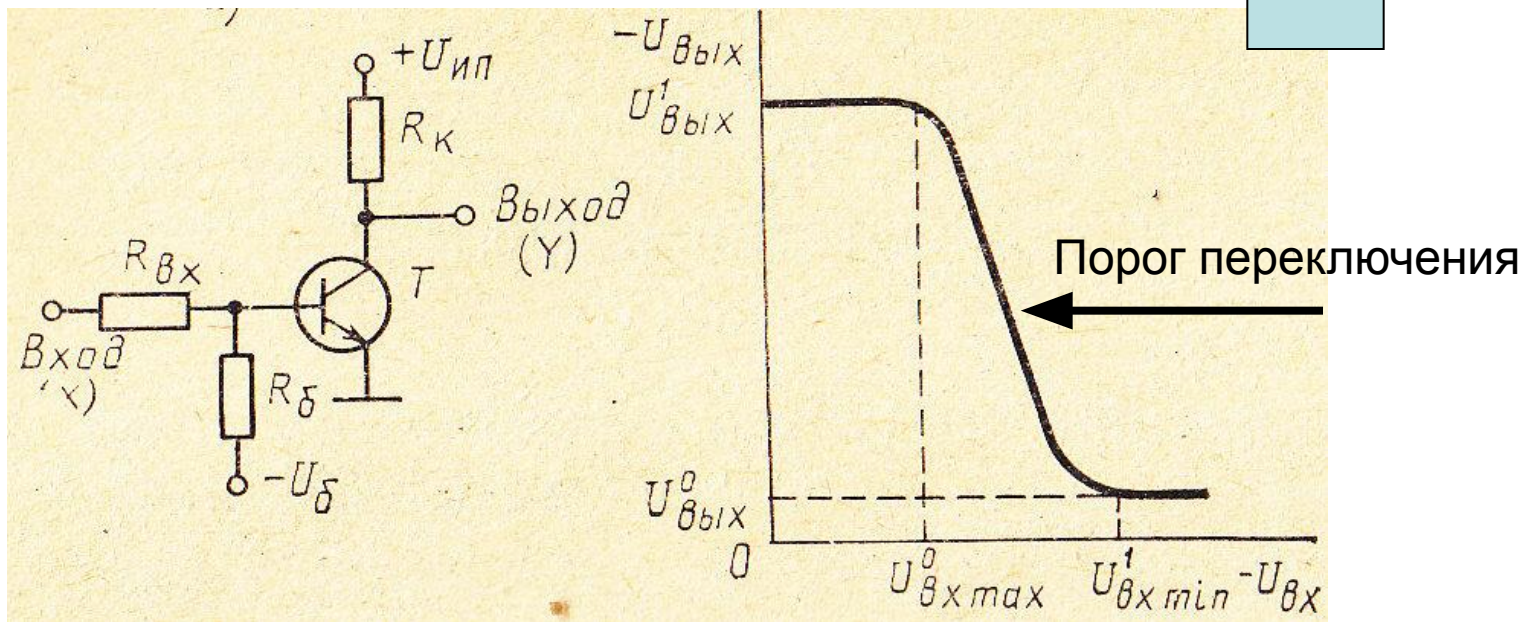


# Температурная зависимость характеристик транзистора



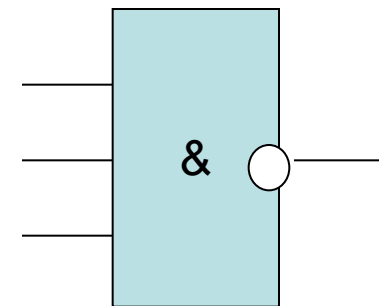
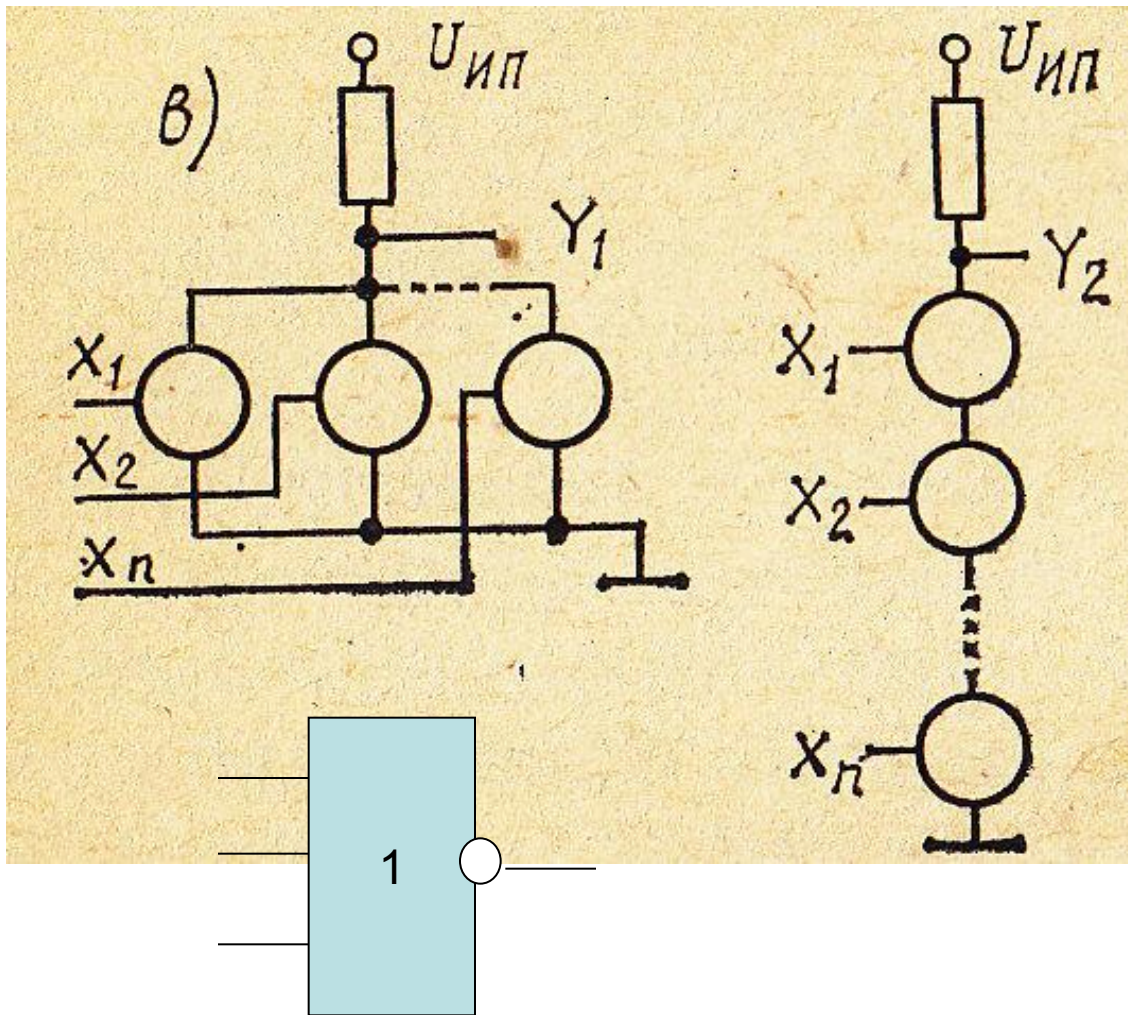
# Инвертор на транзисторе с ОЭ

- Передаточная характеристика схемы





# Транзисторные схемы с общей нагрузкой

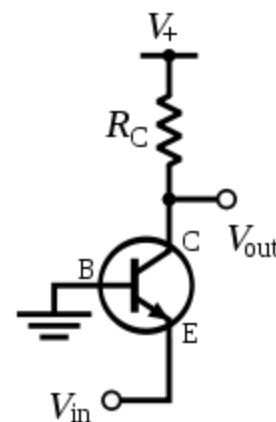
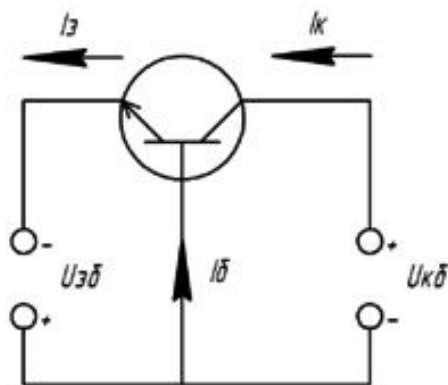


# Эффект Миллера

- Переход б-э транзистора обладает емкостью  $C_{бэ}$ . Если транзистор работает в режиме усиления то он обладает коэффициентом усиления  $K_u$ .
- Но при этом емкость к-э по отношению к источнику сигнала можно рассматривать как  $C_{кэ} = (K_u + 1)C_{бэ}$ .
- Это увеличение эффективной емкости называют **эффектом Миллера**.

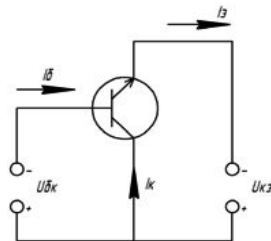
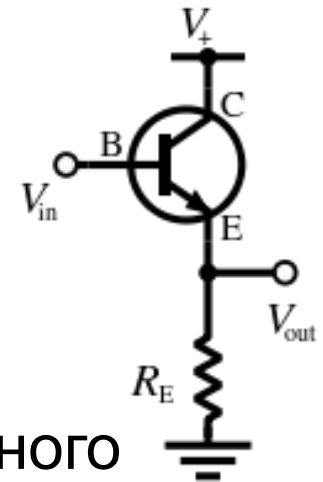
# Схема с общей базой

- **Достоинства**
- Среди всех трёх конфигураций обладает наименьшим входным и наибольшим выходным сопротивлением. Имеет коэффициент усиления по току, близкий к единице, и большой коэффициент усиления по напряжению. Не инвертирует фазу сигнала.
- Хорошие температурные и широкий частотный диапазон, так как в этой схеме подавлен эффект Миллера.
- Высокое допустимое коллекторное напряжение.
- **Недостатки схемы с общей базой**
- Малое усиление по току, немного менее 1.
- Малое входное сопротивление



# Схема с общим коллектором

- **Достоинства**
- Большое входное сопротивление.
- Малое выходное сопротивление.
- Большой коэффициент усиления по току.
- **Недостатки**
- Коэффициент усиления по напряжению немного меньше 1.
- Схему с таким включением часто называют **«эмиттерным повторителем»**. Выходной сигнал повторяет форму входного и не изменяет его фазу

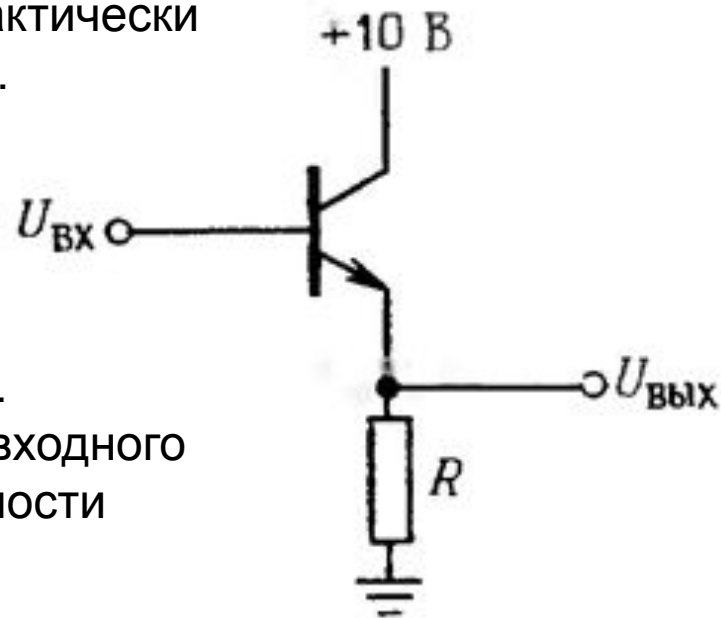




# Эмиттерный повторитель

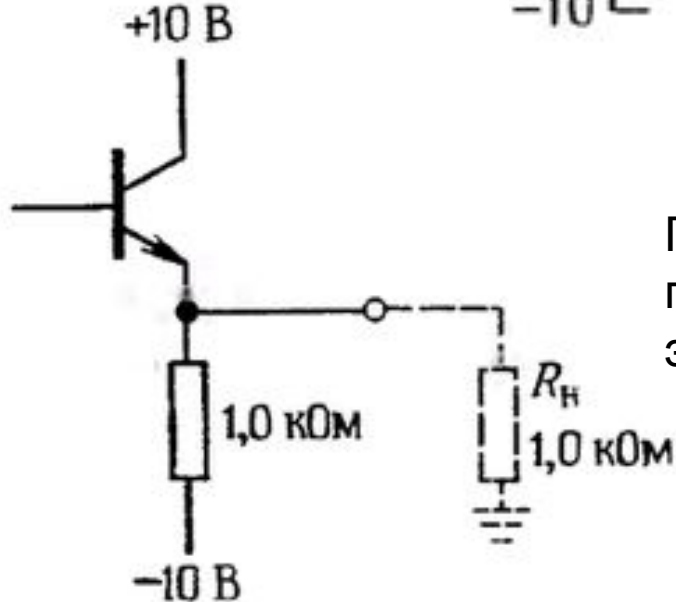
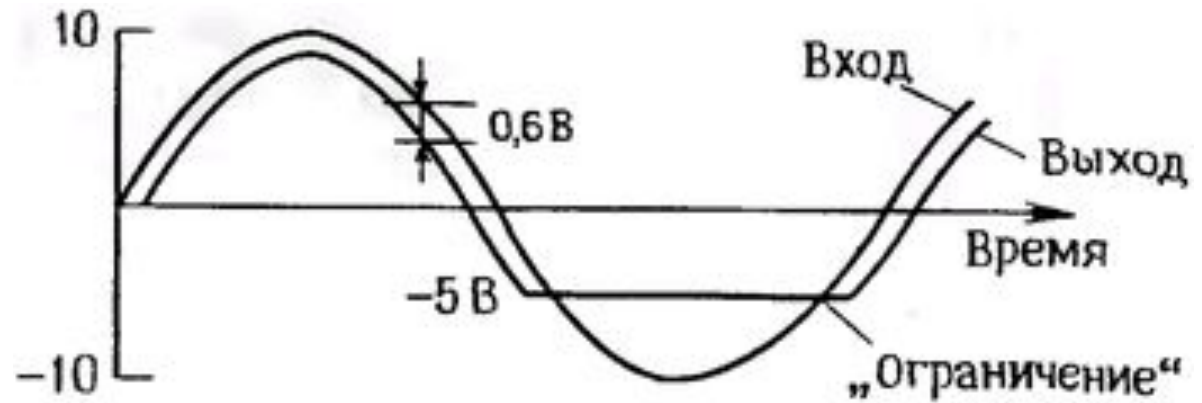
$$U_{\text{э}} = U_{\text{б}} - 0.6\text{В} = U_{\text{вх}} - 0.6\text{В} = U_{\text{вых}}$$

Выходной сигнал по напряжению фактически повторяет входной за минусом 0.6 В.



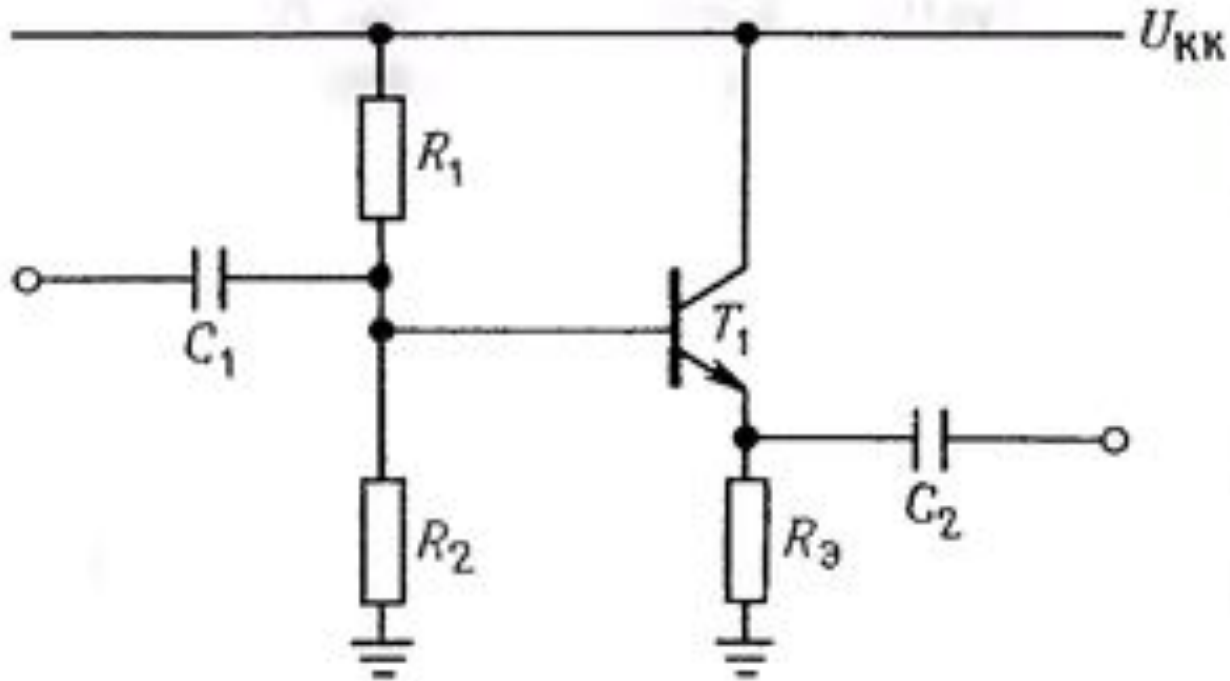
1. Входное сопротивление в схеме значительно больше, чем выходное. За счет этого происходит усиление входного сигнала по току, а значит и по мощности
2. Эмиттерный повторитель обладает способностью согласовывать сопротивления источников сигнала и нагрузок.

# Эмиттерный повторитель как схема формирования асимметричного токового сигнала



При напряжении на входе  $-4.4$  В транзистор переходит в состояние отсечки и появляется эффект ОГРАНИЧЕНИЯ выходного напряжения.

# Расчет эмиттерного повторителя со связью по переменному току



- Разработать схему эмиттерного повторителя для сигналов
- звуковой частоты от 20 Гц до 20 кГц. Напряжение питания +15
- в ток покоя 1мА.

# Пример расчета эмиттерного повторителя

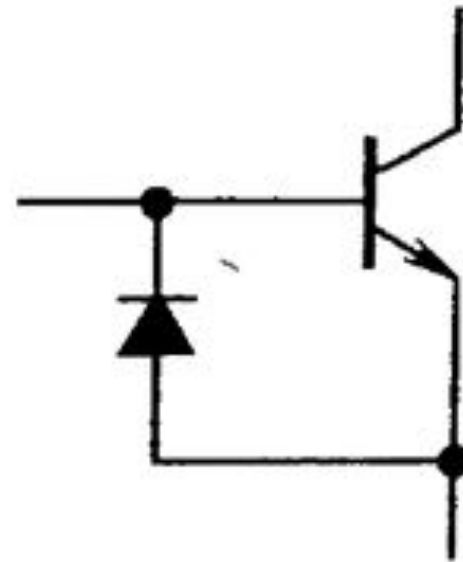
- **ЗАДАНИЕ.** Разработать схему эмиттерного повторителя для сигналов звуковой частоты от 20 Гц до 20 кГц. Напряжение питания +15 в ток покоя 1мА
- Шаг 1. Выбор напряжения  $U_{э}$ . Для получения симметричного сигнала без срезов необходимо выполнение условия  $U_{э}=0.5U_{кк}$  или +7.5В.
- Шаг 2. Выбор резистора  $R_{э}$ . Ток покоя должен составлять 1 мА, поэтому  $R_{э}=7.5кОм$

# Продолжение примера расчета эмиттерного повторителя

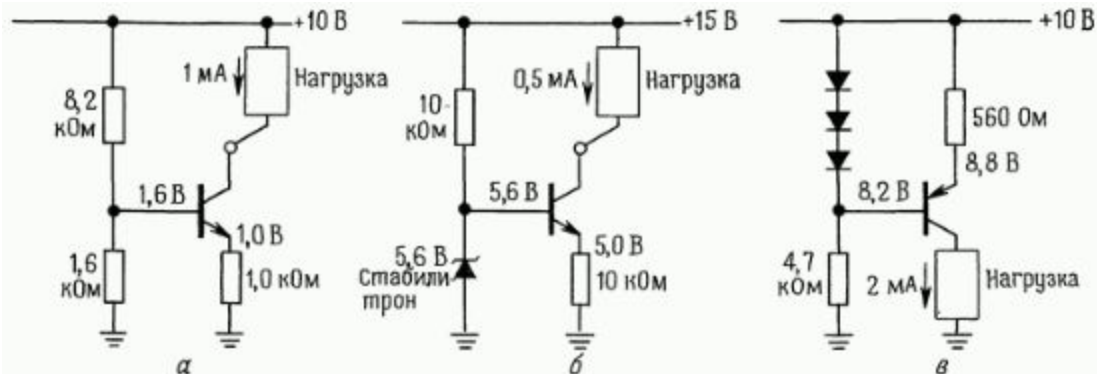
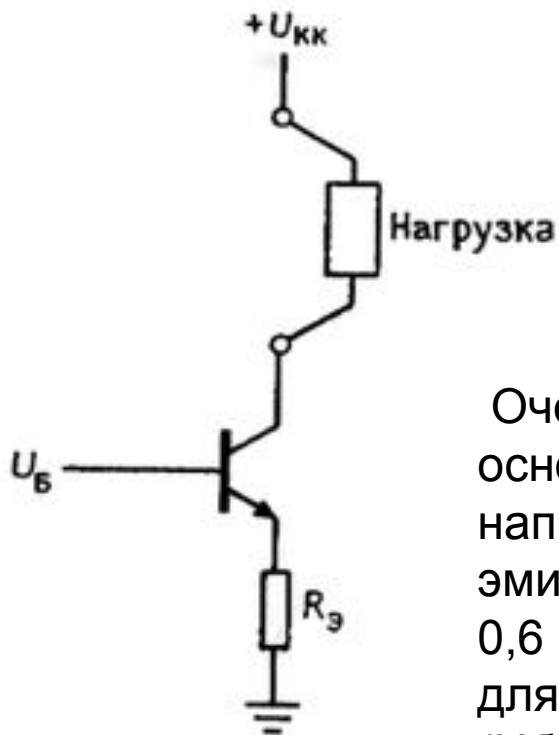
- **Шаг 3. Выбор резисторов R1 и R2.**  
Напряжение  $U_b$  – это сумма  $U_{э} + 0.6 \text{ В} = 8.1 \text{ В}$ . Из этого следует, что сопротивления резисторов R1 и R2 соотносятся к друг другу как 1:1.17. Выберем значения  $R1 = 130 \text{ кОм}$  и  $R2 = 150 \text{ кОм}$ .
- **Шаг 4. Выбор конденсатора C1 C2.**  
Конденсатор C1 и сопротивление нагрузки источника образуют фильтр высоких частот. Сопротивление нагрузки источника есть параллельное соединение входного сопротивления транзистора со стороны базы и сопротивление делителя напряжения.  $C1 = 0.5 \text{ мкФ}$ .  $C2 = 3.3 \text{ мкФ}$ .  
(Подробно у Хоровица).

# Защита от пробоя перехода база эмиттер

- **ВСПОМНИМ ДИОДНЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ.** Объясните, почему предлагаемая схема обеспечивает заявленную защиту.



# Схемы транзисторных ИСТОЧНИКОВ ТОКА



Очень хороший источник тока можно построить на основе транзистора. Работает он следующим образом: напряжение на базе  $U_B > 0,6 \text{ В}$  поддерживает эмиттерный переход в открытом состоянии:  $U_Э = U_B - 0,6 \text{ В}$ . В связи с этим  $I_Э = U_Э / R_Э = (U_Э - 0,6) / R_Э$ . Так как для больших значений коэффициента  $h_{21Э} \approx I_К$ , то  $I_К \approx (U_B - 0,6 \text{ В}) / R_Э$  независимо от напряжения  $U_К$  до тех пор, пока транзистор не перейдет в режим насыщения ( $U_К > U_Э + 0,2 \text{ В}$ ).

# Модель Эберса-Мола

- До сих пор мы рассматривали транзистор как усилитель тока, вход которого работает как диод. (ПРАВИЛО 4).

$$I_{\text{к}} = h_{21э} I_{\text{б}} = \beta I_{\text{б}}$$

- Это приближение является весьма грубым, хотя в ряде случаев большей точности не требуется.
- Более точная формулировка правила 4 определяется формулой Эберса - Мола

$$I_{\text{к}} = I_{\text{нас}} [\exp(U_{\text{бэ}}/U_{\text{т}}) - 1],$$



# Формула Эберса Мола

$$I_k = I_{нас} [\exp(U_{бэ}/U_T) - 1],$$

$U_T = kT/q = 25,3$  мВ при комнатной температуре ( $20^\circ\text{C}$ ),  $q$ -заряд электрона ( $1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл),  $k$  - постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К),

$T$ -абсолютная температура в Кельвинах ( $K = ^\circ\text{C} + 273,16$ ).

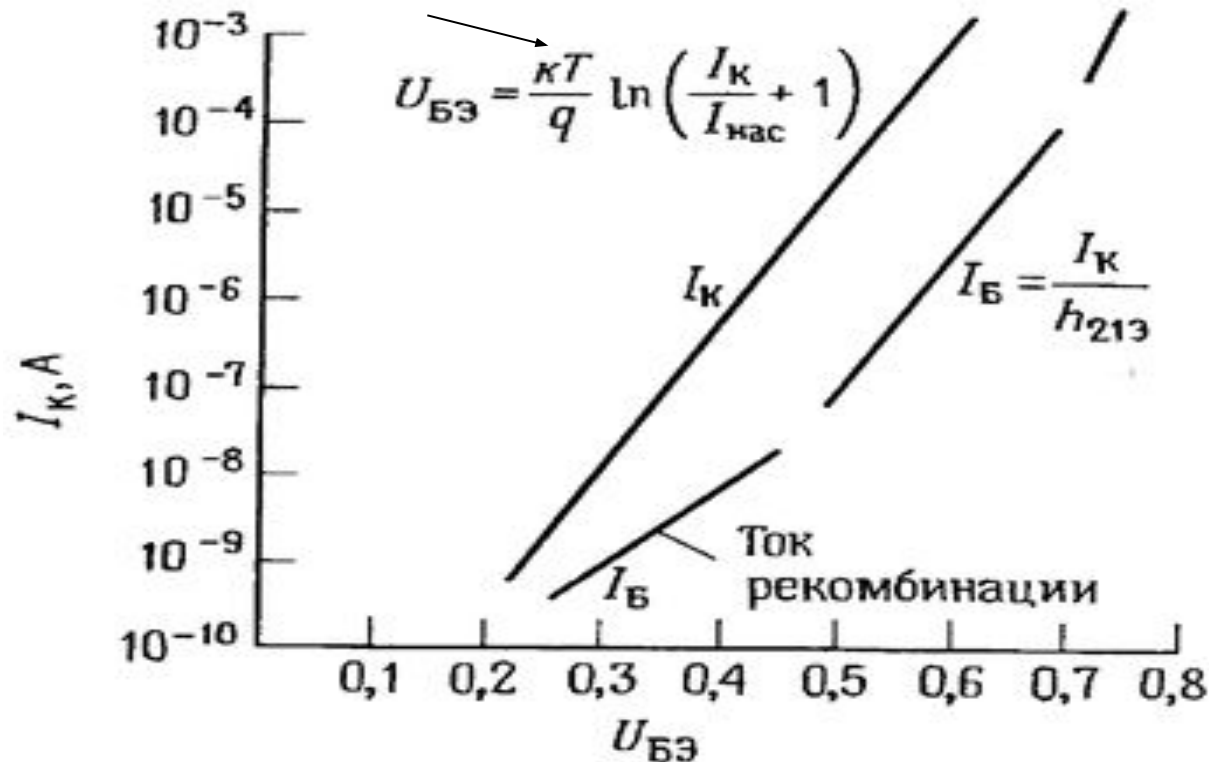
$I_{нас}$  - ток насыщения транзистора (зависит от  $T$ ).

$$I_b = I_k/h_{21э},$$

где «постоянная»  $h_{21э}$  обычно принимает значения от 20 до 1000 и зависит от транзистора,  $I_k$ ,  $U_{кэ}$  и температуры. Ток  $I_{нас}$  представляет собой обратный ток эмиттерного перехода. В активной области  $I_k \gg I_{нас}$  и членом  $-1$  можно пренебречь.

# Зависимость тока коллектора от напряжения база эмиттер

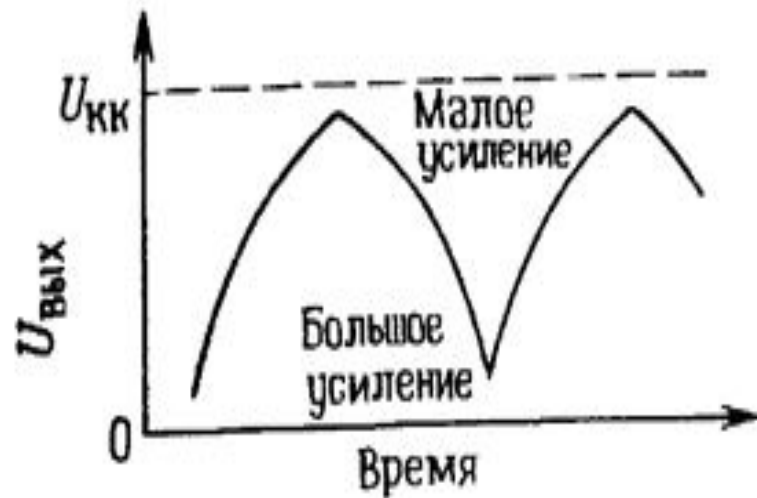
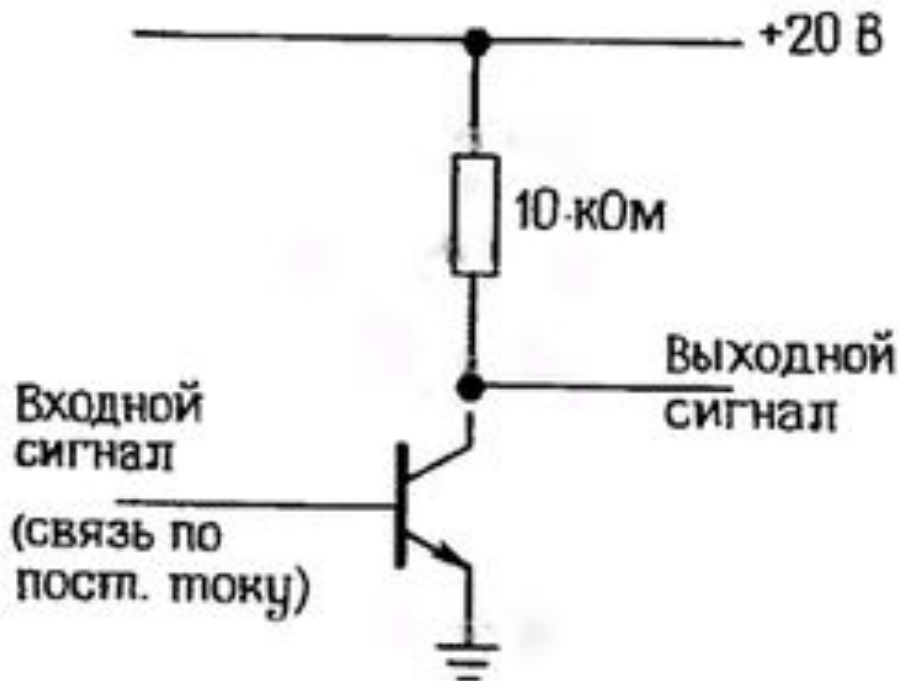
Существует температурная нестабильность коэффициента усиления



ВОПРОС, На сколько надо увеличить напряжение  $U_{БЭ}$ , чтобы ток коллектора Увеличить в десять раз!!

# Недостатки однокаскадного усилителя общим эмиттером

- Данная схема обладает существенной нелинейностью. Если на входе треугольный сигнал. То на выходе:



Фактически происходит изменение коэффициента усиления от  $-800 (U_{\text{вых}} = 0, I_{\text{к}} = 2 \text{ мА})$  до нуля ( $U_{\text{вых}} = U_{\text{кк}}, I_{\text{к}} = 0$ )