

ТЕМА 4. ТРАНЗИСТОРЫ



microelectronics group

Lucent Technologies
Bell Labs Innovations

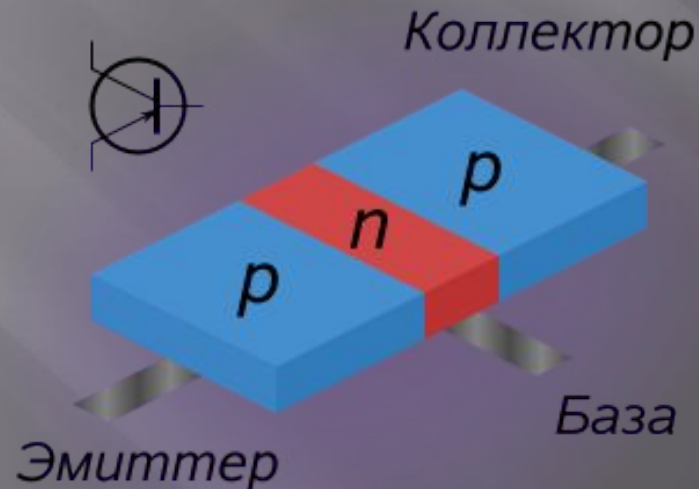


A replica of the first transistor,
invented at Bell Labs,
December 23, 1947

50 Years and Counting...

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

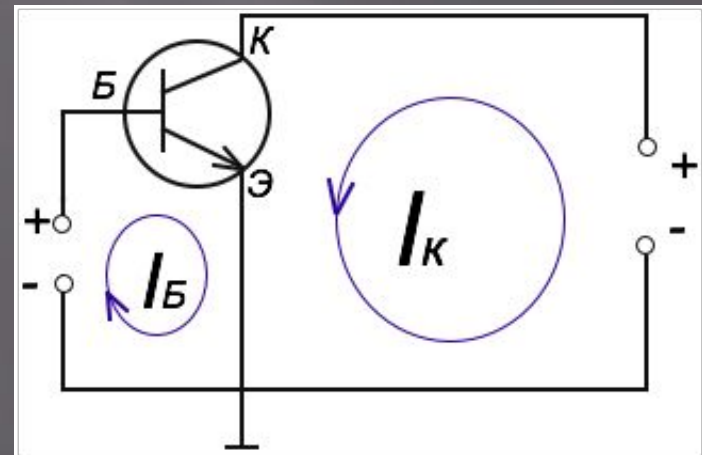
Два правила:

- 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

- $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{БЭ}}$

- $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ЭК}}$



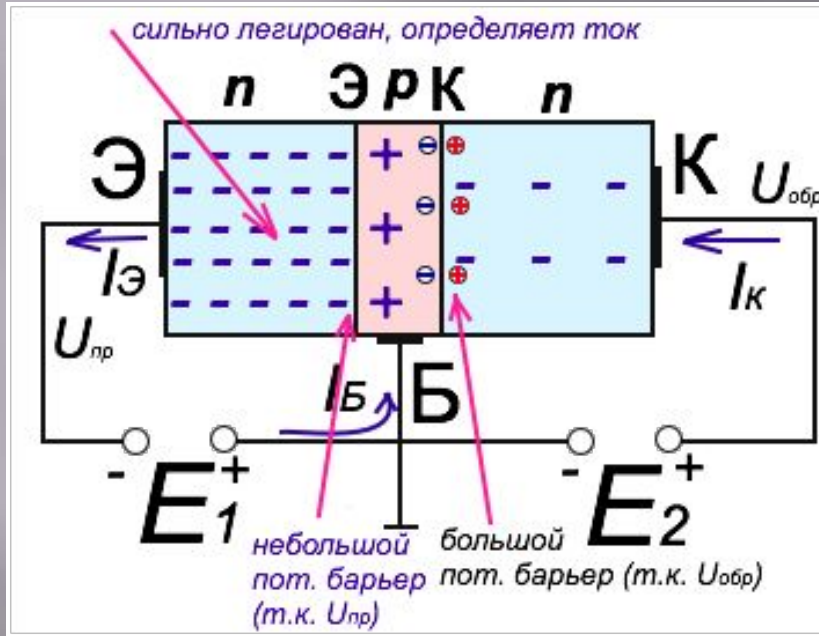
4.1. Общие сведения

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)
- $I_{\text{ВЫХ}} < I_{\text{ВХ}}$

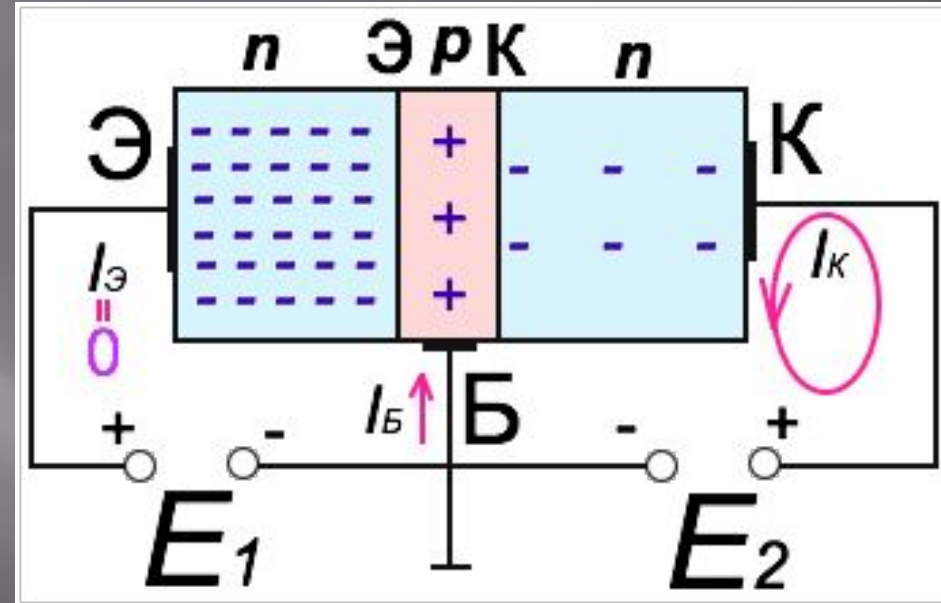
4.2. Физические процессы



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. Статические характеристики

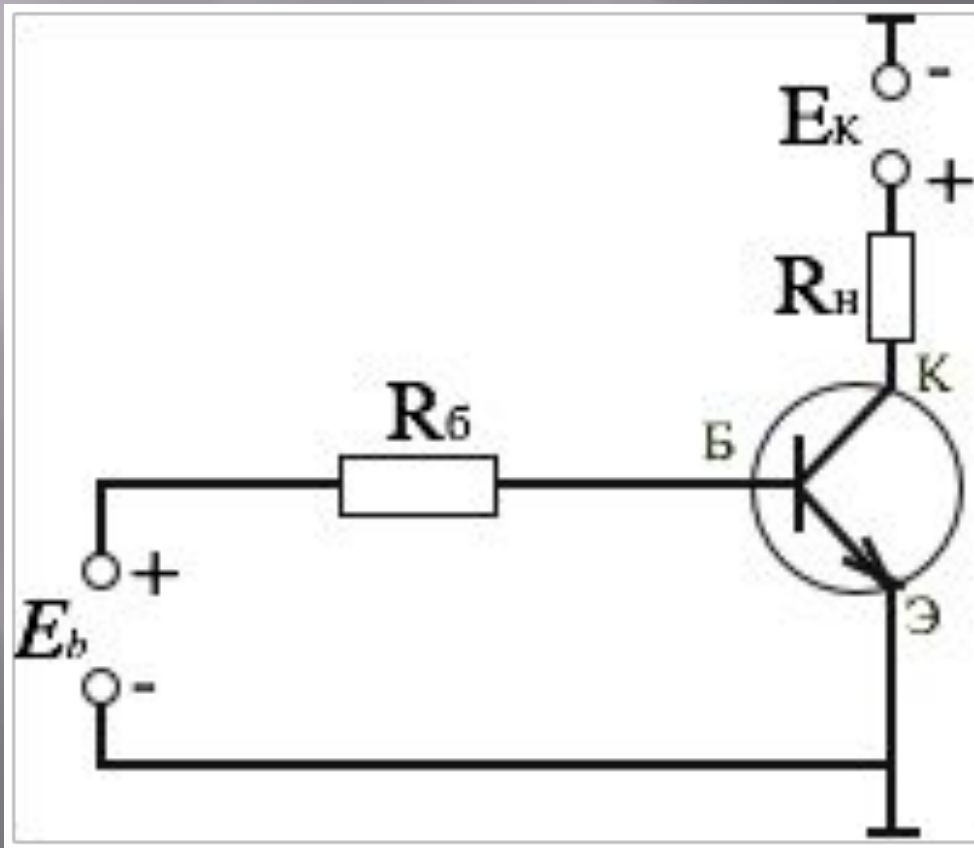
$$I_1 = f_1(I_2, U_2) \quad I_2 = f_1(U_1, I_1)$$

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

- 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.

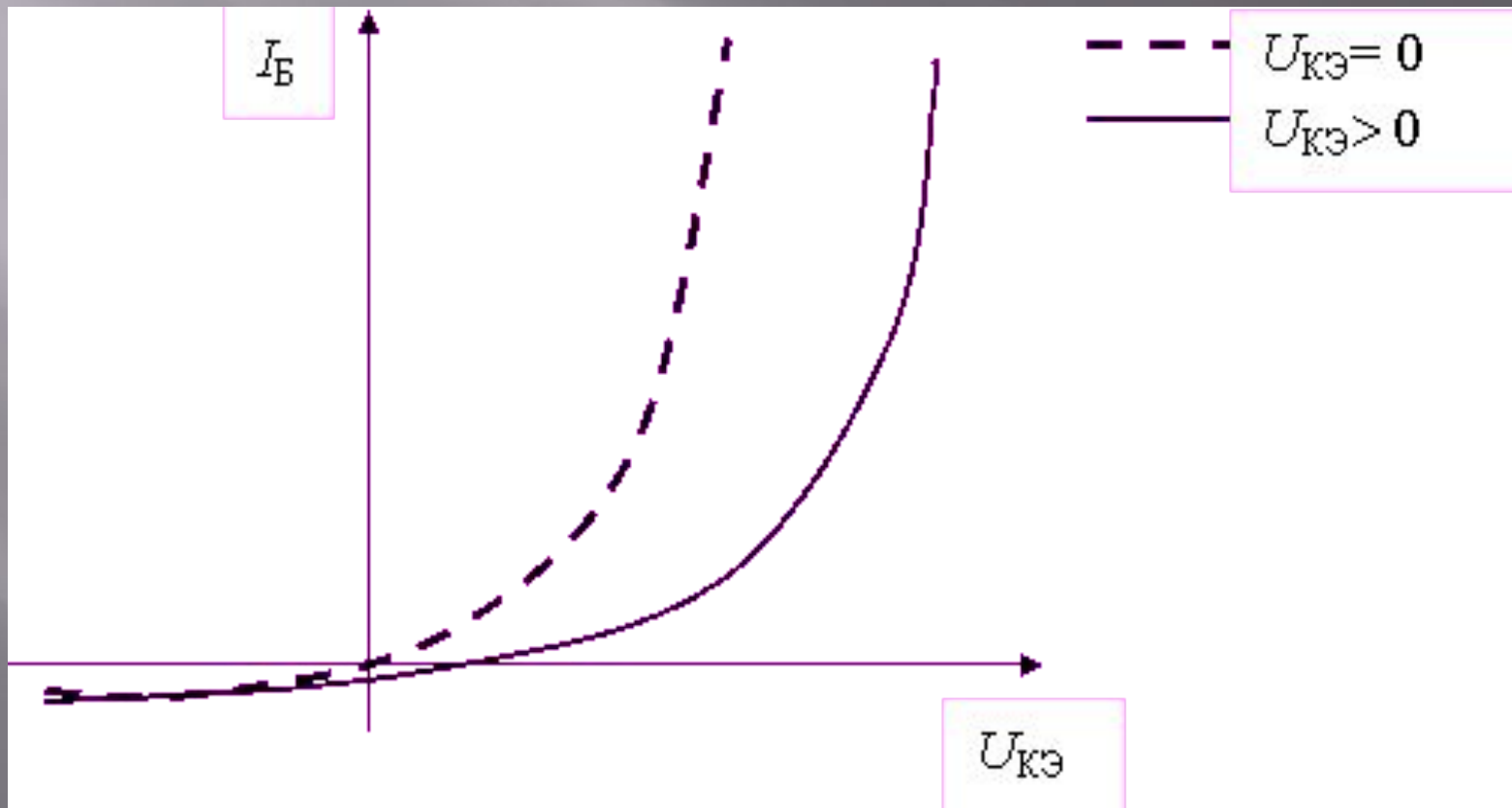
4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

$$I_{\text{б}} = I_{\text{вх}}$$



4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

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

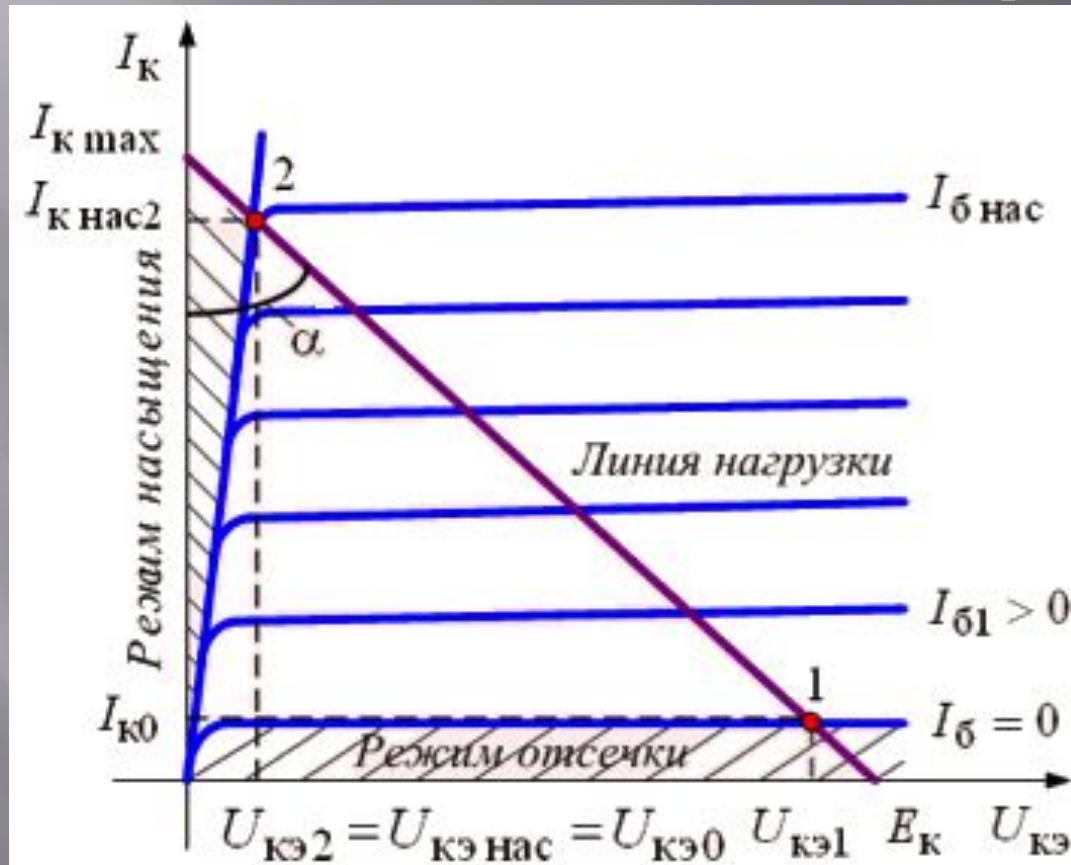


4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

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

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

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)
 $r_{\text{тр}}^{-1} \approx \infty$ $U_{\text{КЭ}}^{-} \approx E_{\text{К}}$

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: $I_B \geq I_{Бн}$

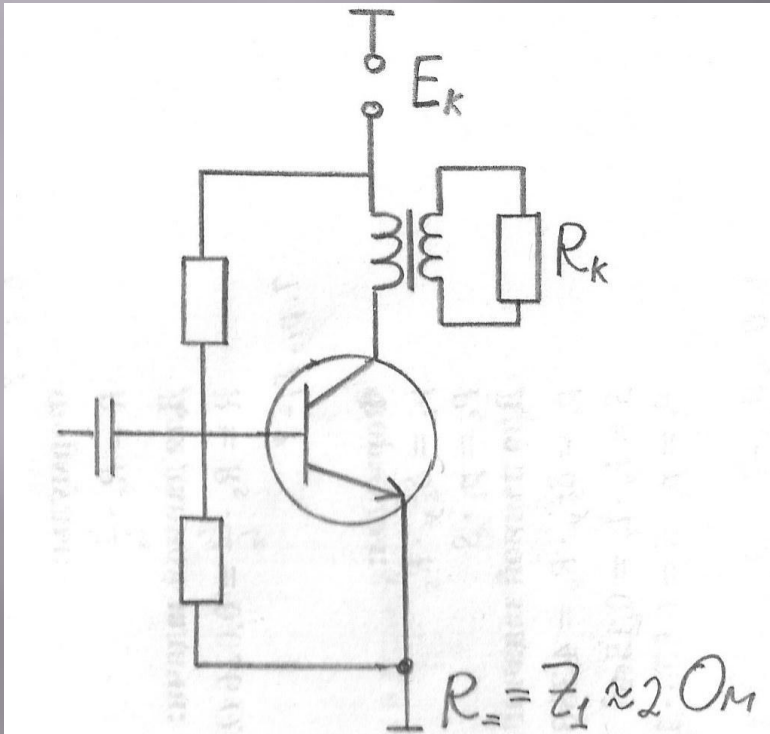
- ▣ $I_{Бн}$ – параметр кривой, исходящей из точки MN.

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

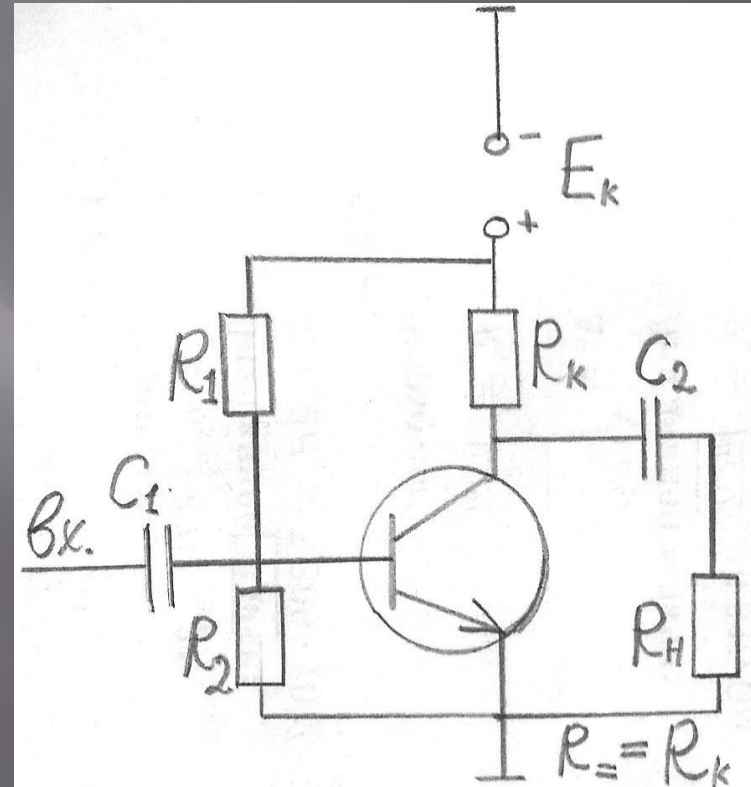
4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

- ▣ 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

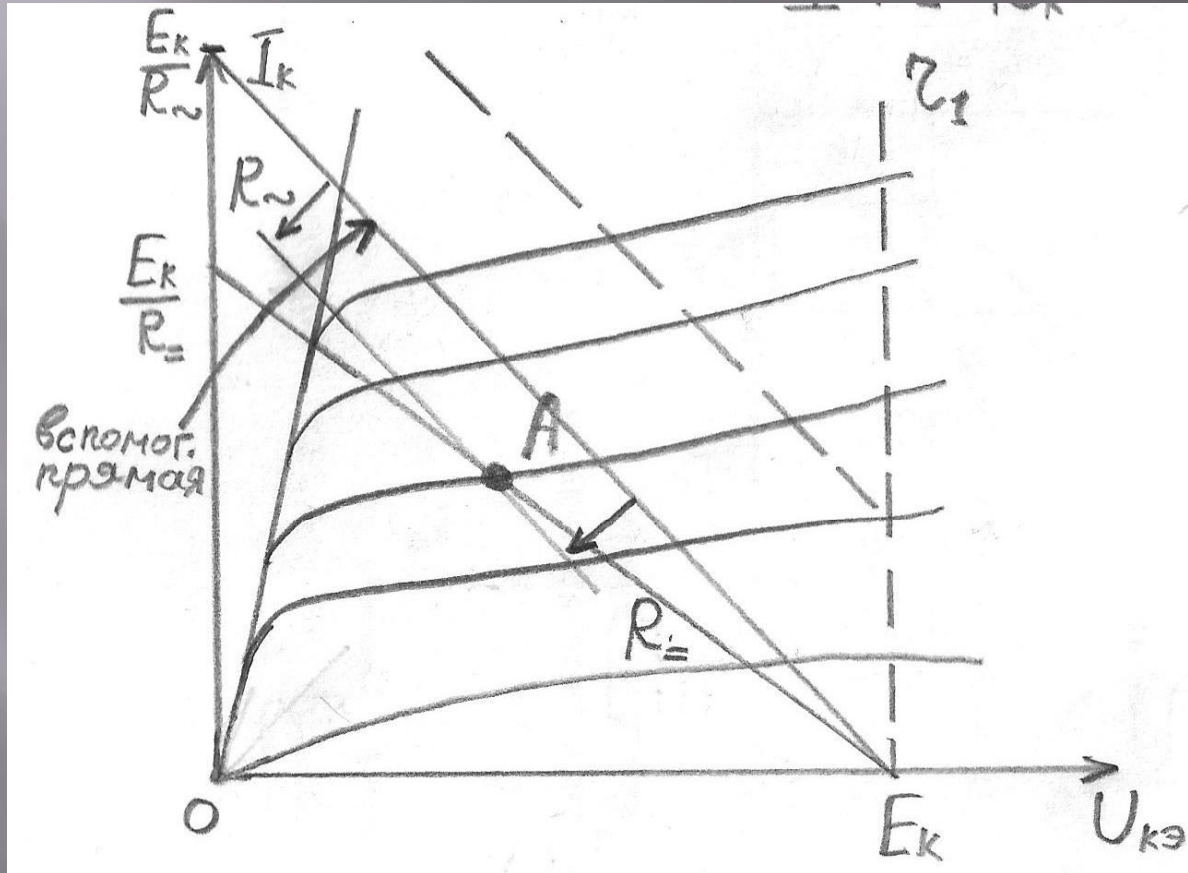


Мощный усилитель
схема



Маломощная

4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима



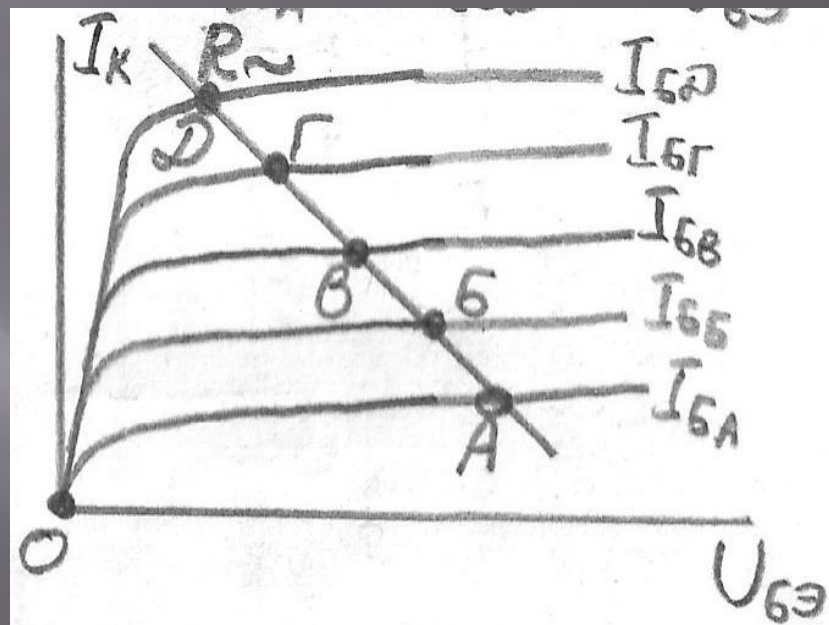
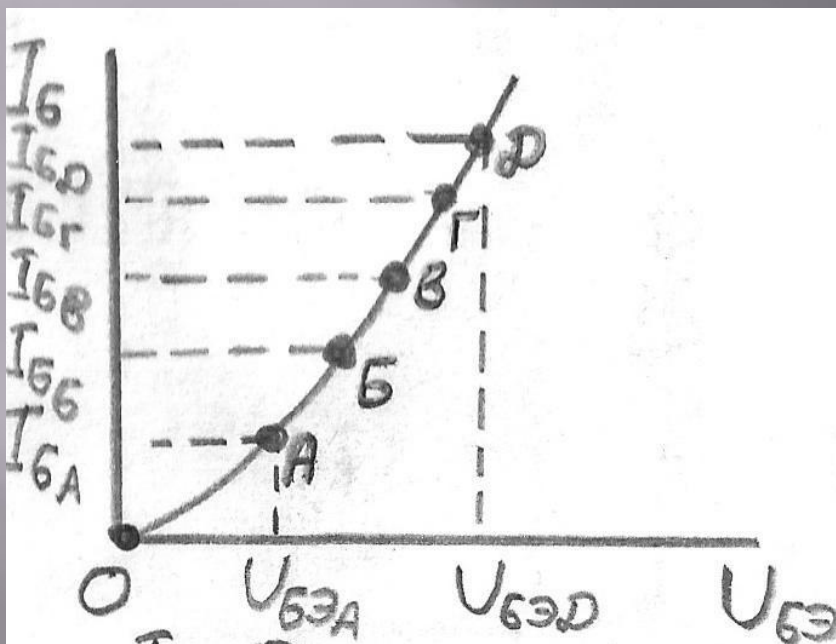
$$R = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}$$

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

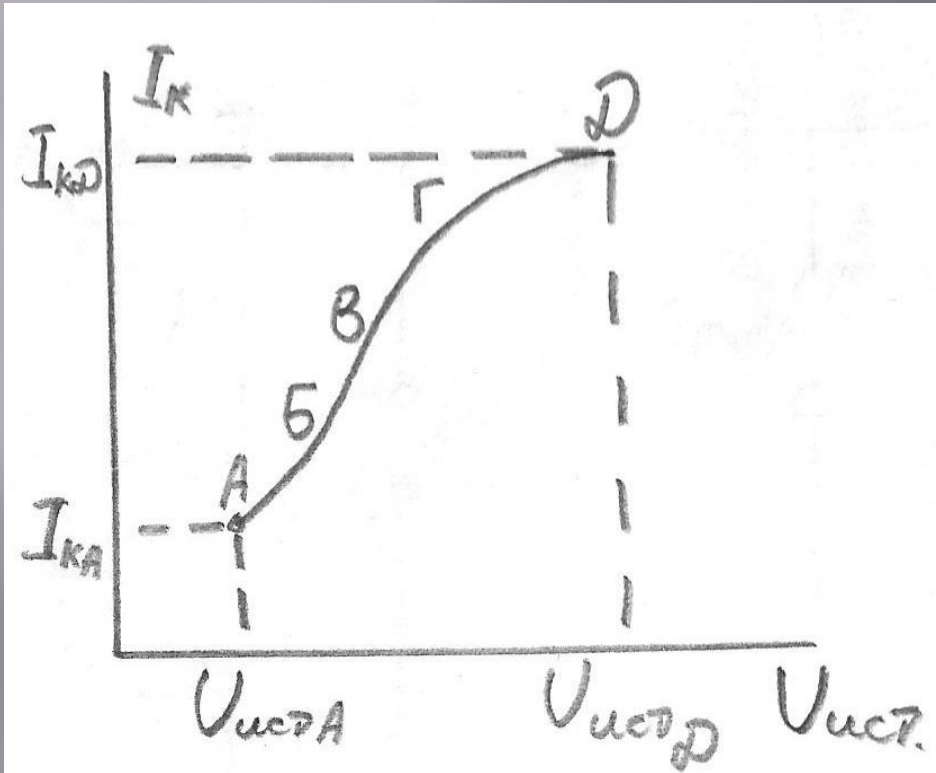
4.4. Статическая ВАХ. Режимы работы. Обеспечение режима

- ▣ 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

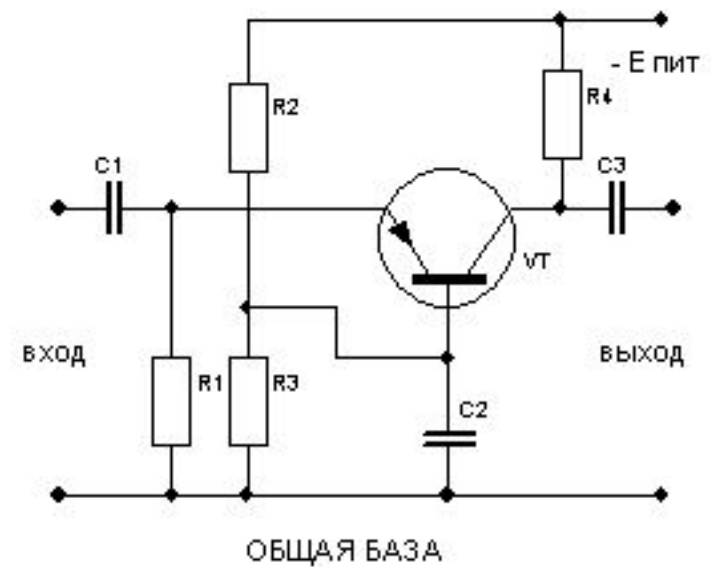
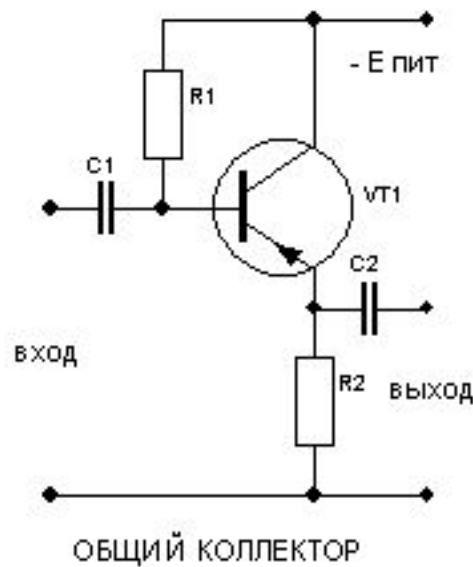
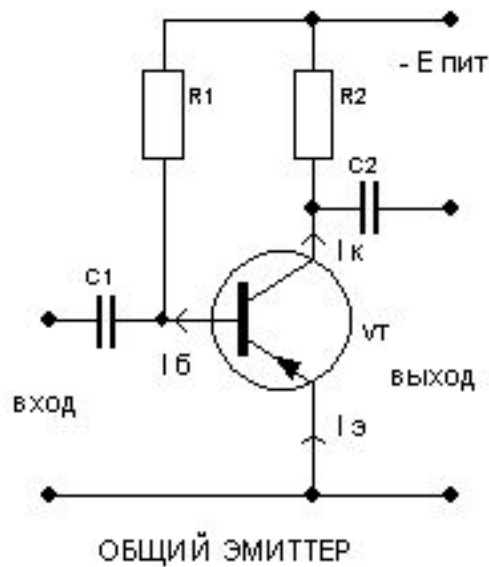
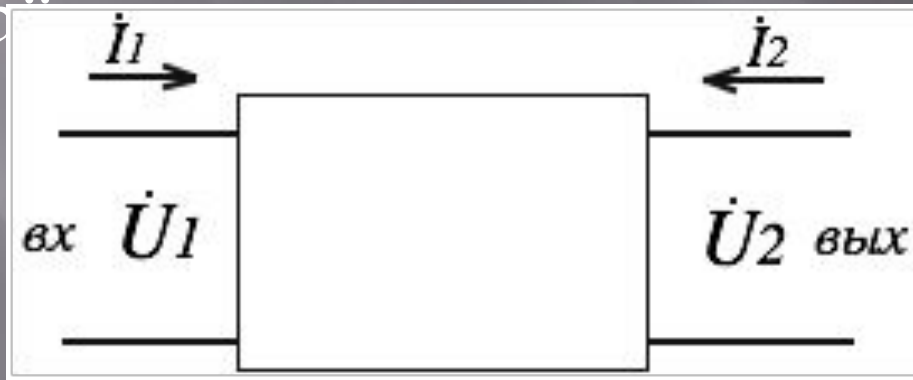


Схема включения	Токи и напряжения	Усилительные свойства	Линейность	Согласование	Схема включения
Общий эмиттер <i>1 место по применимости (>90%)</i>	$I_{ВХ} = I_{Б}, I_{ВЫХ} = I_{К}$ $I_{Э} = I_{Б} + I_{К} = \text{const}$ $U_{ВХ} = U_{БЭ},$ $U_{ВЫХ} = U_{КЭ}$	$K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = U_{КЭ} / U_{БЭ} > 1$ $K_I = I_{ВЫХ} / I_{ВХ} = I_{К} / I_{Б} > 1$ $K_P = K_U K_I \gg 1$	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 (>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:

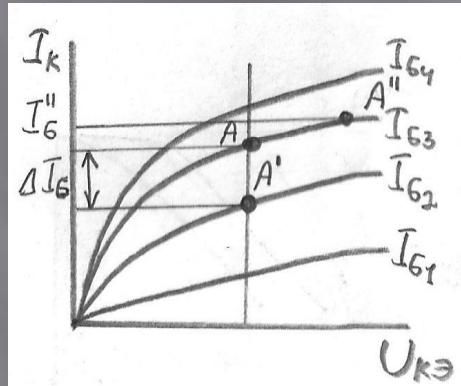
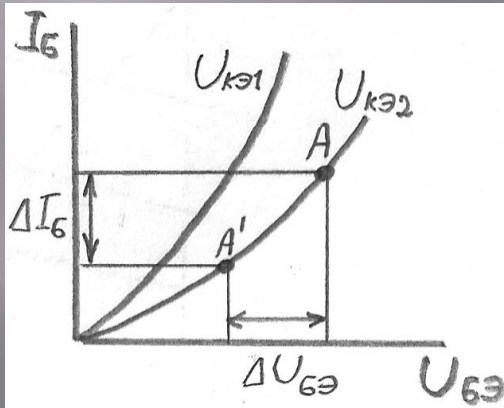
$$\begin{cases} \dot{U}_1 = H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_2 \end{cases}$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

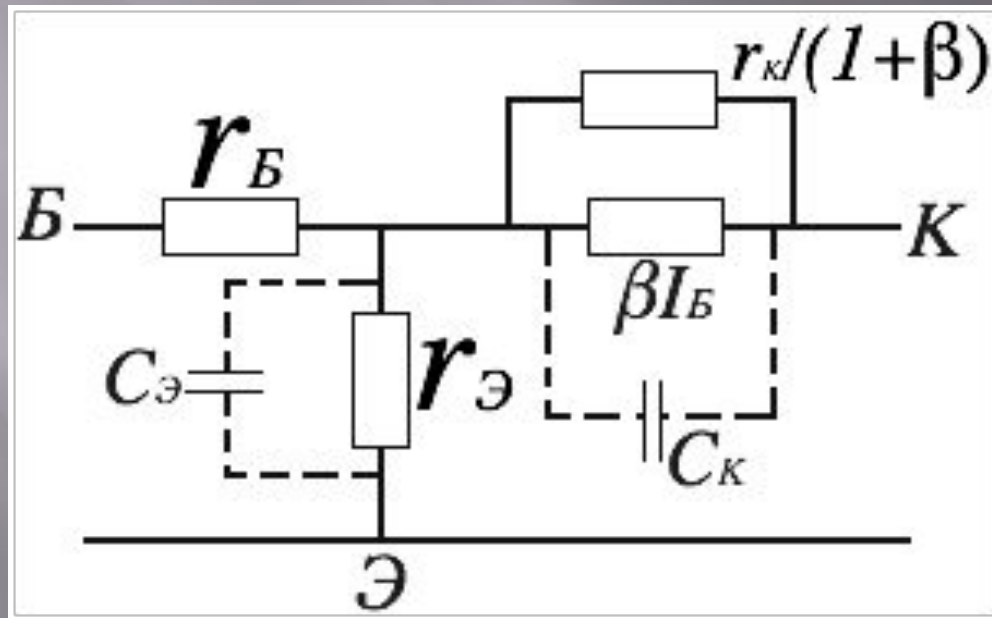
Ничем не отличается от h-параметров, не привносит ничего нового по сравнению с параметрами транзистора.

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

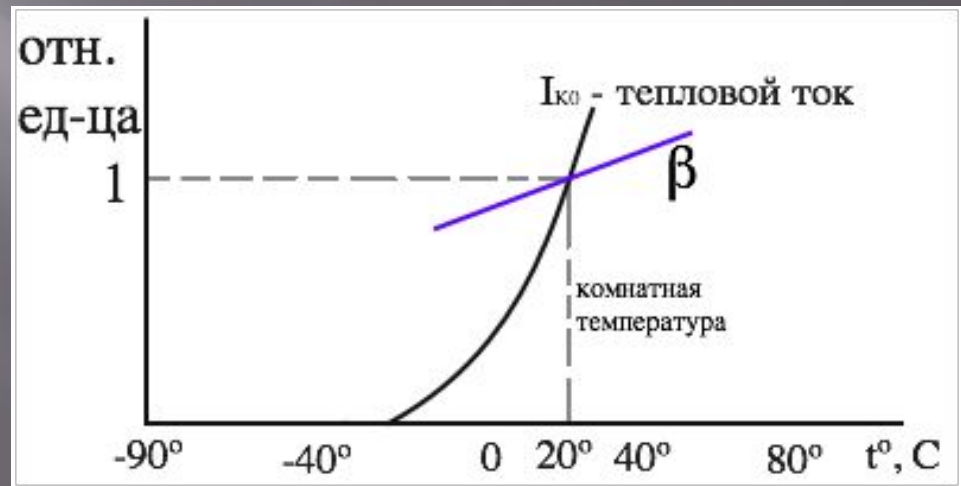
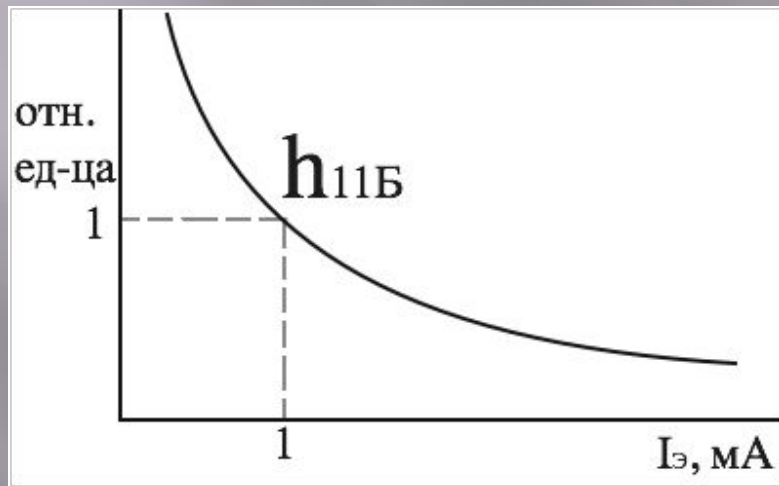
- ▣ База транзистора обладает сопротивлением => проходящие через неё токи могут создавать на этом сопротивлении падения напряжения, которое прикладывается к переходам транзистора, образуя обратные связи.

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.

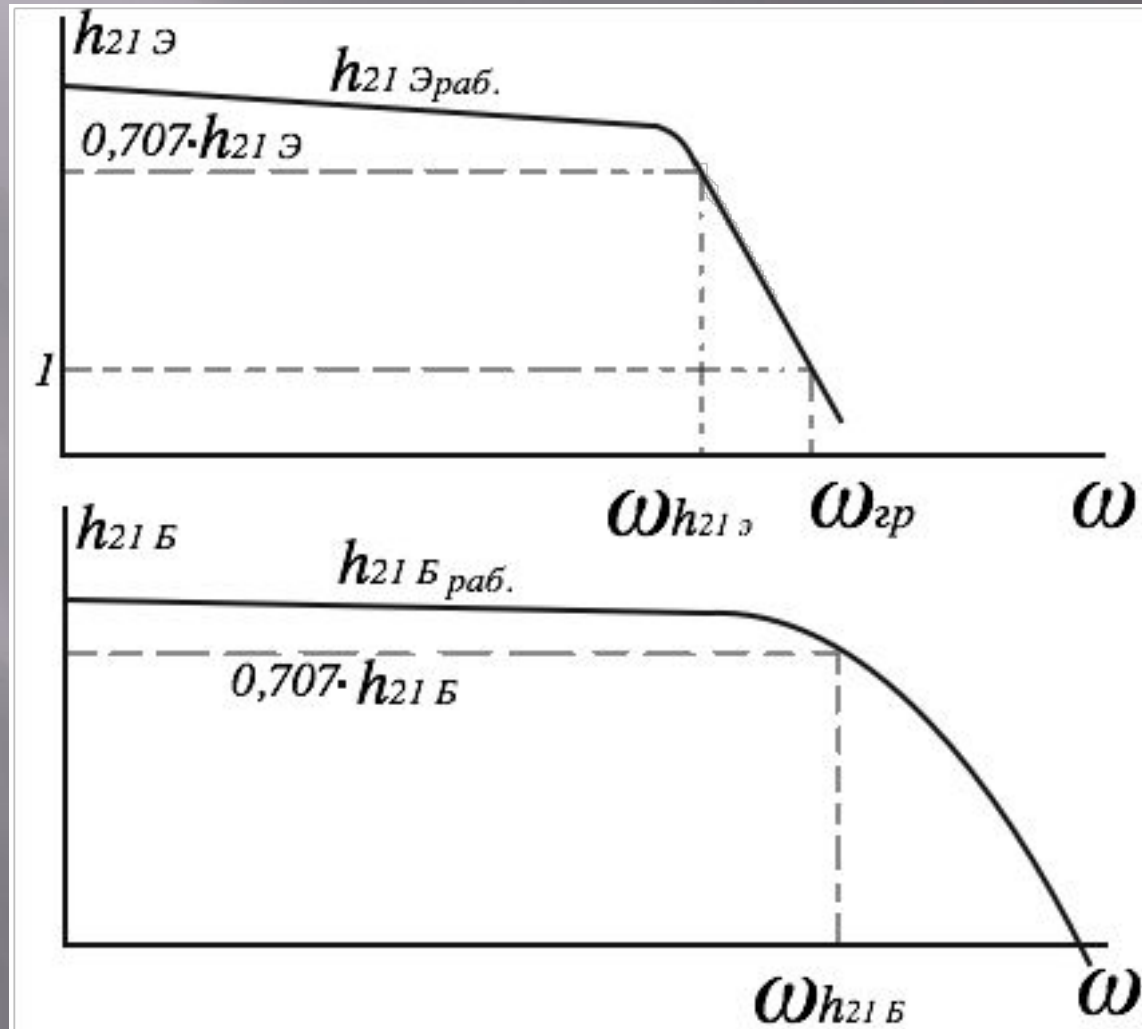


4.10. Частотные свойства

- 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

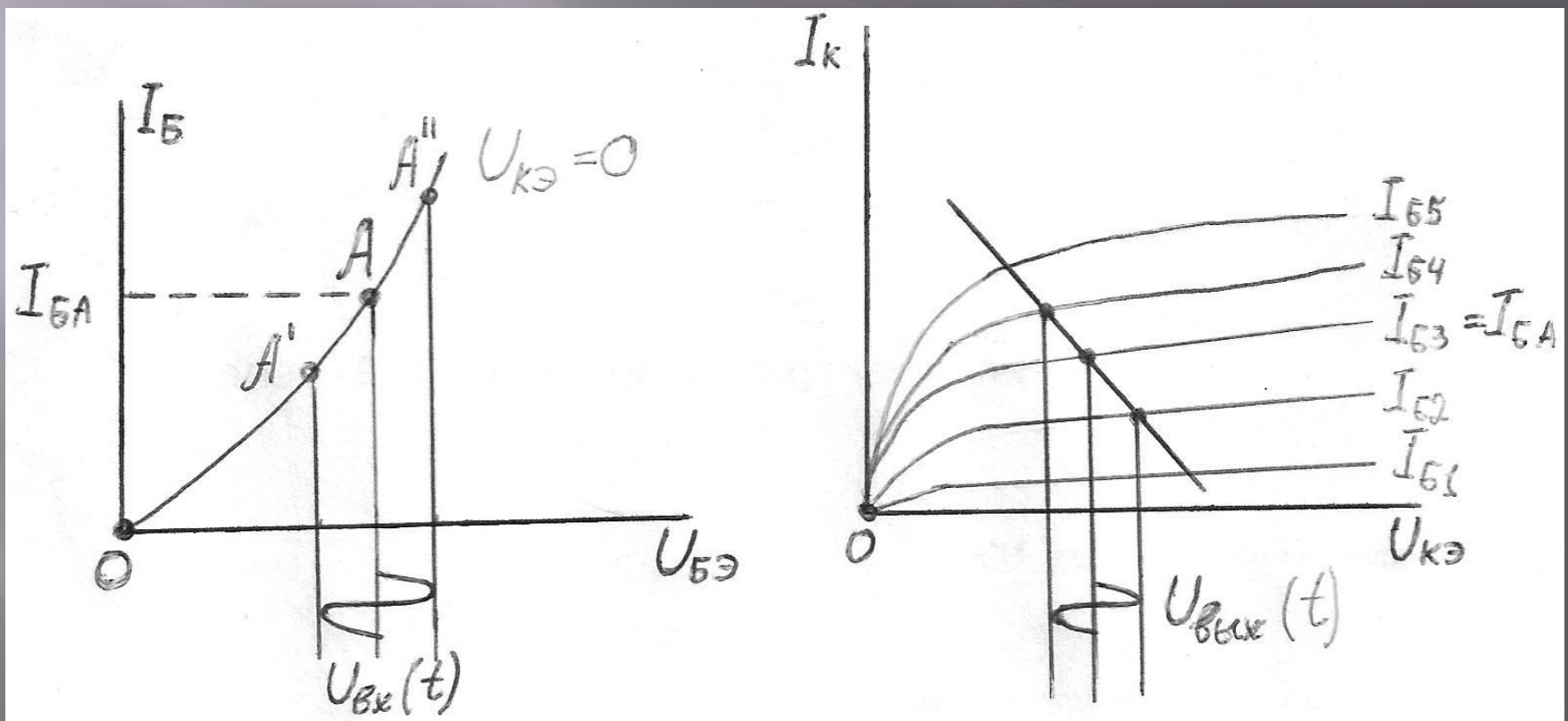


4.11. Транзистор в режиме усиления

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

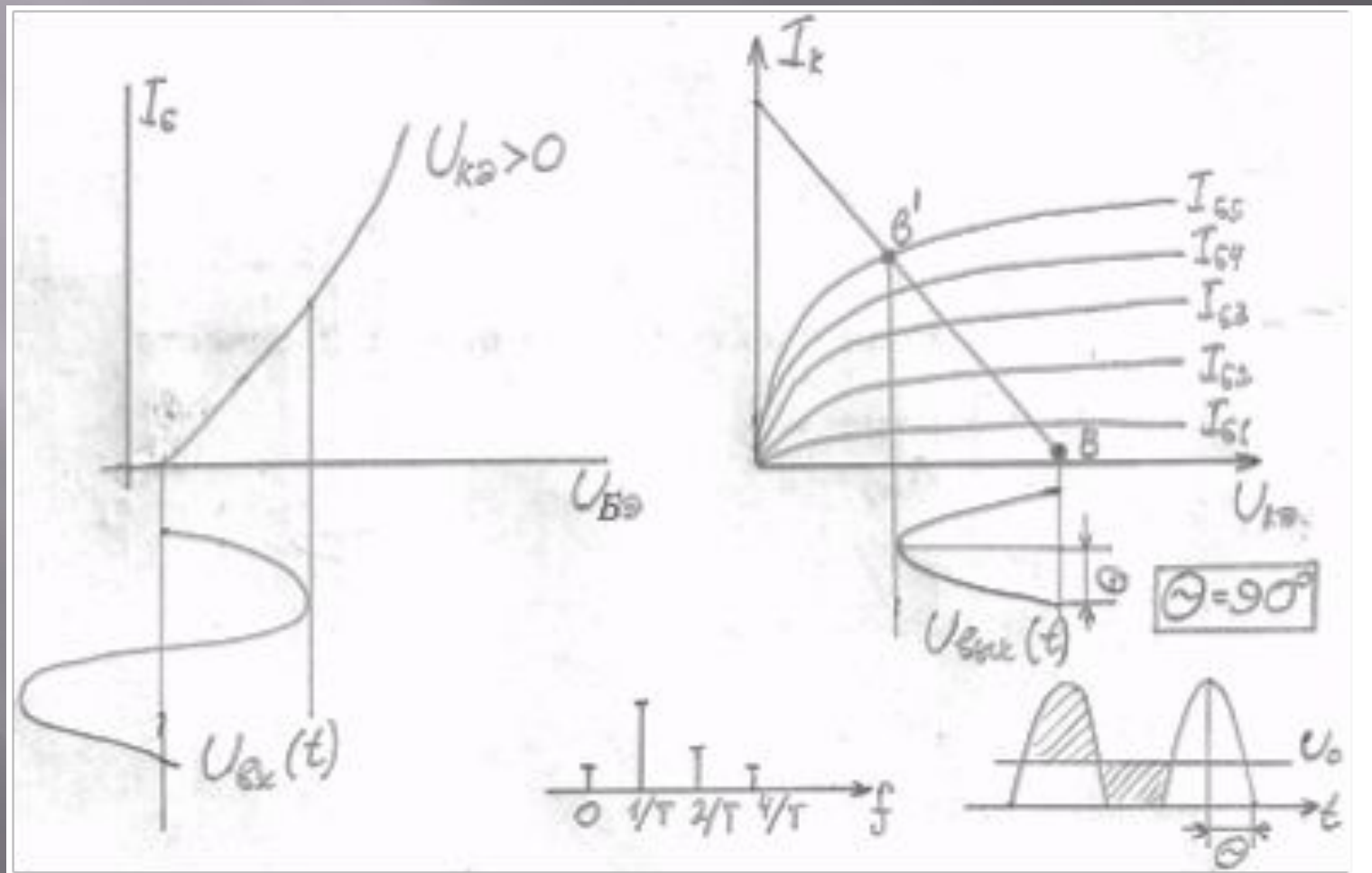
4.11. Транзистор в режиме усиления

Режим «А»



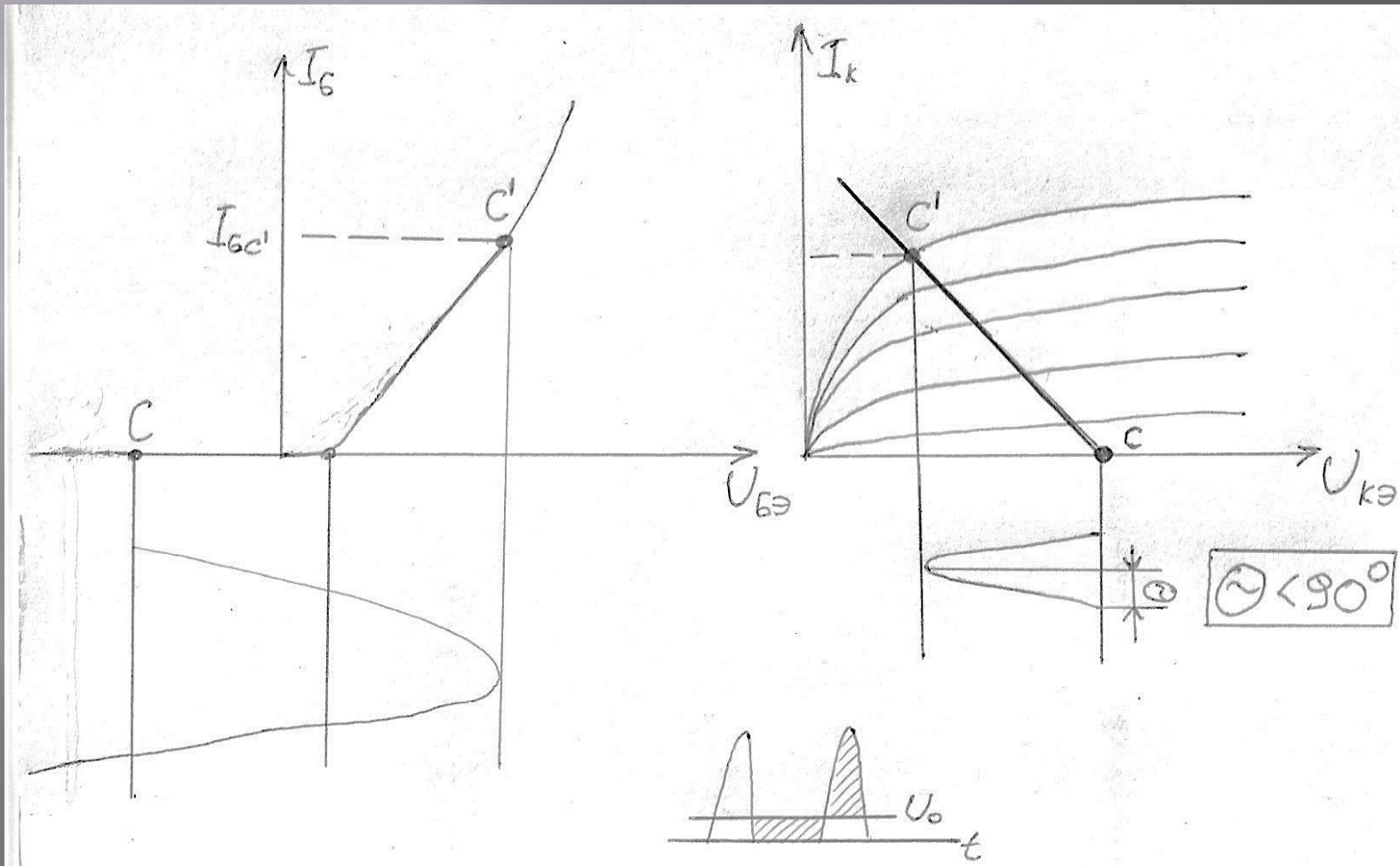
4.11. Транзистор в режиме усиления

Режим «В»



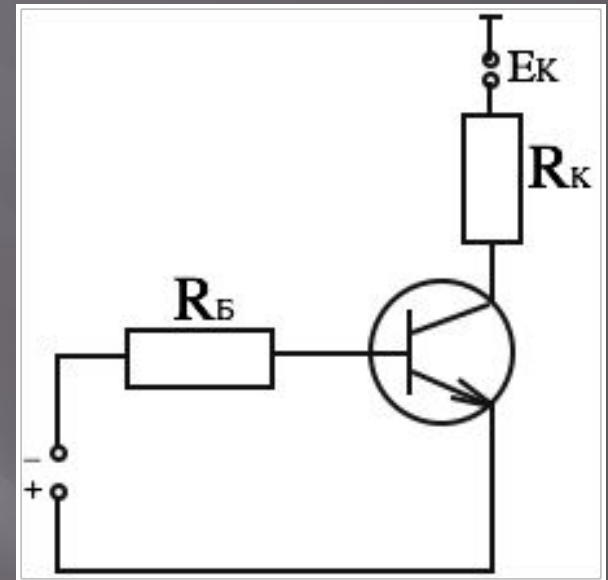
4.11. Транзистор в режиме усиления

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 $Q = \tau_{\beta} I_{\text{Б}}$
- τ_{β} – постоянная времени коэффициента β , 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

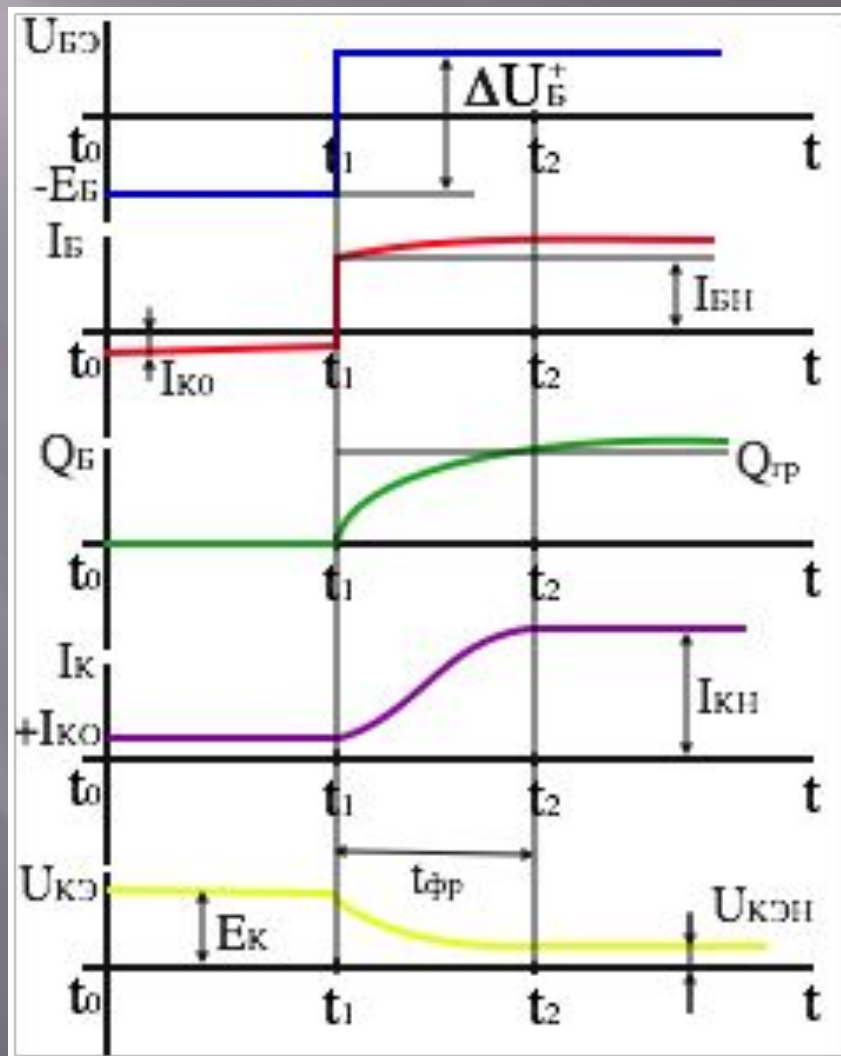
Длительность включения:

- 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

