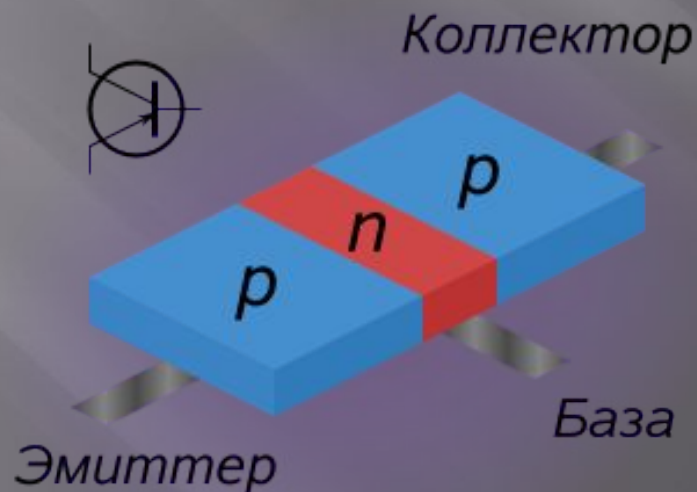


# ТЕМА 4. ТРАНЗИСТОРЫ



## 4.1. Общие сведения

- Транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими р-п переходами, тремя выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции носителей заряда.



## 4.1. Общие сведения

- Взаимодействие между p-n переходами существует, если толщина базы намного меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда (диффузионная длина – расстояние, которое проходят неосновные носители заряда до рекомбинации). В этом случае носители заряда, инжектированные через один из p-n переходов, могут достичь другого перехода и изменить его ток. Таким образом, взаимодействие переходов проявляется в том, что ток одного из переходов управляет током другого перехода.

# 4.1. Общие сведения

- Электрические переходы могут быть смещены в прямом или обратном направлении => 3 режима работы:
- Отсечка: оба перехода  $U_{обр}$
- Режим насыщения: оба перехода  $U_{пр}$
- Активный режим (нормальный): Э -  $U_{пр}$ , К -  $U_{обр}$ .
- Активный режим (инверсный): Э -  $U_{обр}$ , К -  $U_{пр}$ .  
– существует, но не рассматривается.
- Стрелка условного обозначения показывает направление прямого тока открытого транзистора.

# 4.1. Общие сведения

3 схемы включения:

- ▣ Общий эмиттер.
- ▣ Общая база.
- ▣ Общий коллектор.
- ▣ Общим называется электрод, относительно которого задают или измеряют напряжение.

# 4.1. Общие сведения

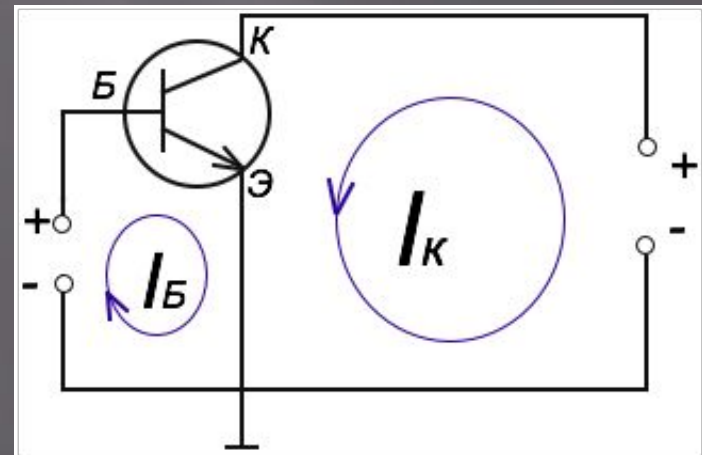
Два правила:

- По стандарту вход слева (снизу), выход справа (сверху).
- Входная и выходная цепи транзистора гальванически развязаны (входной ток течёт по своей цепи, а  $I_{\text{ВЫХ}}$  по своей).

- Общий эмиттер

- $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{БЭ}}$

- $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ЭК}}$



# 4.1. Общие сведения

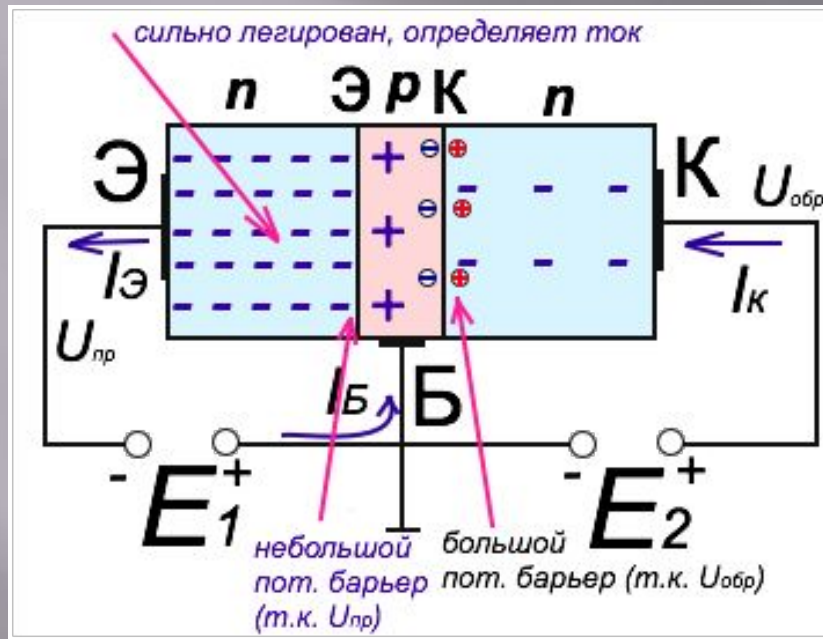
Постоянный ток	Статич. х-ки		
Малый переменный сигнал	Статич. х-ки	Малосигнальные параметры	
Большой переменный импульсный сигнал	Статич. х-ки	Малосигнальные параметры	Нелинейность х-к

## 4.2. Физические процессы

- Схема с общей базой:
- $I_{\text{Э}}$  – за счёт инжекции (большой, т.к. носителей заряда много, потому что инжекция)
- $I_{\text{Б}}$  – за счёт рекомбинации
- $I_{\text{К}}$  – экстракция (освобождение базы от неосновных носителей)
- $I_{\text{ВЫХ}} < I_{\text{ВХ}}$



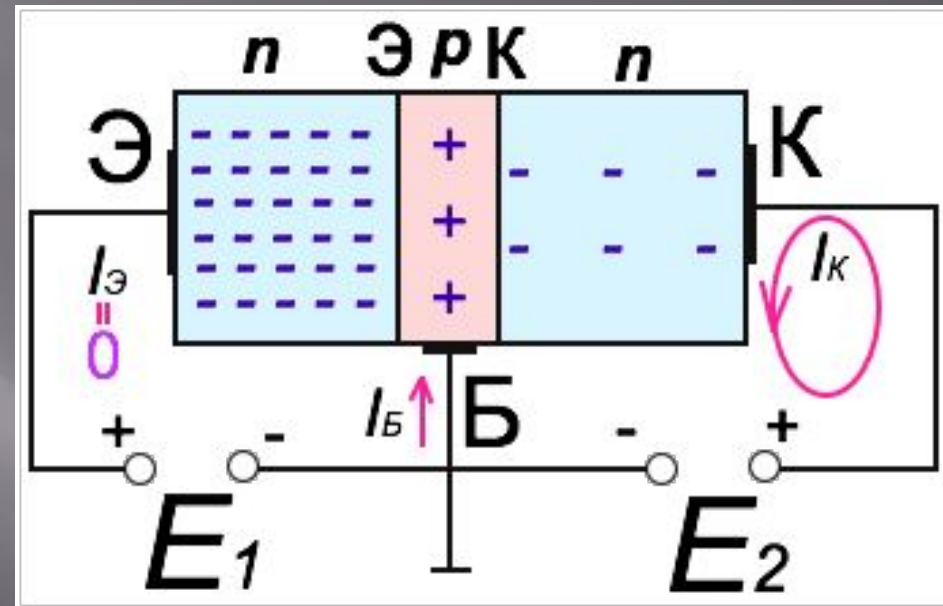
# 4.2. Физические процессы



Активный режим

$$I_{э} = I_{к} + I_{б}$$

$$I_{б} \ll I_{к}$$



Режим отсечки

$$I_{э} = 0$$

$I_{к}$  – обратный ток  
коллекторного  
перехода

$$I_{б} = -I_{к}$$

## 4.3. Статические характеристики

- ▣ Система статических характеристик
- ▣ Обозначим:  $U_1, I_1$  – входные напряжение и ток;  $U_2, I_2$  – выходные напряжение и ток.

$$U_1 = f_1(I_1, I_2) \qquad I_1 = f_1(U_1, U_2)$$

$$U_2 = f_2(I_1, I_2) \qquad I_2 = f_2(U_1, U_2)$$

$$U_1 = f_1(I_1, U_2) \qquad I_1 = f_1(U_1, I_2)$$

$$I_2 = f_2(I_1, U_2) \qquad U_2 = f_2(U_1, I_2)$$

## 4.3. Статистические характеристики

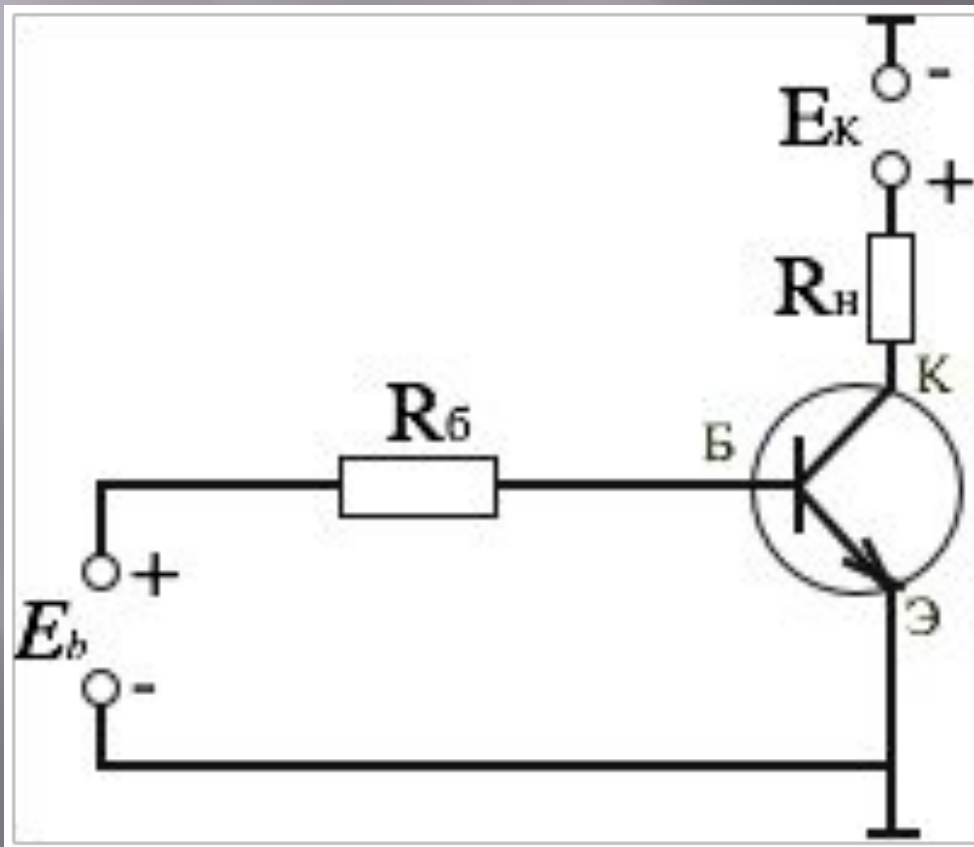
$$I_1 = f_1(I_2, U_2) \quad I_2 = f_1(U_1, I_1)$$

$$U_1 = f_2(I_2, U_2) \quad U_2 = f_2(U_1, I_1)$$

- Из 4-х возможных семейств каждой системы два являются основными, а два – второстепенными, их можно получить из основных путём перестроения. На практике удобно использовать в качестве основных связывающие ток и напряжение на входе – это входные характеристики, и ток с напряжением на выходе – это выходные характеристики.
- Характеристики прямой передачи – связывают  $I$  и  $U$  на выходе с  $I$  и  $U$  на входе.
- Характеристики обратной передачи – связывают  $I$  и  $U$  на входе с  $I$  и  $U$  на выходе.

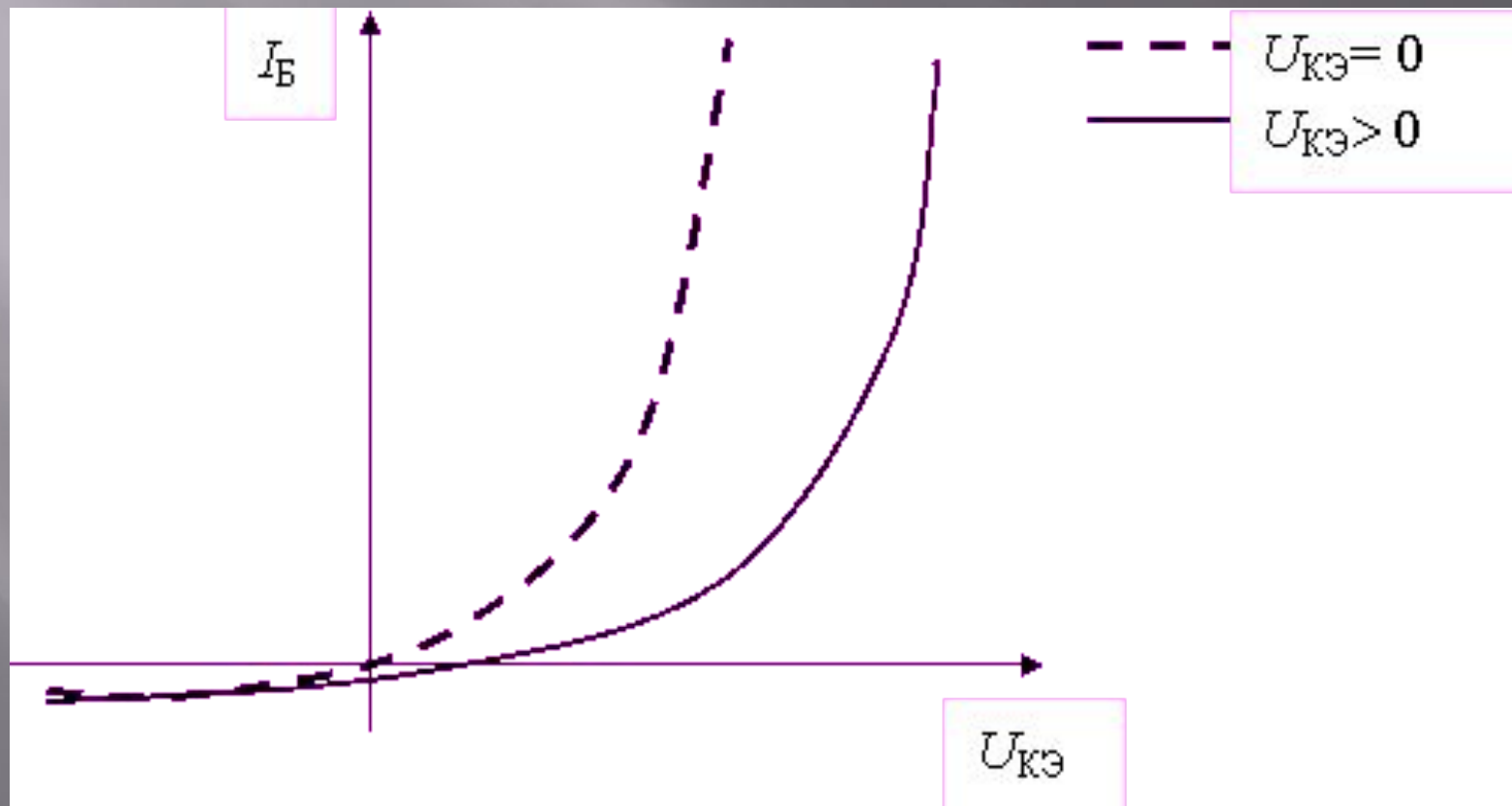
# 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

$$I_{\text{б}} = I_{\text{вх}}$$



## 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

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

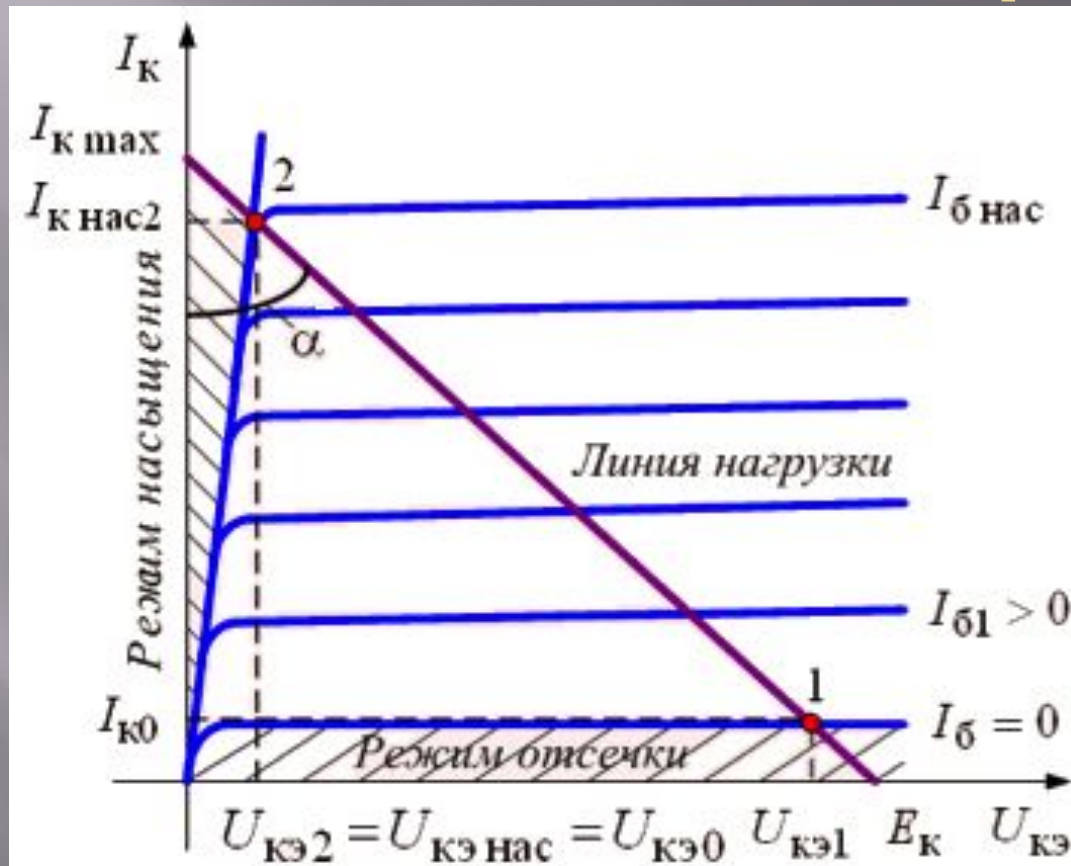


## 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

$$R_{BX} = h_{11\theta} \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{К} \geq 1В}$$

$$I_{К} = \frac{1}{2} U_{КЭ} \text{ при } I_{Б} = \text{const}$$

## 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима



- Режим ХХ:  $U_{KЭ} = E_K, I_K = 0$
- КЗ:  $U_{KЭ} = 0, I_K = E_K / R_K$

# 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

## Режим отсечки

- ▣  $I_{\text{Э}} = 0$
- ▣  $I_{\text{К}} = I_{\text{КО}}$  (обратный ток коллекторного перехода)  
 $r_{\text{тр}} \approx \infty$   $U_{\text{КЭ}}^- \approx E_{\text{К}}$

Обеспечение режима:  
 $|E_{\text{Б}}| > I_{\text{К0max}} R_{\text{Б}}$



## 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

- ▣ **Свойства:** режим неуправляемый (изменение входных параметров не меняет выходные параметры)
- ▣ Неуправляемость даёт помехозащищённость.
- ▣ **Недостаток:** инерционность (в быстродействующих схемах не используется из-за необходимости разряда входной ёмкости)

## 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

### Активный режим

- Режим управляемый.

$$I_B \uparrow \Rightarrow I_K \uparrow, U_{КЭ} \downarrow, r_{тр}^+ \downarrow$$

### Обеспечение режима:

- Необходимо провести через заданную точку нагрузочную прямую, по ней определяется  $E_K$  и  $R_K$ .
- $I_{БА} = E_K / R_B$

## 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

- ▣ Режим насыщения

- ▣ Свойства:

$$U_{КЭн} \approx 0, r_{трн} \approx 0, I_K \approx \frac{E_K}{R_K}$$

- ▣ Степень насыщения:  $1,1 \leq s = \frac{I_B}{I_{Бн}} \leq 1,2$

- ▣ Ток базы насыщения:  $I_B \geq I_{Бн}$

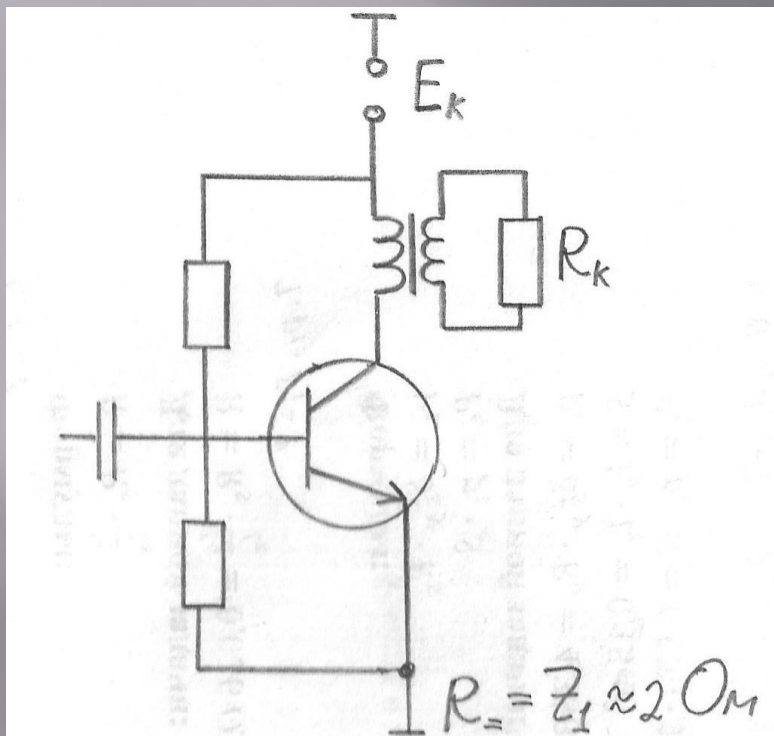
- ▣  $I_{Бн}$  – параметр кривой, исходящей из точки MN.

$$I_{Бн} = \frac{I_{Кн}}{\beta} = \frac{E_K}{\beta R_K}$$

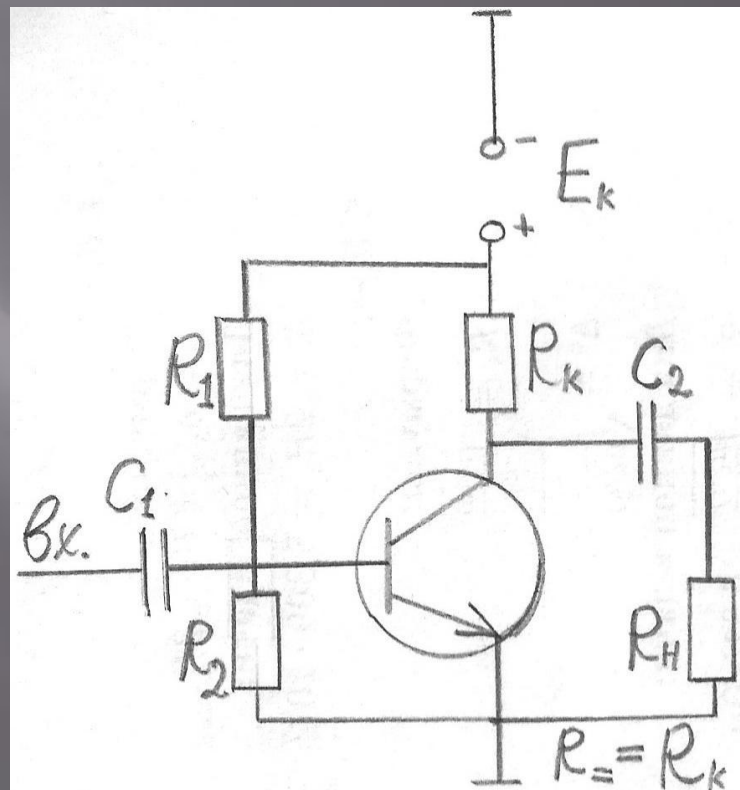
## 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

- ▣ Динамические характеристики:
- ▣ а) Выходные:
- ▣ Нагрузочная прямая постоянного тока – определяет положения точки покоя. По нагрузочной прямой постоянного тока движется рабочая точка, напряжения при малом переменном сигнале.
- ▣ Нагрузочная прямая переменного тока – предназначена для анализа и расчёта каскадов усиления, работающих при больших уровнях сигнала. Рабочая точка пересекает большую часть ВАХ).

## 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

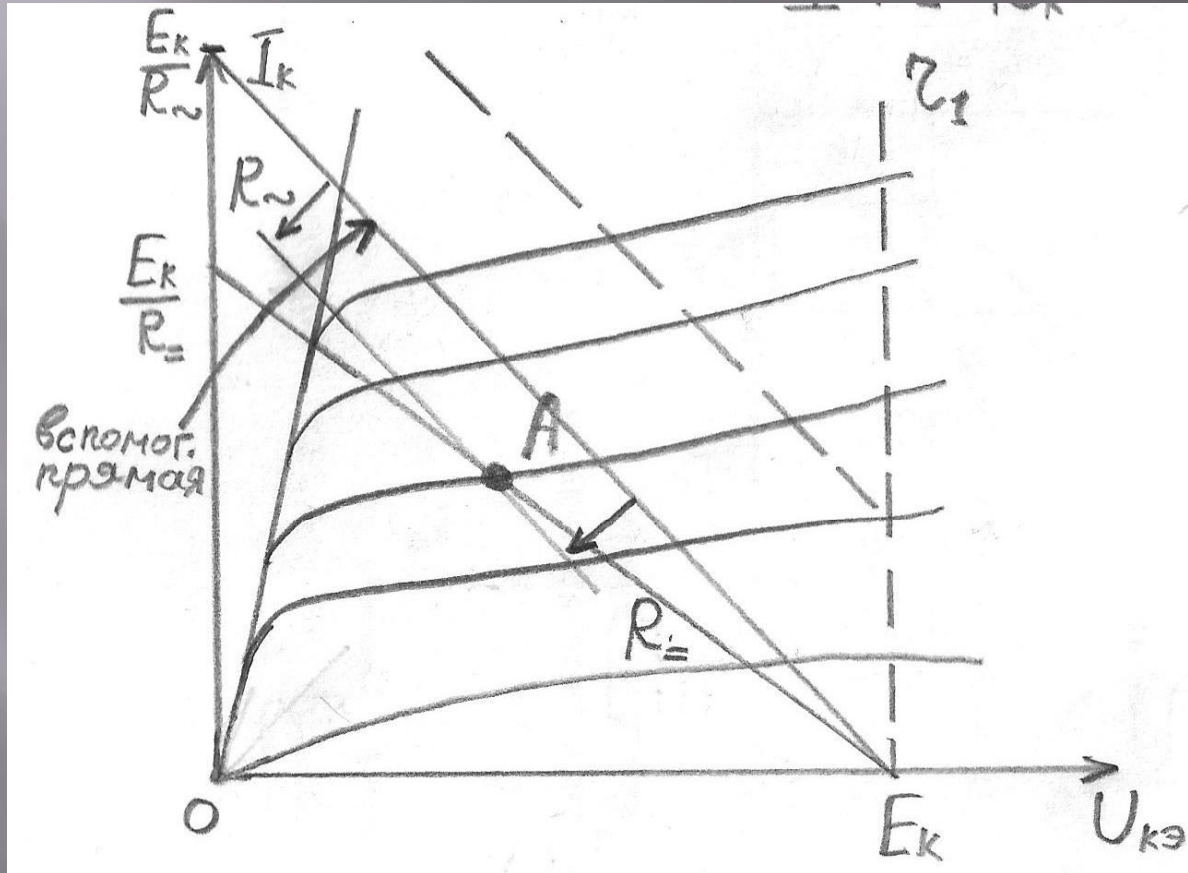


Мощный усилитель  
схема



Маломощная

# 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима



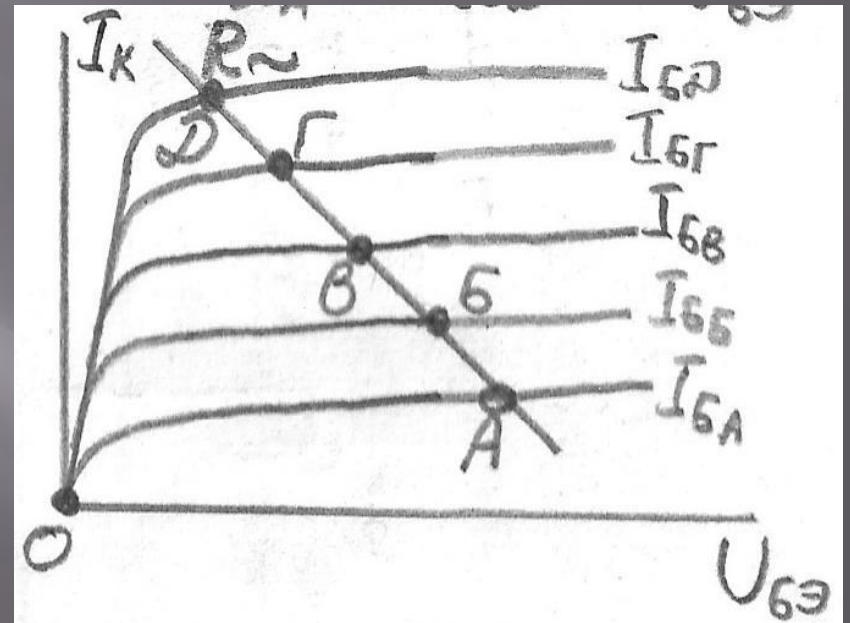
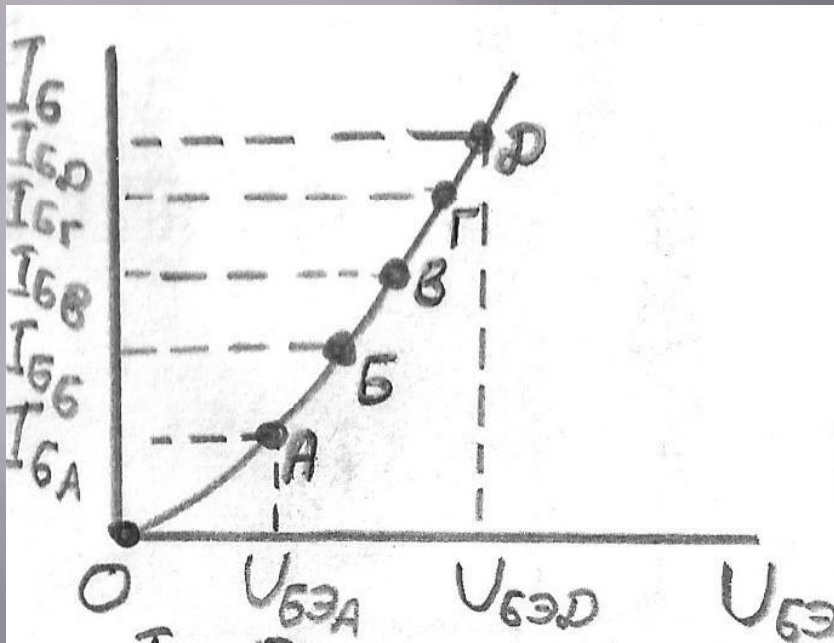
$$R = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}$$

$$R = r_1 + r_2' + R_H'$$

## 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

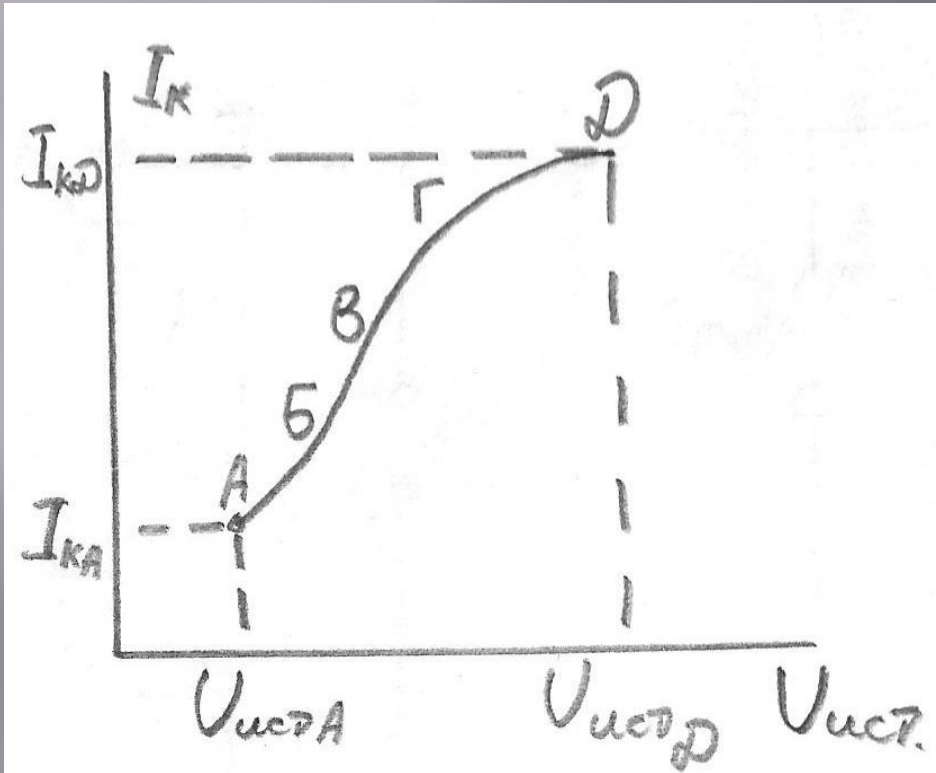
- ▣ б) Сквозная характеристика – это зависимость выходного тока от напряжения источника сигнала при заданной нагрузке. Нужна для расчёта нелинейных искажений. Нелинейные искажения появляются там, где рабочая точка движется в большом диапазоне характеристик (т.е. в каскадах мощного усиления) мощного усиления).
- ▣  $I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ИСТ}})$  при  $R_{\text{Н}}$ .
- ▣ Для схемы общий эмиттер это  $I_{\text{К}}$ .

# 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима





## 4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима



$$U_{ист а} = U_{БЭа} + I_{Ба} R_{ист}$$

# 4.5. Схемы включения

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА

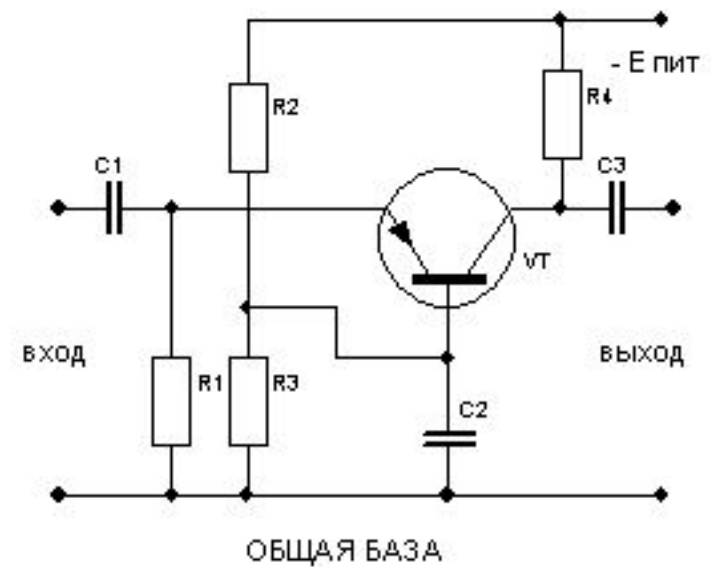
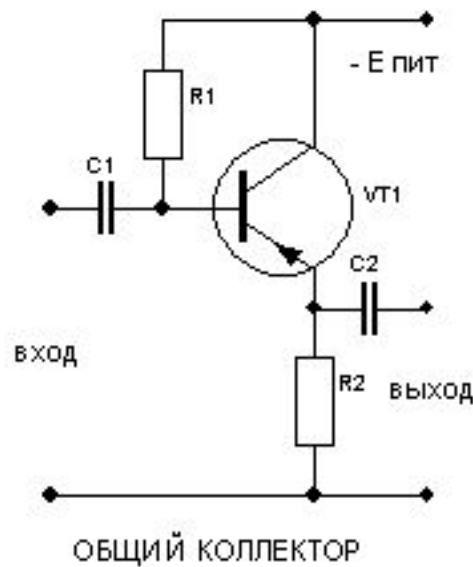
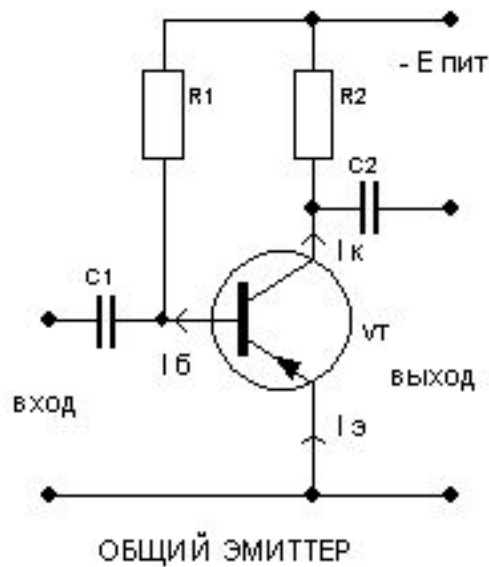
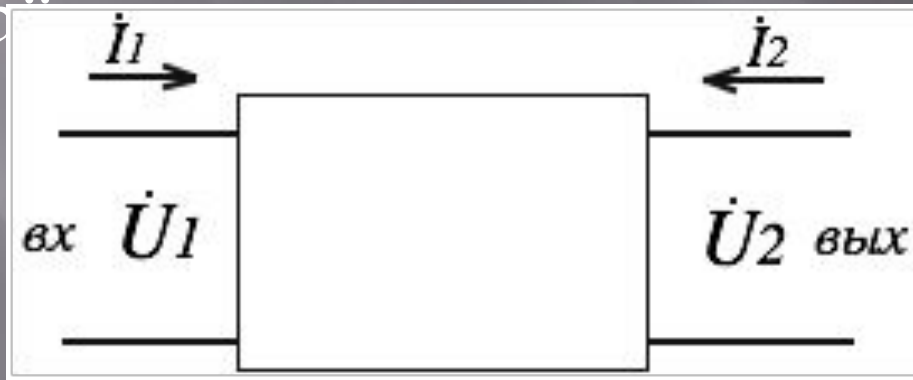


Схема включения	Токи и напряжения	Усилительные свойства	Линейность	Согласование	Схема включения
Общий эмиттер <i>1 место по применимости (&gt;90%)</i>	$I_{ВХ} = I_{Б}, I_{ВЫХ} = I_{К}$ $I_{Э} = I_{Б} + I_{К} = \text{const}$ $U_{ВХ} = U_{БЭ},$ $U_{ВЫХ} = U_{КЭ}$	$K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = U_{КЭ} / U_{БЭ} > 1$ $K_I = I_{ВЫХ} / I_{ВХ} = I_{К} / I_{Б} > 1$ $K_P = K_U K_I \gg 1$	Невысокая (~10%); зависит от линейности входной характеристики и от эквидистантности выходной. Выходная - не эквидистантна.	Среднее Общий эмиттер инвертирует фазу входного сигнала.	Общий эмиттер <i>1 место по применимости (&gt;90%)</i>
Общая база <i>3 место</i>	$I_{ВХ} = I_{Э}, I_{ВЫХ} = I_{К}$ $U_{ВХ} = U_{ЭБ},$ $U_{ВЫХ} = U_{КЭ}$	$K_U = U_{КБ} / U_{ЭБ} > 1$ $K_I = I_{К} / I_{Э} > 1$ $K_P > 1$	Высокая	Самые плохие	Общая база <i>3 место</i>
Общий коллектор <i>2 место</i>	$I_{ВХ} = I_{Б}, I_{ВЫХ} = I_{Э}$ $U_{ВХ} = U_{БК},$ $U_{ВЫХ} = U_{ЭК}$	$K_I > 1$ $K_U \leq 1$  Схема ОК также называется <u>повторитель</u> .			Общий коллектор <i>2 место</i>
Схема включения	Токи и напряжения	Усилительные свойства	Линейность	Согласование	Схема включения

## 4.7. Малосигнальные параметры

- Если переменные напряжения на переходах транзисторов достаточно малы, токи в нём оказываются линейными функциями
- В данном случае транзистор рассматривается как автономный четырёх



## 4.7. Малосигнальные параметры

### ▣ Z-параметры:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = Z_{11}\dot{I}_1 + Z_{12}\dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 = Z_{21}\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 \end{cases} \quad Z_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{I_2=0} \quad Z_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{I_1=0} \quad Z_{21} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right|_{I_2=0} \quad Z_{22} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right|_{I_1=0}$$

- ▣ Z-параметры имеют размерность сопротивления, измеряются в режиме холостого хода.

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2 \end{cases} \quad Y_{11} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right|_{U_2=0} \quad Y_{12} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{U_1=0} \quad Y_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right|_{U_2=0} \quad Y_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{U_1=0}$$

- ▣ Имеют размерность проводимости и определяются в режиме короткого замыкания. Используются при расчёты высокочастотных усилителей.

# 4.7. Малосигнальные параметры

□ H-параметры:

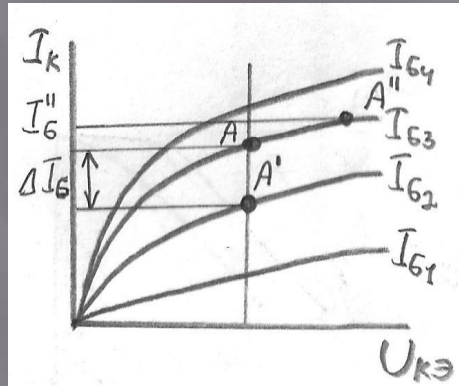
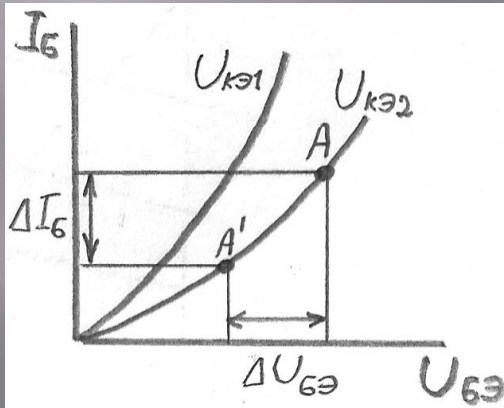
$$\begin{cases} \dot{U}_1 = H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_2 \end{cases}$$

$$H_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$$

$$H_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$$

$$H_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1=0}$$

$$H_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1=0}$$



$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{KЭ2}}$$

$$h_{12Э} = \left. \frac{\Delta U'_{БЭ}}{\Delta U_{KЭ}} \right|_{I_{БA}}$$

$$h_{21Э} = \left. \frac{I_{KA} - I_{KA'}}{I_{Б3} - I_{Б2}} \right|_{U_{KЭ2}}$$

$$h_{22Э} = \left. \frac{I_{BA} - I_{BA''}}{I_{KЭA''} - I_{KЭA}} \right|_{I_{БЭ}}$$

## 4.8. Эквивалентные схемы

- Эквивалентная схема – схема, состоящая из линейных элементов (L, C, R, ГТ, ГН), которая по своим свойствам при данном сигнале (например, малом переменном) не отличается от реального объекта

Существуют схемы:

Формальные

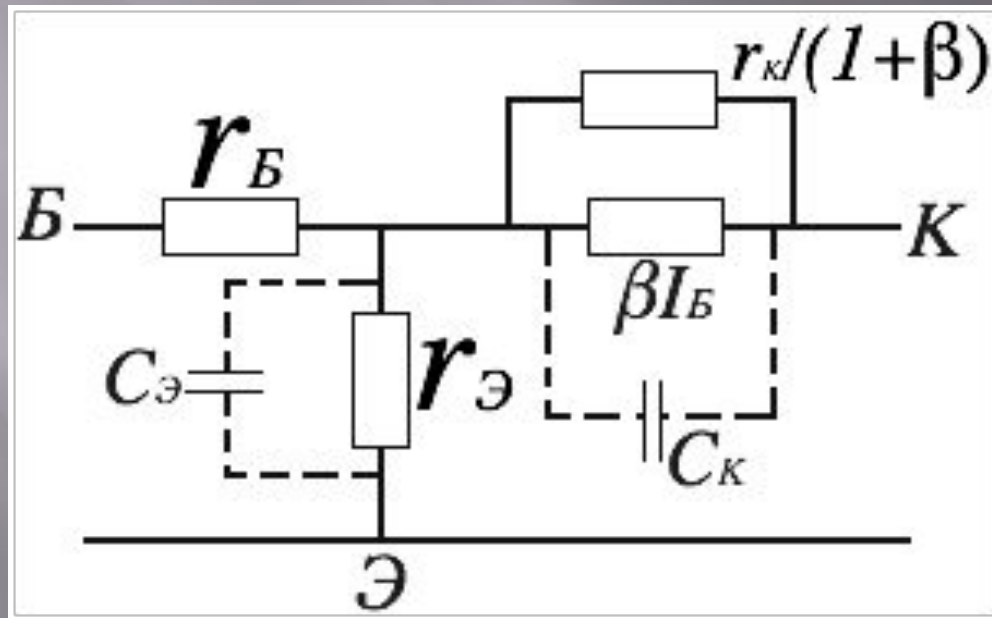
Ничем не отличается от h-параметров, не привносит ничего нового по сравнению с параметрами транзистора.

Физические

Отражают схему включения транзистора, диапазон частот (частотные свойства), там видны электроды, отображаются особенности конструкции.

## 4.8. Эквивалентные схемы

- Т-образная схема замещения для схемы ОЭ на низких частотах:



- $\beta \approx h_{21\text{Э}}$  – интегральный коэффициент усиления базы.



Сопротивление	Формула	Примерное значение
Эмиттерного перехода	$r_{\text{э}} = \frac{h_{12\text{э}}}{h_{22\text{э}}}$	200-400 Ом
Базы	$r_{\text{б}} = h_{11\text{э}} - \frac{h_{12\text{э}}}{h_{22\text{э}}} (1 + h_{21\text{э}})$	20-40 Ом
Коллекторного перехода	$r_{\text{к}} = \frac{1 + \beta}{h_{22\text{э}}}$	<u>Высокое</u> : сотни кОм

- На ВЧ добавляются ёмкости  $C_{\text{э}}, C_{\text{к}} \Rightarrow \beta$  .

## 4.9. Влияние различных факторов на параметры транзистора

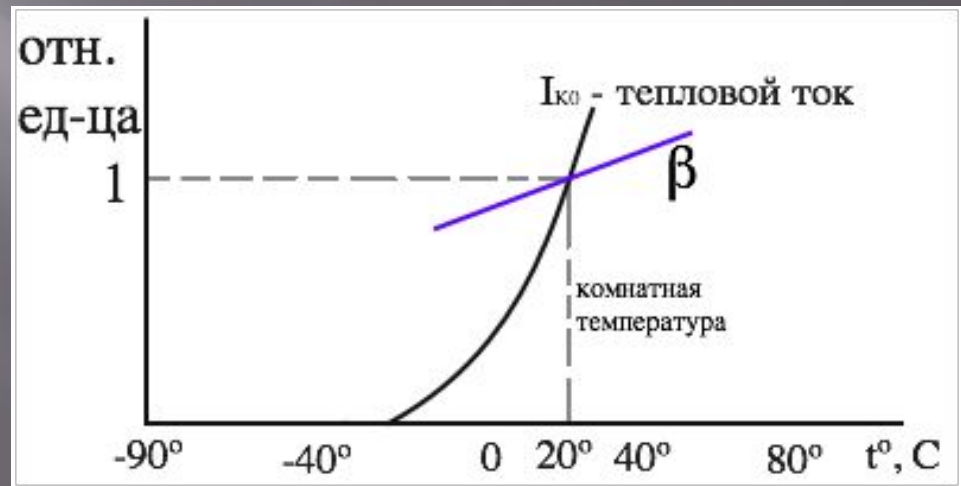
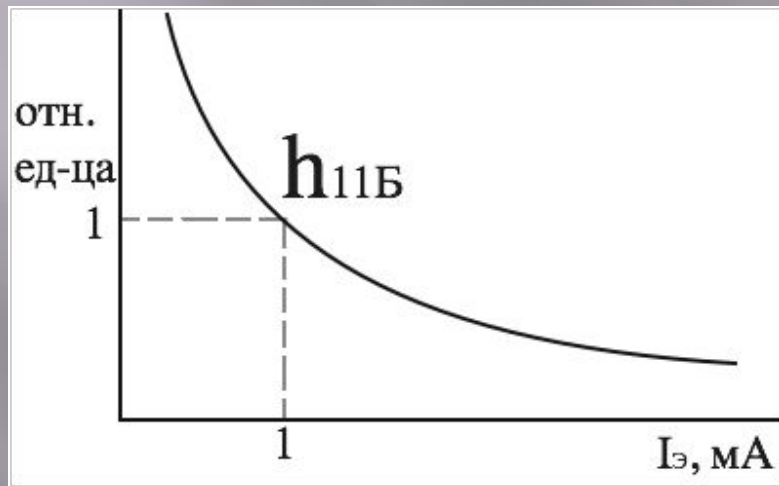
- База транзистора обладает сопротивлением => проходящие через неё токи могут создавать на этом сопротивлении падения напряжения, которое прикладывается к переходам транзистора, образуя обратные связи.

# 4.9. Влияние различных факторов на параметры транзистора

Токи в области базы:	Описание	Связана с:		Путь тока
$I_{B1} \approx \frac{I_{\text{Э}}}{h_{21\text{Э}}}$	Постоянная составляющая	С рекомбинацией		Из активных областей базы к выводу базы
$I_{B2} \approx \frac{I_{\text{Э}}}{h_{21\text{Э}}}$			+с накоплением носителей	
$I_{B3} \approx U_j$ Э ЭБ	Переменная составляющая	С зарядом $C_{\text{Э}}$		
$I_{B4} = I_{K0}$	Обратный ток коллекторного перехода			От коллекторного перехода к выводу базы
$I_{B5} \approx U_j$ К КБ	Ток заряда ёмкости коллектора			

# 4.9. Влияние различных факторов на параметры транзистора

- Эти токи протекают в базе и образуют обратные связи.

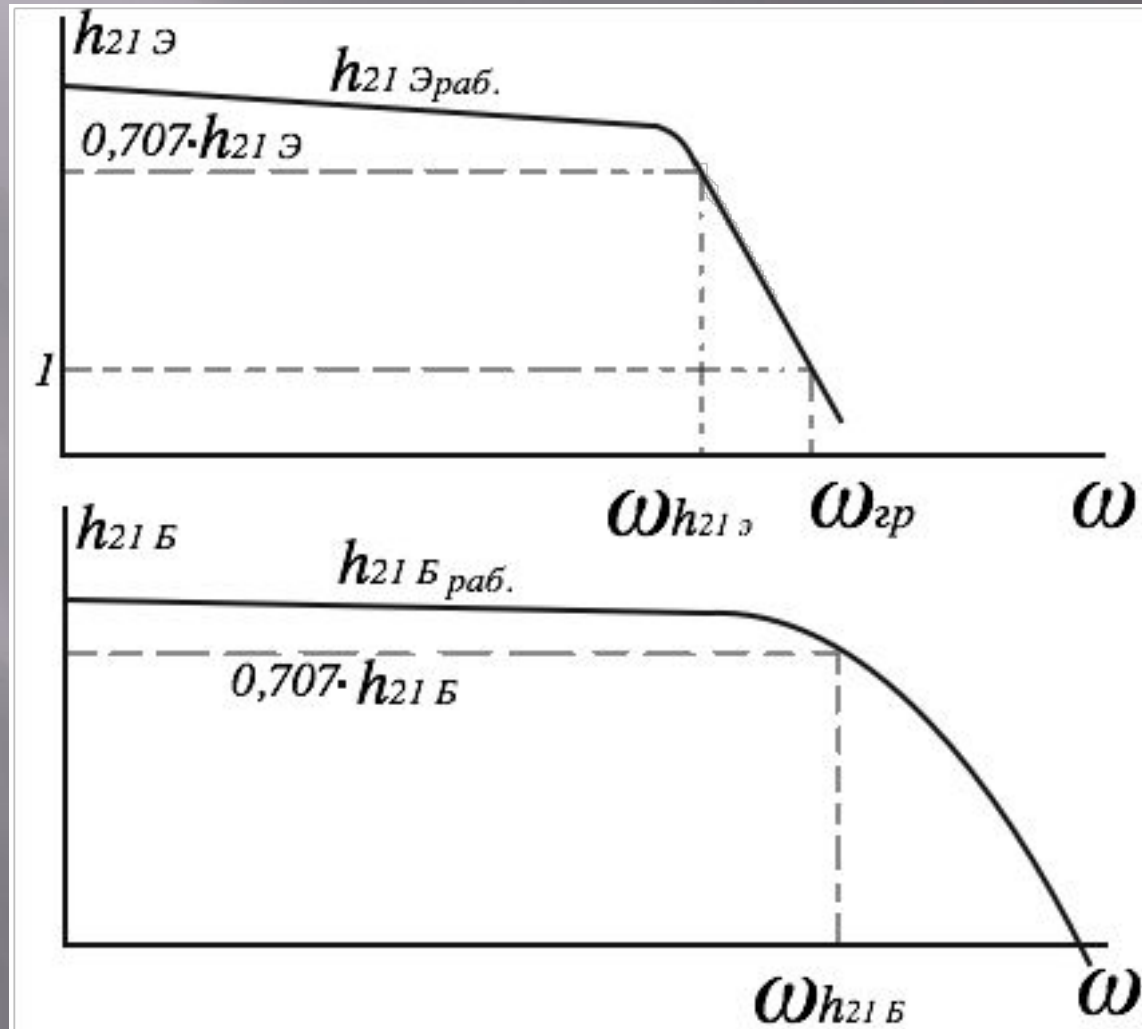


# 4.10. Частотные свойства

- Существует 3 частоты:

Обозначение	Название	Это частота, на которой...
$\omega_{h_{21э}}$	Предельная частота коэффициента усиления $I_B$	Параметр $h_{21э}$ уменьшается в $\sqrt{2}$ раз
$\omega_{гр}$	Граничная частота	Параметр $h_{21э} = 1$ .
$\omega_{h_{21б}}$	Предельная частота коэффициента передачи $I_э$	Параметр $h_{21б}$ уменьшается в $\sqrt{2}$ раз

# 4.10. Частотные свойства

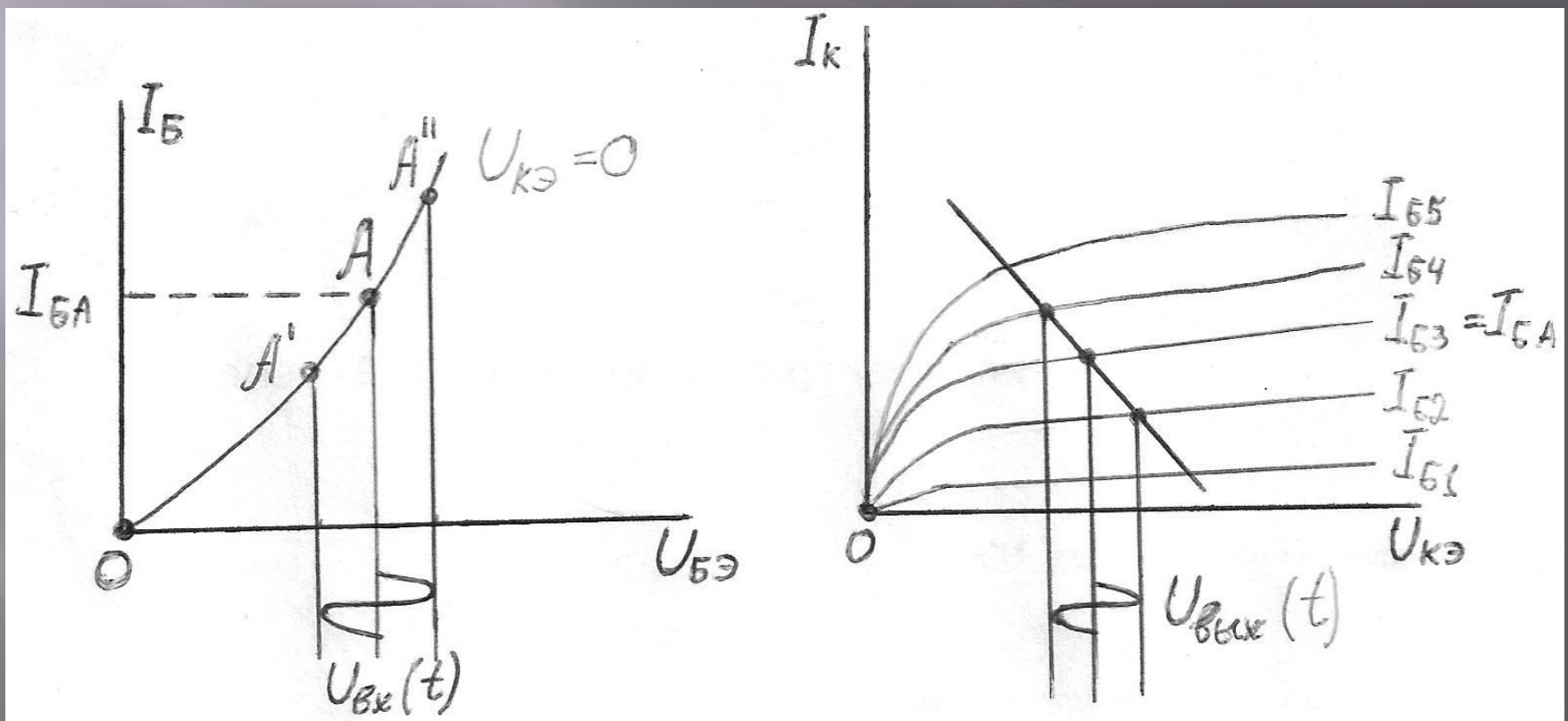


# 4.11. Транзистор в режиме усиления

Режим	Точка покоя	Искажения	КПД	Применение
А	В середине активного режима	Минимальные	<10% Т.к. точка покоя находится высоко по характеристике (велика постоянная составляющая, не являющаяся полезным сигналом)	В маломощных усилителях, где КПД не принципиален
В	В режиме отсечки	Выходной сигнал имеет форму полуволны	>40%	В мощных двухтактных схемах (один транзистор усиливает положительную полуволну, а другой – отрицательную, а на нагрузке суммируются)
С	В режиме отсечки	Выходной сигнал имеет форму узких импульсов		В мощных резонансных усилителях

# 4.11. Транзистор в режиме усиления

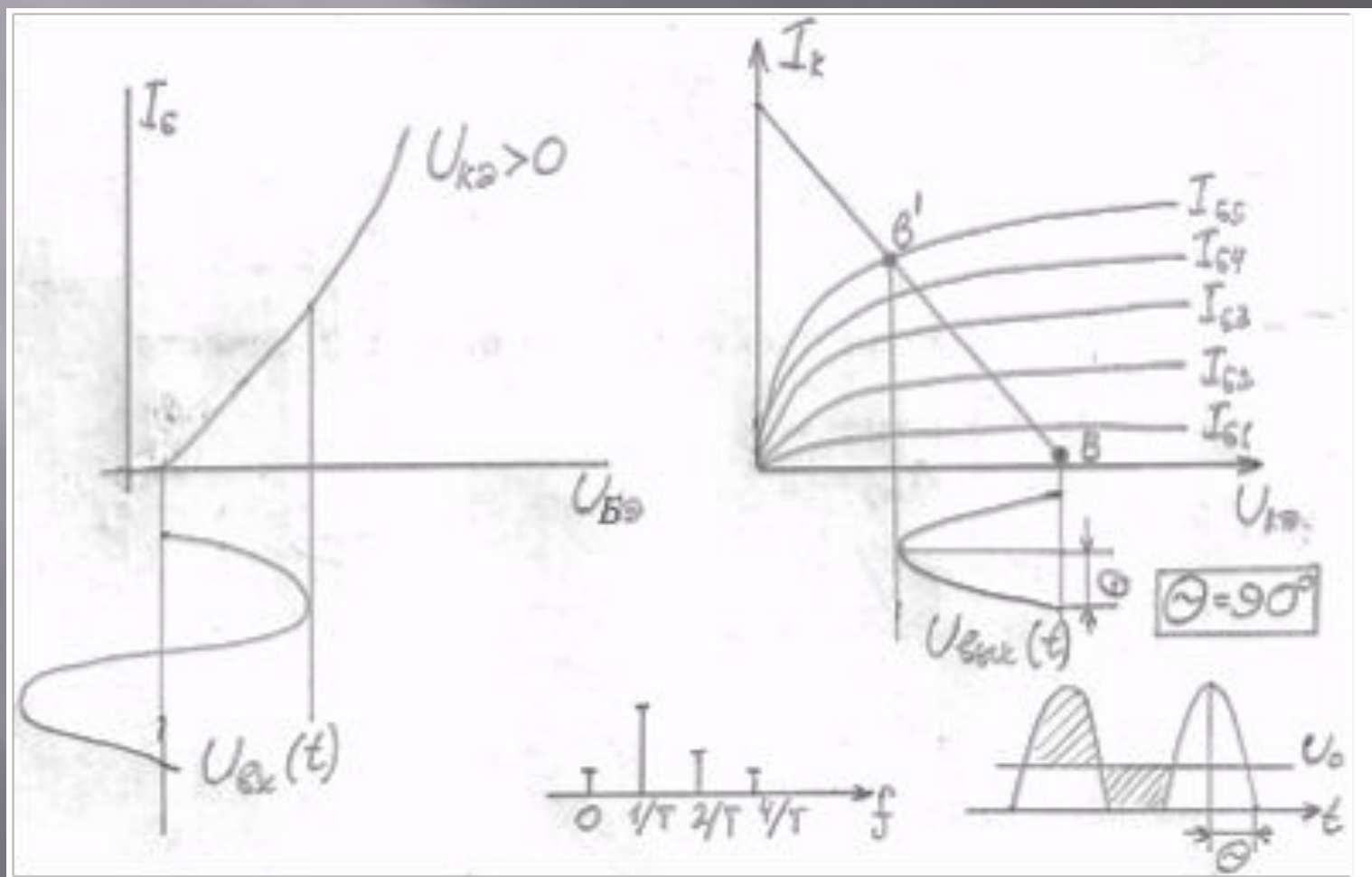
Режим «А»





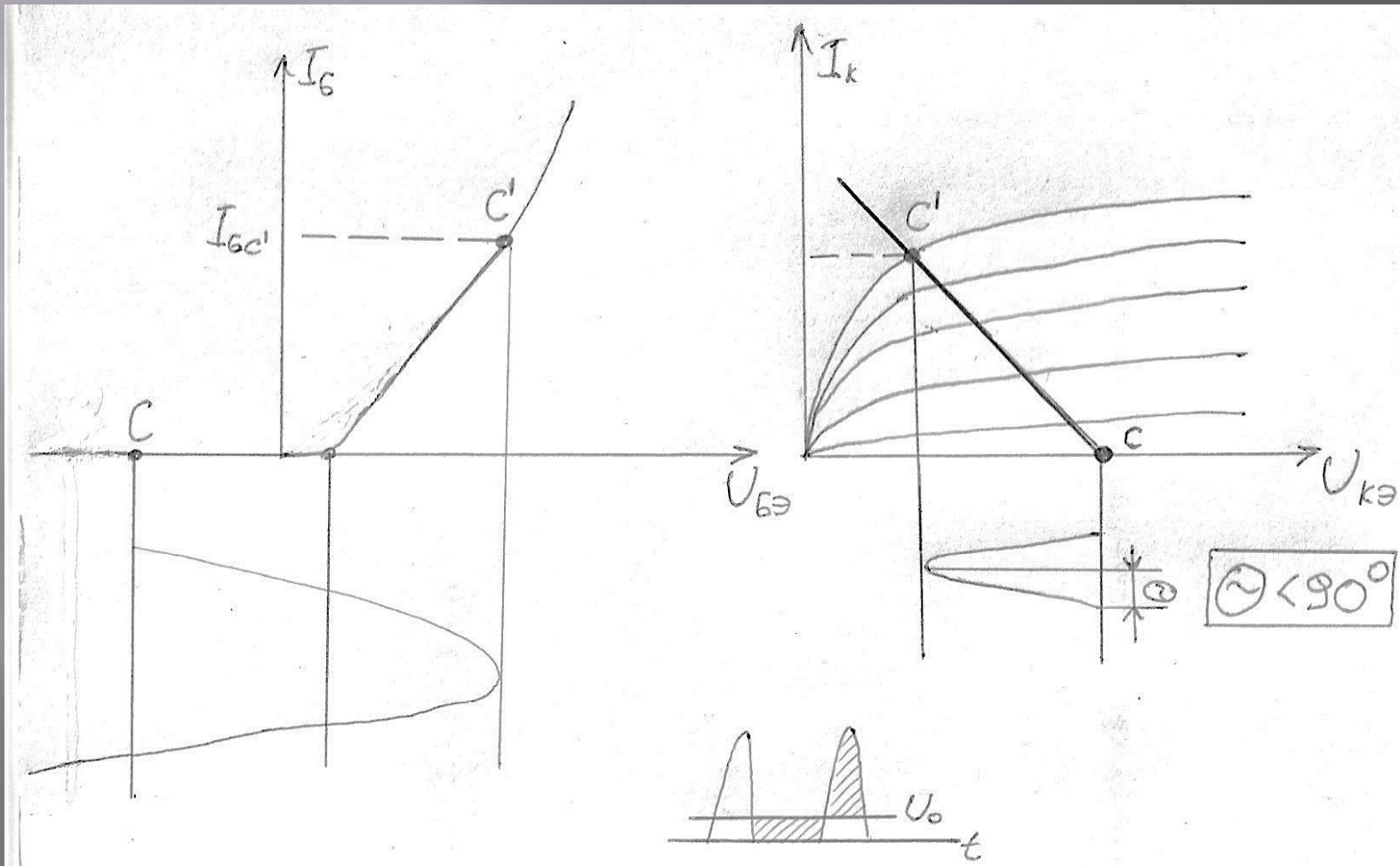
# 4.11. Транзистор в режиме усиления

Режим «В»



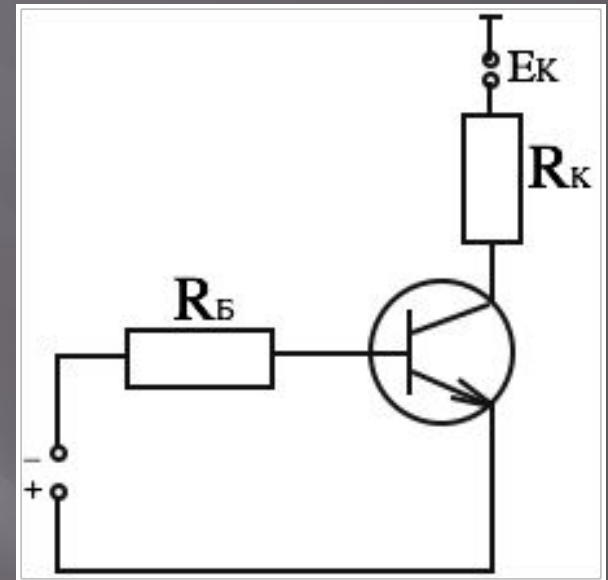
# 4.11. Транзистор в режиме усиления

Режим «С»



## 4.12. Биполярный транзистор в ключевом режиме

- Ключ имеет статические состояния, которые определяются его ВАХ.
- Исходное состояние: может быть открыт (тока покоя определяет насыщенное состояние ключа или состояние его в верхней точке активного режима).
- Закрытое состояние ключа – в режиме отсечки или рядом. Это схема ОЭ. Иногда это инверсное включение (когда коллектор и эмиттер меняются местами).



## 4.12. Биполярный транзистор в ключевом режиме

### Переходные процессы:

- При рассмотрении переходных процессов удобен метод заряда. Суть метода: заряд в базе  $Q = \tau_{\beta} I_{\text{Б}}$
- $\tau_{\beta}$  – постоянная времени коэффициента  $\beta$ , величина справочная.

## 4.12. Биполярный транзистор в ключевом режиме

В режиме отсечки  $Q_{\text{отс}} = 0$ . Дальше  $Q$  нарастает, достигает граничного значения  $Q_{\text{гр}} = \tau_{\beta} I_{\text{БН}}$  при достижении режима насыщения.

Появляется избыточный заряд в базе

$$Q_{\text{изб}} = Q - Q_{\text{гр}} = \tau_{\beta} (I_{\text{Б}} - I_{\text{БН}})$$

т.е. накапливаются неосновные носители. При воздействии скачкообразного  $u$ :

$$\Delta Q(t) = \tau_{\beta} \Delta I_{\text{Б}} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\beta}}})$$

$$\Delta I(t) = \beta \Delta I_{\text{Б}} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\beta}}})$$

## 4.12. Биполярный транзистор в ключевом режиме

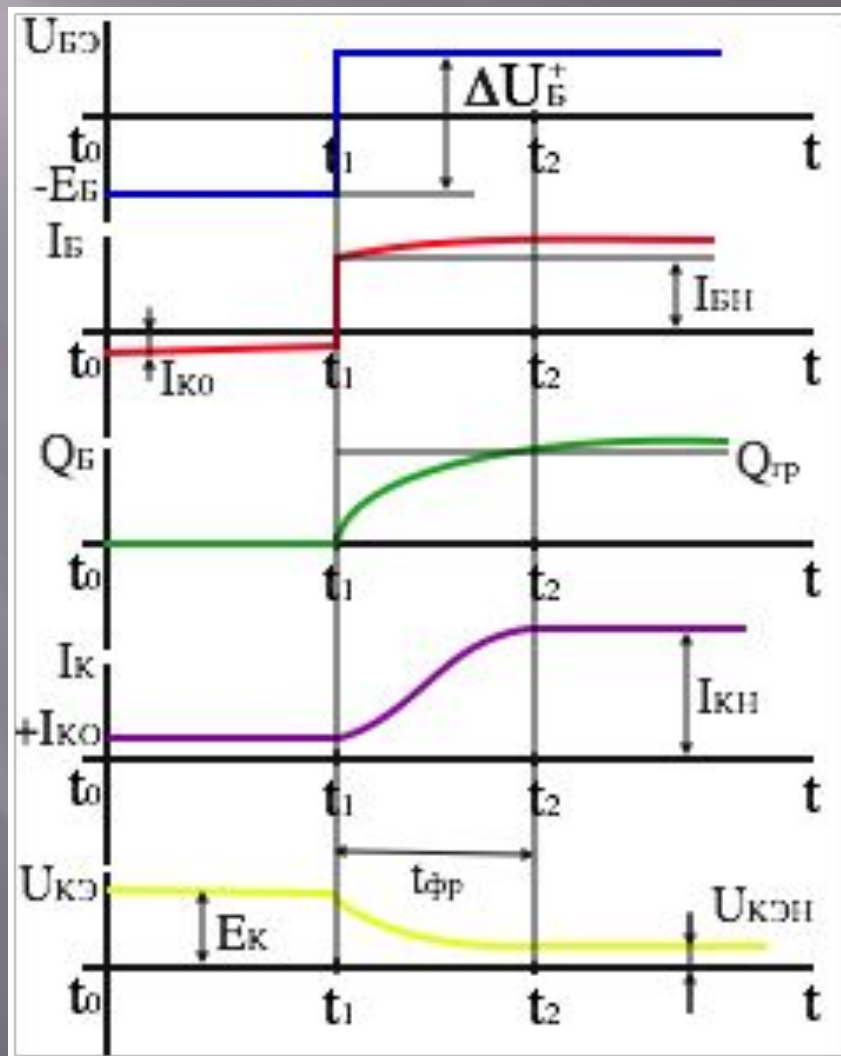
Длительность включения:

- В исходном состоянии транзистор закрыт. В транзисторе есть входная ёмкость между базой и эмиттером.

$$t_{вкл} = t_{подг} + t_{фр}^-$$

- $t_{подг}$  - выразится в задержке  $U_{вых}$  и тока (на эюре не показано).
- В  $t_2$  изменения на выходе прекращаются.
- $t_{фр}^-$  - время фронта отрицательного направления.

# 4.12. Биполярный транзистор в ключевом режиме



## 4.12. Биполярный транзистор в ключевом режиме

### □ Длительность выключения

$$t_{\text{выкл}} = t_{\text{рас}} + t_{\text{фр}}^+$$

- $t_{\text{рас}}$  – время рассасывания избыточных носителей.
- $t_{\text{фр}}^+$  – время фронта положительного направления.



## 4.12. Биполярный транзистор в ключевом режиме

