

# Лекция 7

## Цифровые ключи на биполярных транзисторах

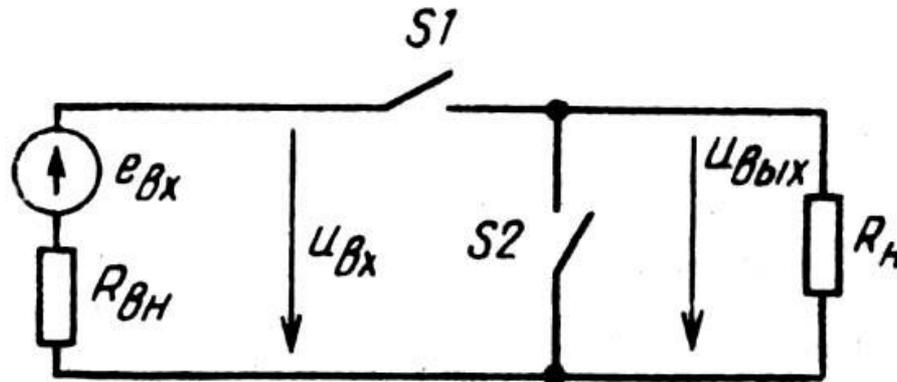
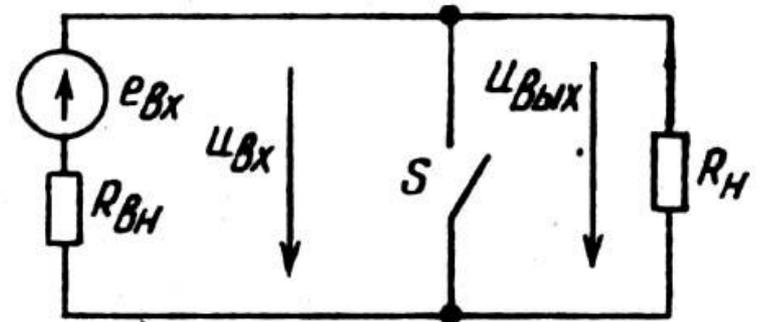
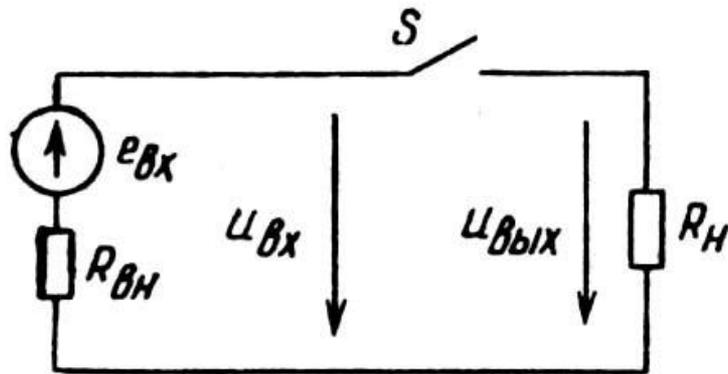
Схемотехника, принципы  
работы, параметры и  
характеристики

**Надо** много учиться, чтобы знать  
хоть немного.

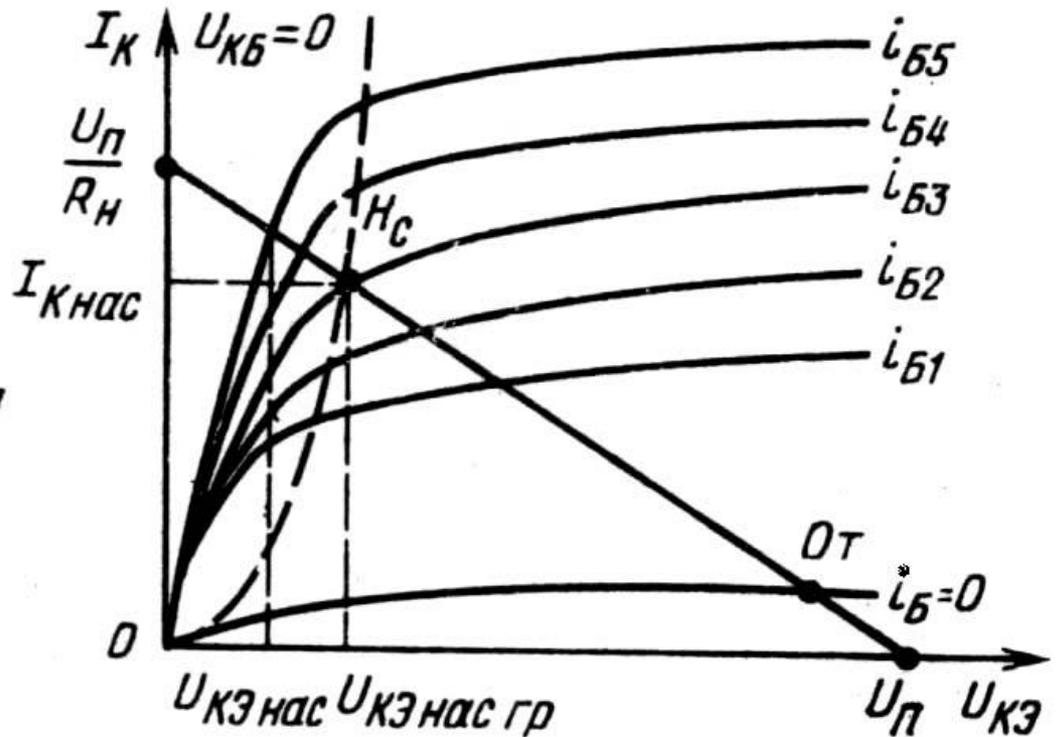
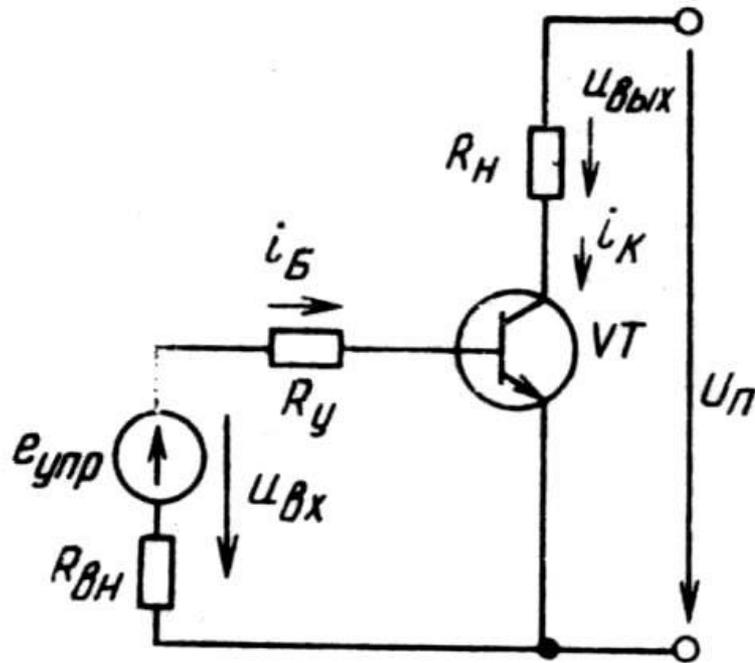
*Монтескье*



# Ключевые схемы



# Ключ на биполярном транзисторе (насыщенный)



$$I_{Бнас} > I_{Кнас} / h_{21Э} = I_{Бгр}$$

$$\alpha_{НАС} = I_{Бнас} / I_{Бгр}$$



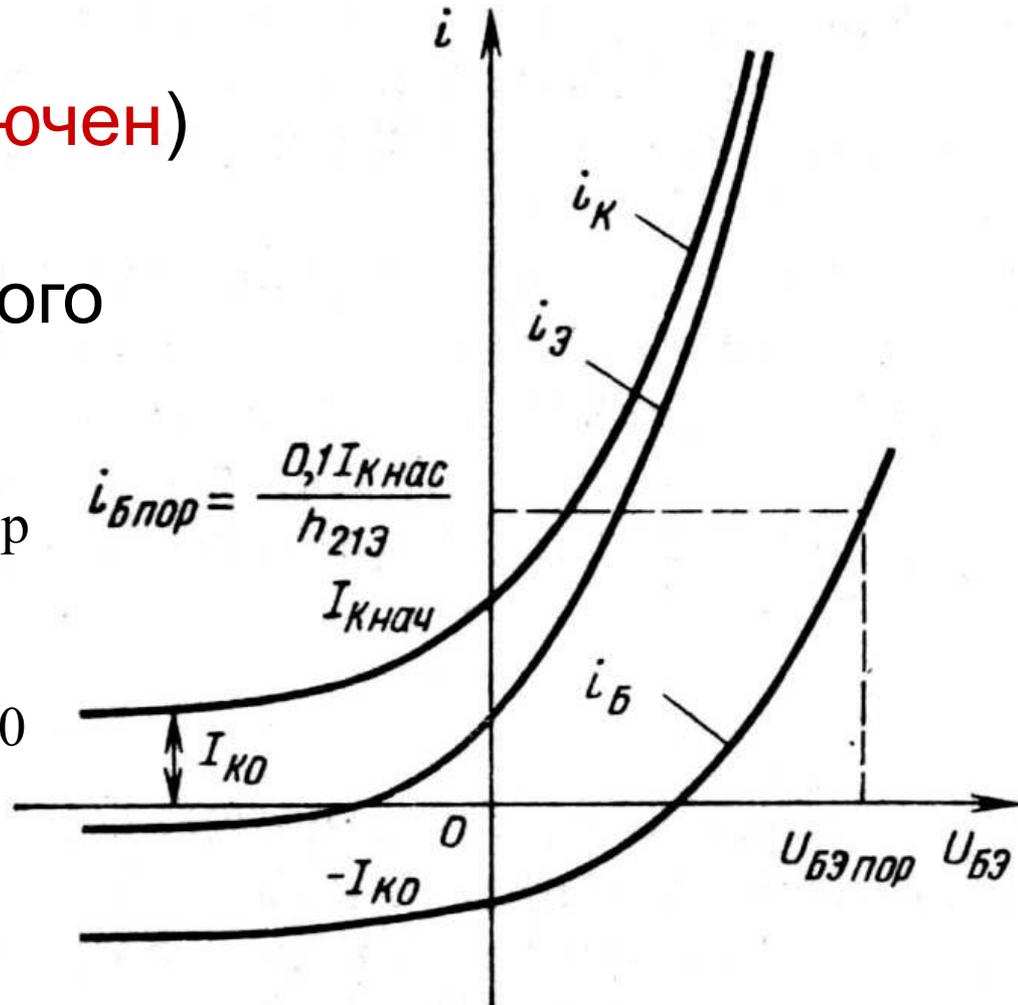
# Начальный участок ВАХ биполярного транзистора

$I_K \leq 0.1 I_{Kнас}$   
 (транзистор **ВЫКЛЮЧЕН**)

Режим пассивного  
 запираания:

$$0 < U_{БЭ} < U_{БЭпор}$$

$$R_y < U_{БЭпор} / I_{K0}$$



# Ключ на биполярном транзисторе (насыщенный)

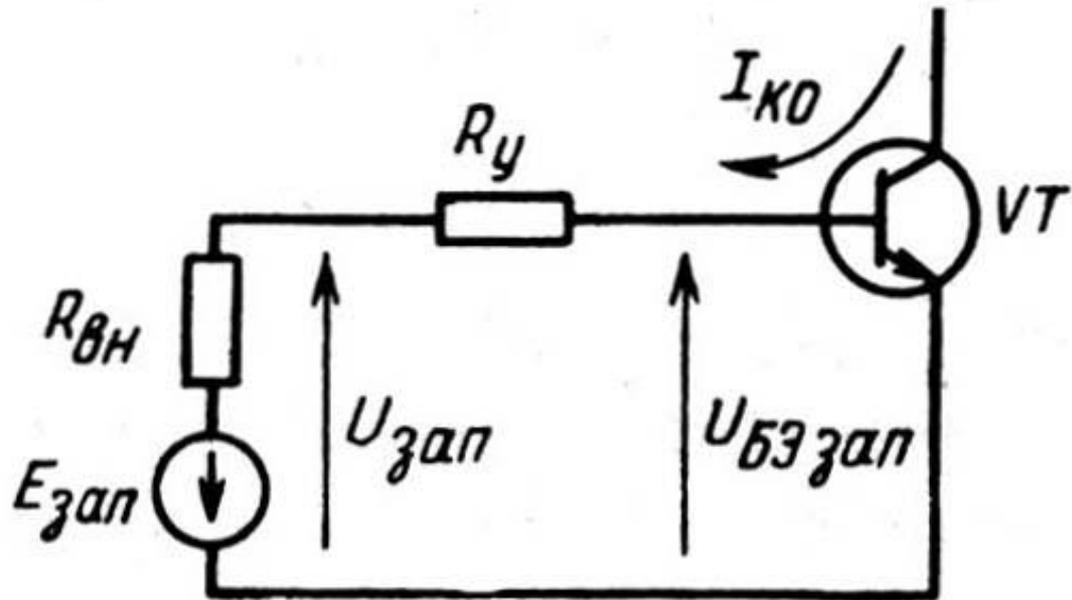
$$U_{Ry} = R_y I_{K0}$$

$$U_{БЭзап} = U_{зап} - I_{K0} R_y$$

Режим глубокой  
отсечки:

$$U_{БЭ} < 0 \quad I_B = -I_{K0}$$

$$R_y < U_{зап} / I_{K0}$$



## Зависимость тока базы от параметров транзистора

$$C_{\text{Э}}(dU_{\text{БЭ}}/dt) + C_{\text{К}}(dU_{\text{БК}}/dt) + dQ_{\text{Б}}/dt + Q_{\text{Б}}/\tau_{\text{Б}} = I_{\text{Б}}$$

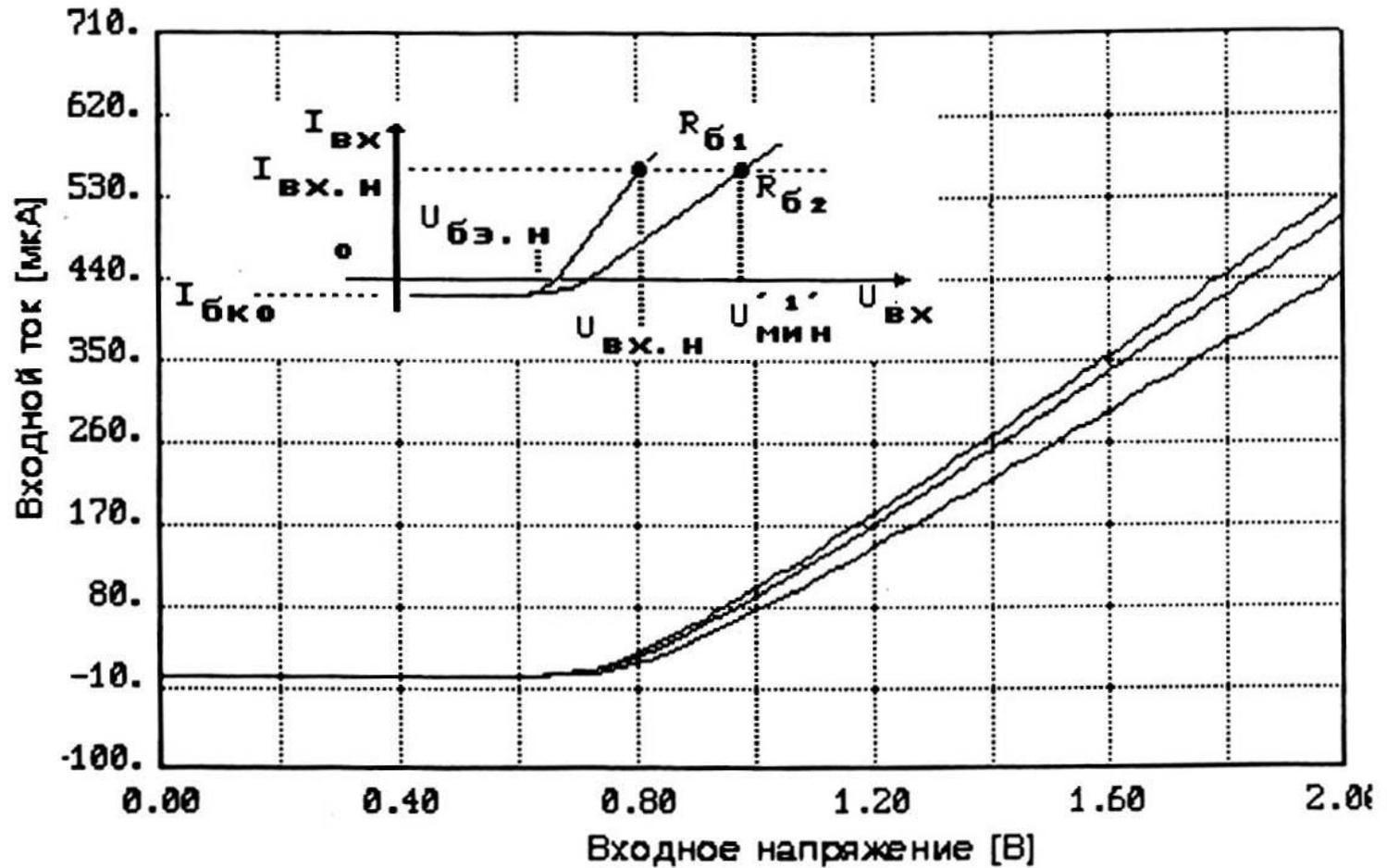
$Q_{\text{Б}}/\tau_{\text{Б}}$  – рекомбинационная составляющая

$dQ_{\text{Б}}/dt$  - составляющая, связанная с изменением пространственного заряда базы

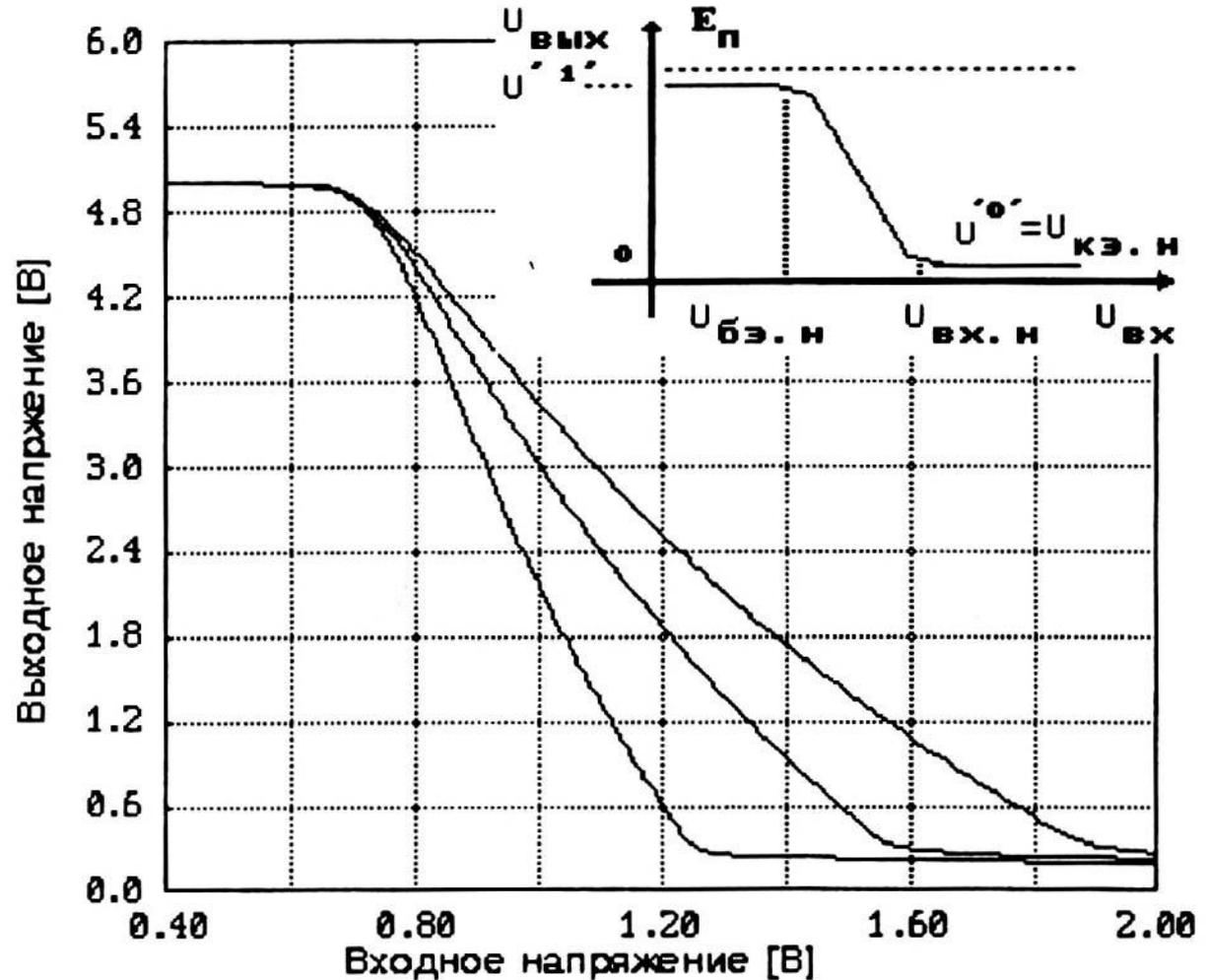
$$C_{\text{Э}}(dU_{\text{БЭ}}/dt) \ll C_{\text{К}}(dU_{\text{БК}}/dt)$$



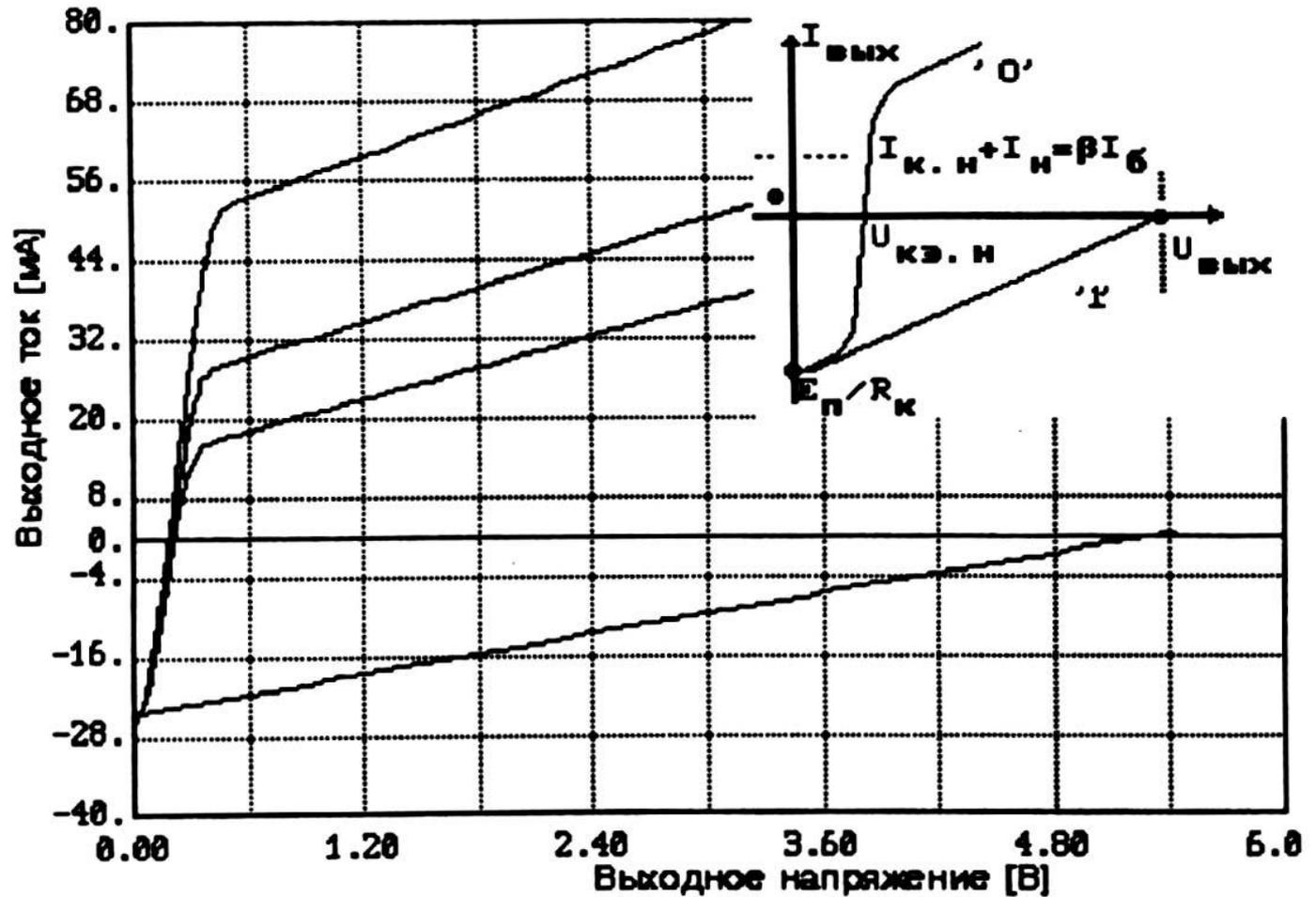
# Входная характеристика



# Передаточная характеристика



# Выходная характеристика



# Выходная характеристика

Высокий уровень выходного напряжения

$$I_K = 0$$

$$I_{Rk} = I_{\text{ВЫХ}}$$

$$I_{\text{ВЫХ}} = (E_{\text{П}} - U_{\text{ВЫХ}}) / R_K$$

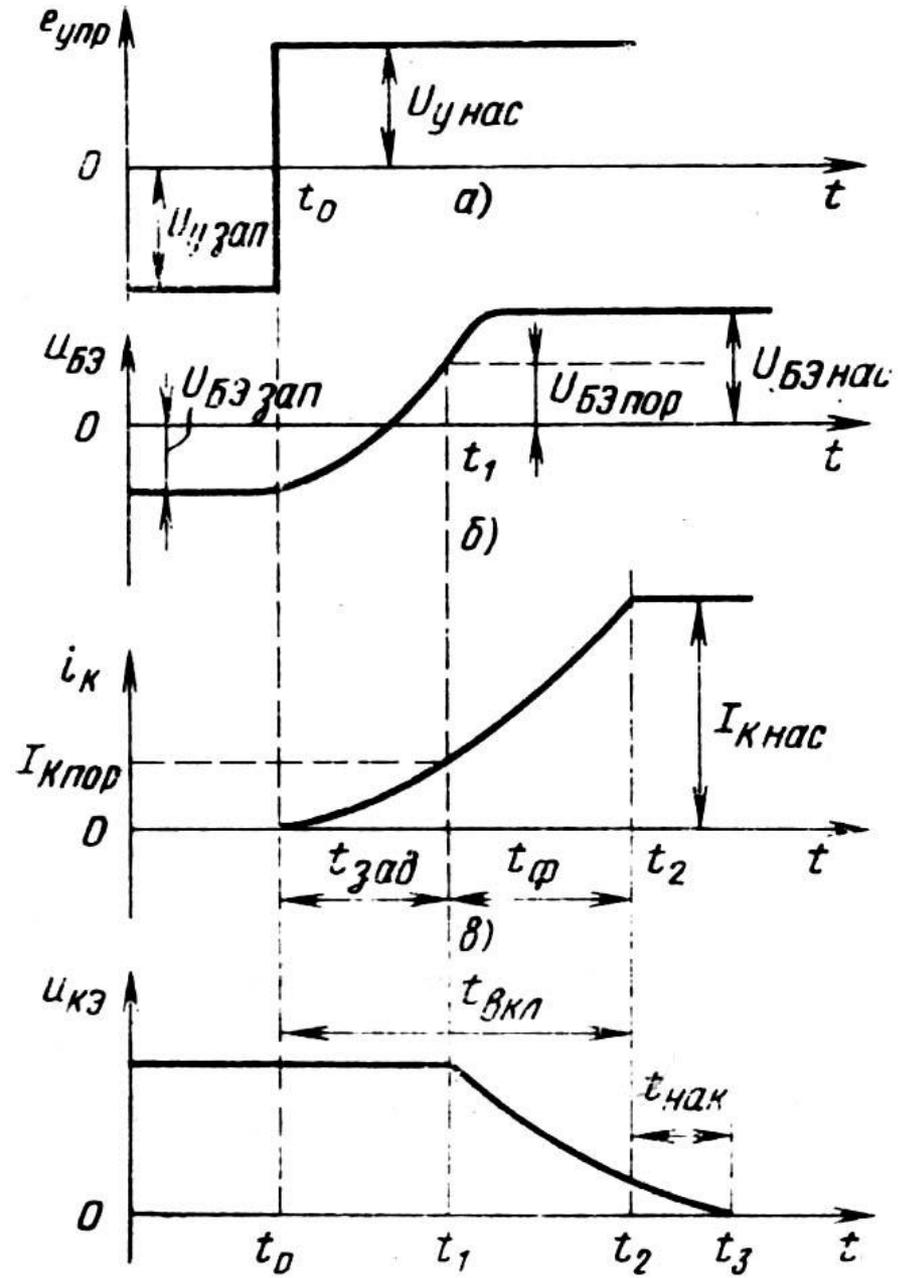
$$I_K = I_{Rk} + I_{\text{ВЫХ}}$$

Для низкого уровня выходного напряжения

$$I_{\text{б}} = I_{\text{бН}}$$



# Диаграммы включения транзистора



## Процессы включения транзистора

$$t < t_0 \quad U_{БЭ} = U_{у.зап}$$

$$t = t_0 \quad U_y = U_{у.зап} + U_{у.нас}$$

Интервал задержки включения  $(t_0 - t_1) t_{зад}$

$$U_{БЭ} = U_{у.нас} - (U_{у.нас} - U_{БЭ.зап}) e^{-t/\tau_c}$$

$$\tau_c = (C_{Э} + C_{К}) R_y$$

$$t_{зад} = \tau_c \ln \frac{U_{у.нас} - U_{БЭ.зап}}{U_{у.нас} - U_{БЭ.пор}}$$



# Процессы включения транзистора

## Интервал формирования фронта коллекторного тока ( $t_1 - t_2$ ) $t_\Phi$

$$dQ_B/dt + Q_B/\tau_B = I_{\text{бнас}}$$

$$Q_B(t=t_0) = 0 \quad I_{\text{бнас}} = I_{\text{Кнас}}/h_{21Э}$$

$$Q_B(t) = I_{\text{бнас}} \tau_B (1 - e^{-t/\tau_B}) \quad I_{\text{Кнас}} = Q_{\text{Бгр}}/\tau_B$$

$$\tau_B = h_{21Э}/2\pi f a$$

$$t_\Phi = \tau_B \ln \frac{I_{\text{Б.нас}}}{I_{\text{Б.нас}} - I_{\text{К.нас}}/h_{21Э}}$$



## Процессы включения транзистора

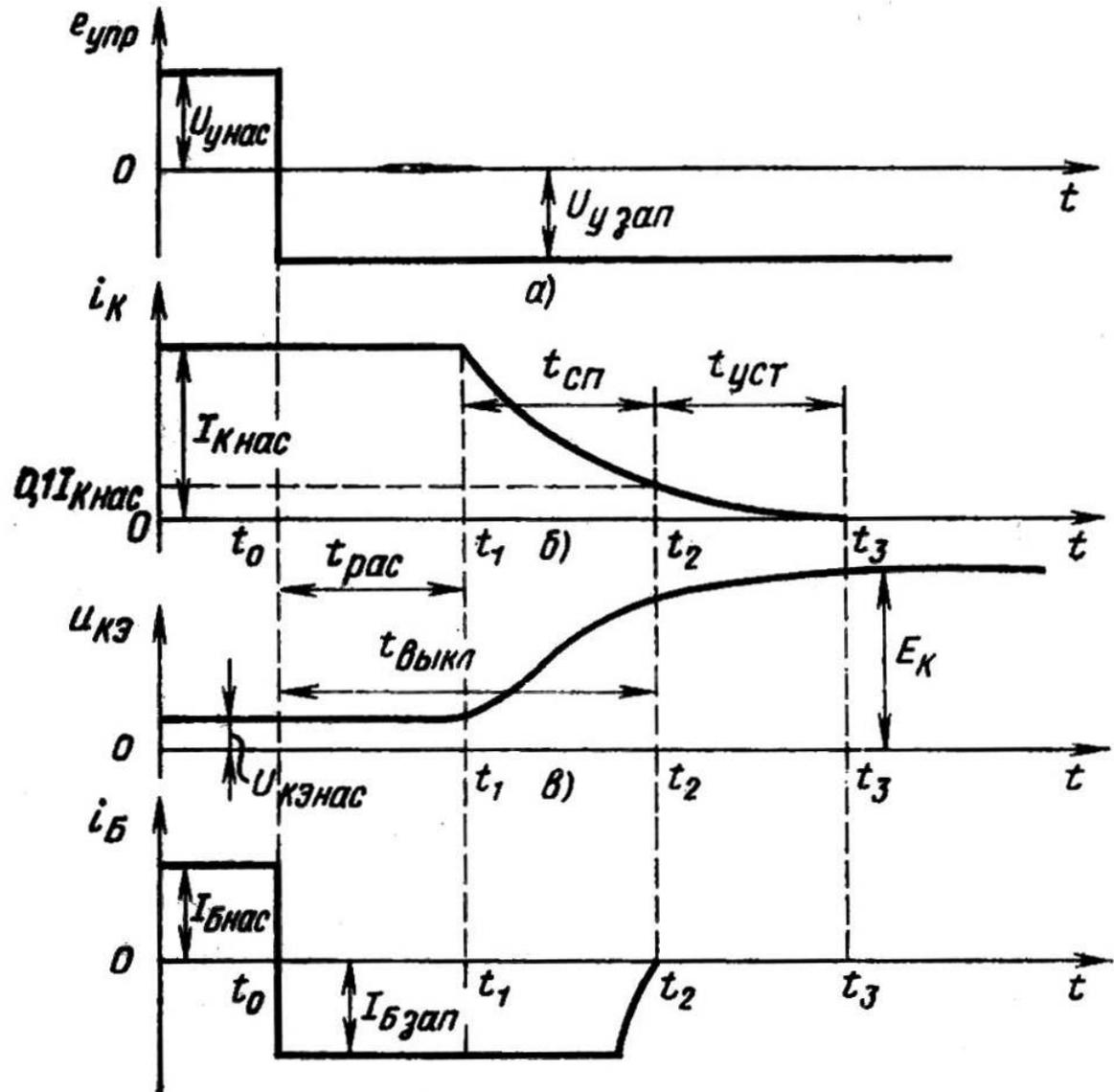
Интервал накопления избыточного заряда  
в базе  $(t_2 - t_3)$   $t_{\text{нак}}$

$$Q_{\text{Бнас}} = I_{\text{Бнас}} \tau_{\text{нак}}$$

$$t_{\text{нак}} \approx (2 \dots 3) \tau_{\text{нак}}$$



# Диаграммы выключения транзистора



# Процессы выключения транзистора

Интервал рассасывания избыточного заряда

базы  $(t_0 - t_1) t_{рас}$

$$Q_{Бнас} = I_{Бнас} \tau_{нак}$$

$$Q_{Бгр} = I_{Кнас} \tau_{нак} / h_{21Э}$$

$$t_{рас} = \tau_{нак} \ln \frac{\Delta I_{Б}}{I_{К.нас} / h_{21Э} - I_{Б.зап}}$$

$$\Delta I_{Б} = I_{Бнас} - I_{Бзап}$$

$$I_{Бзап} = (U_{зап} + U_{БЭ}) / (R_{у} + r_{Б})$$



## Процессы выключения транзистора

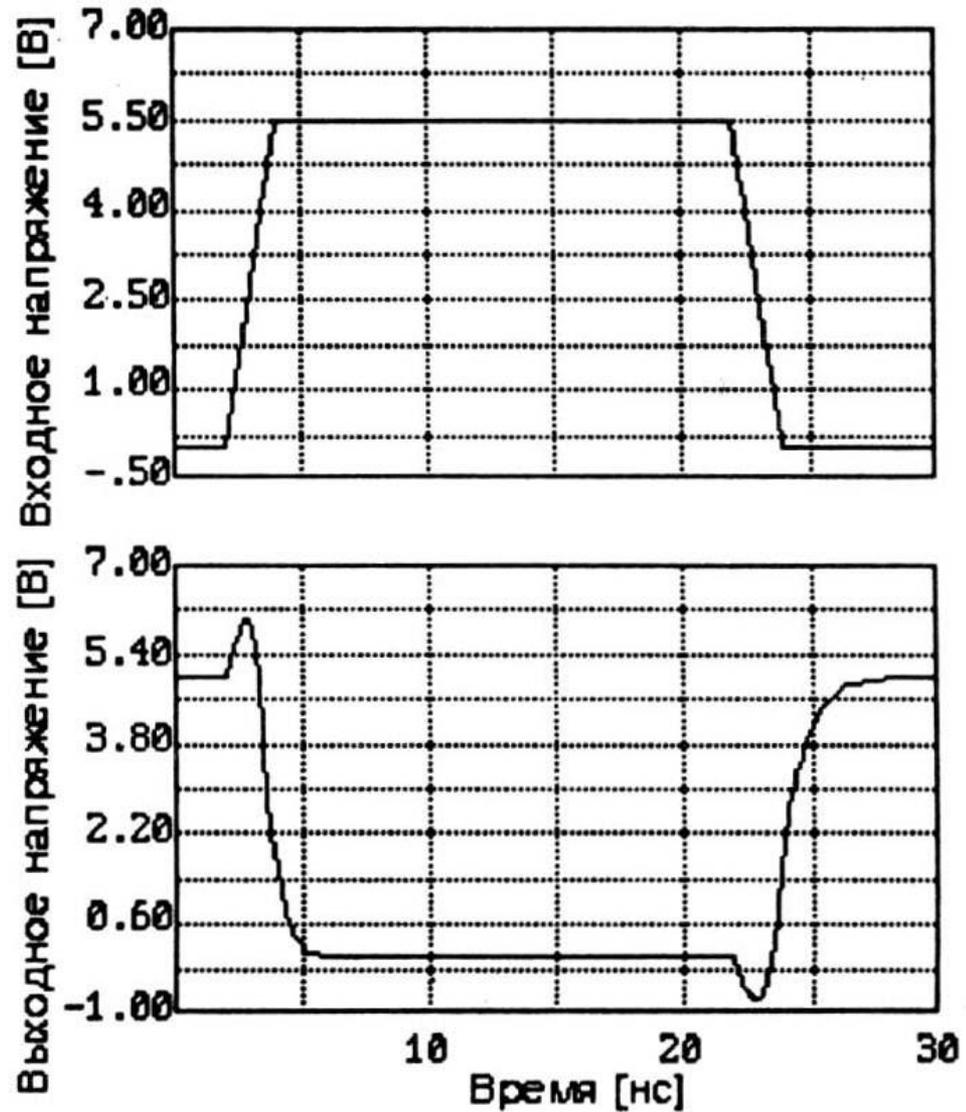
Интервал формирования спада  
коллекторного тока  $(t_1 - t_2)$   $t_{СП}$

$$t_{СП} = \tau_B \ln(I_{Кнас} / (h_{21Э} - I_{Бзап}) / (-I_{Бзап}))$$

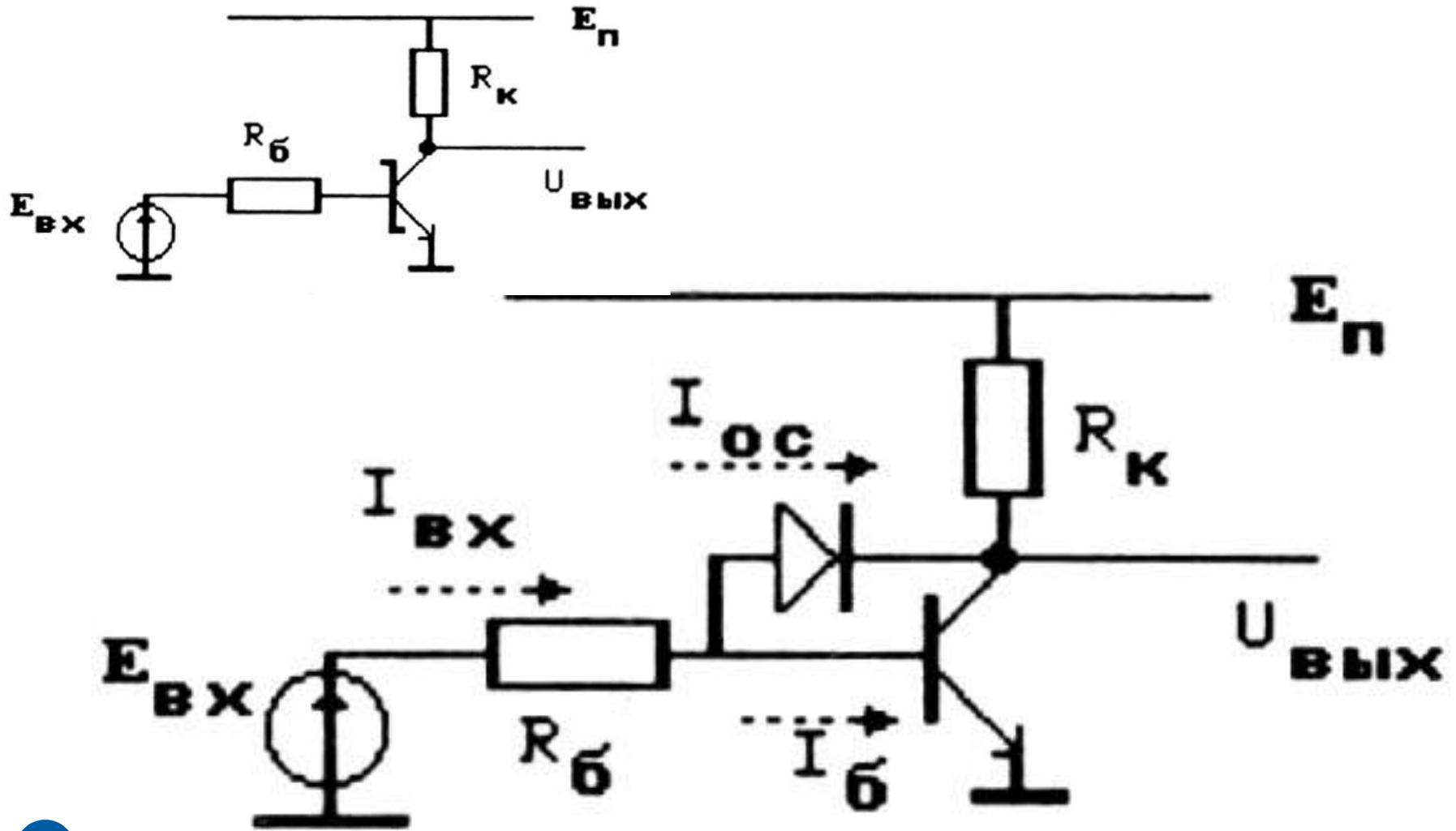
Интервал установления стационарного  
закрытого состояния  $(t_2 - t_3)$   $t_{уст}$



# Входной и выходной сигналы



# Ненасыщенный биполярный ключ



# Ненасыщенный биполярный ключ

## Входная характеристика

$$U_K < U_B$$

$$U_{ВХ} < U_{БЭН}$$

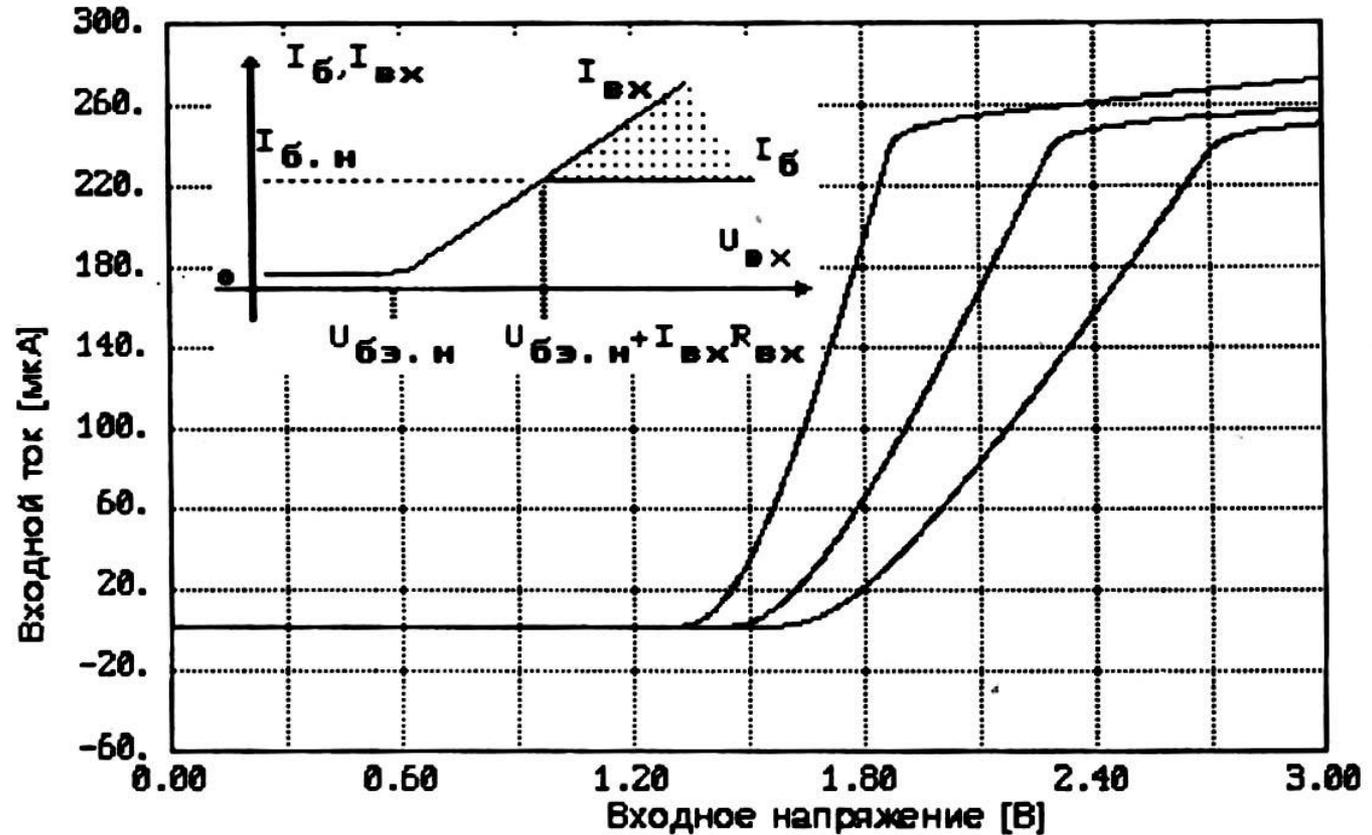
$$U_K < U_{БЭН}$$

$$I_B = I_{ВХ} - I_{ОС}$$

$$U_K = U_B - U_{Дпр}$$

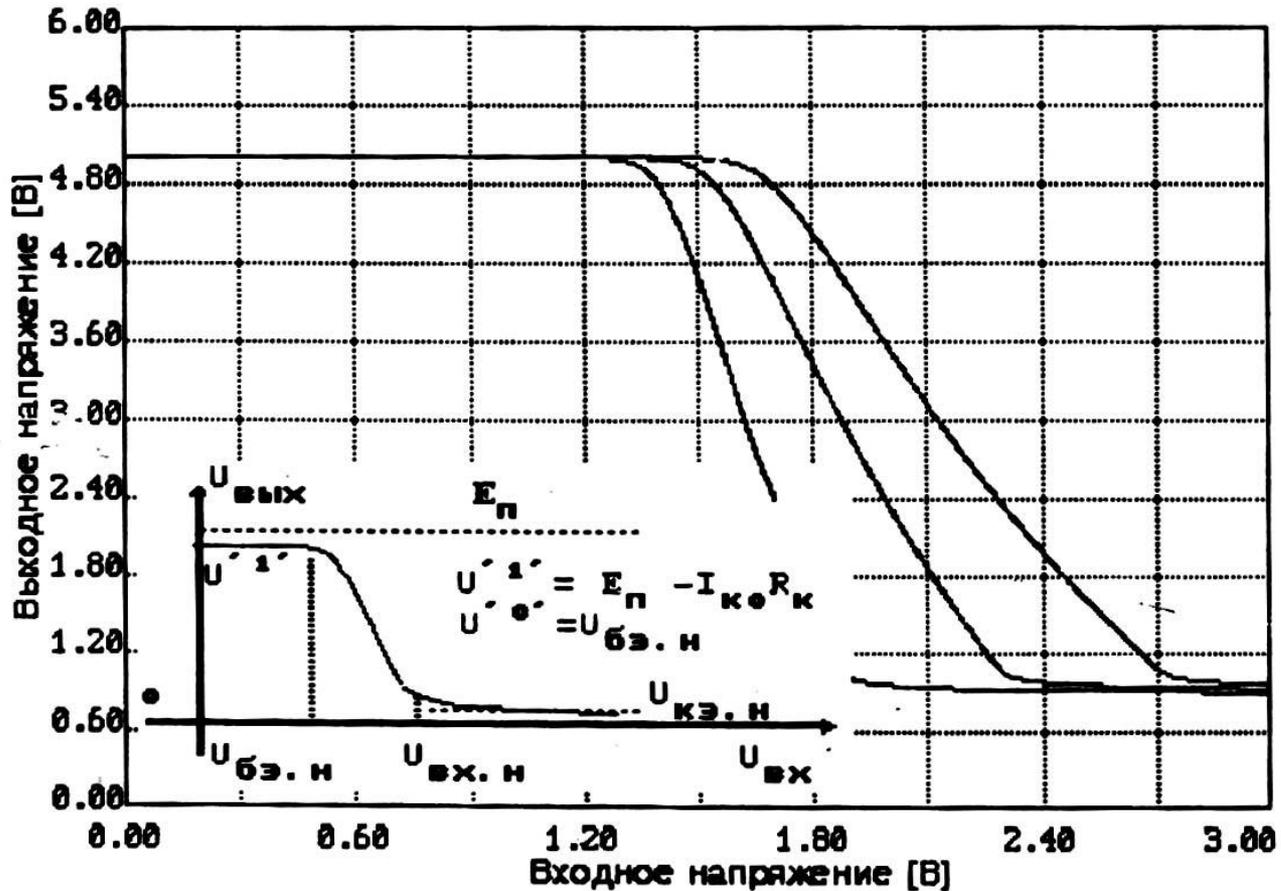
$$U_{БЭнас} \approx U_{Дпр}$$

$$U_K \approx 0$$



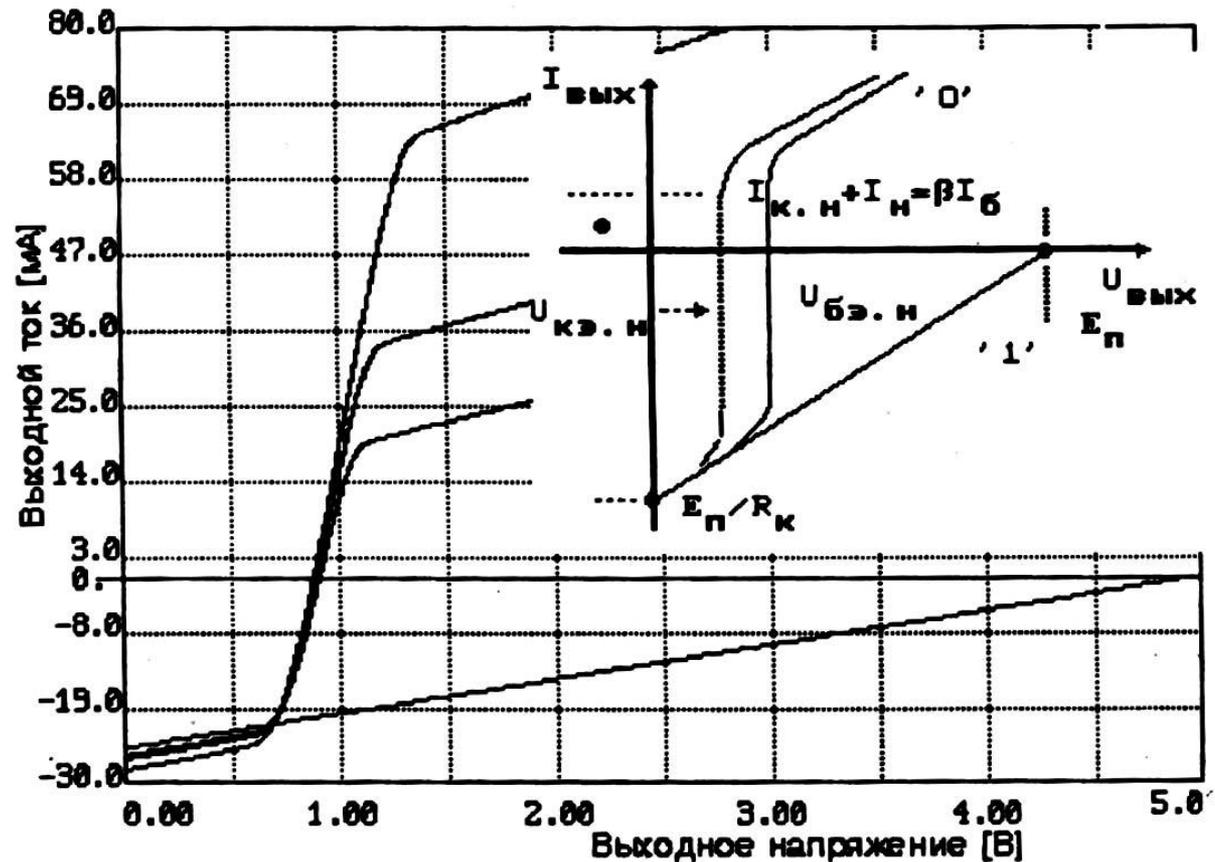
# Ненасыщенный биполярный ключ

## Передаточная характеристика



# Ненасыщенный биполярный ключ

## Выходная характеристика



**Эйнштейн, остриженный "под ноль",  
может считаться Эйнштейном только  
относительно.**

**Виктор Шендерович**

