

# Лекция 3

## Биполярные транзисторы

1. Структура, принцип работы
2. Характеристики
3. Схемы включения

**Мудр** — кто знает нужное, а не многое.

*Эсхил*



# Первый транзистор

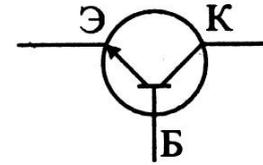
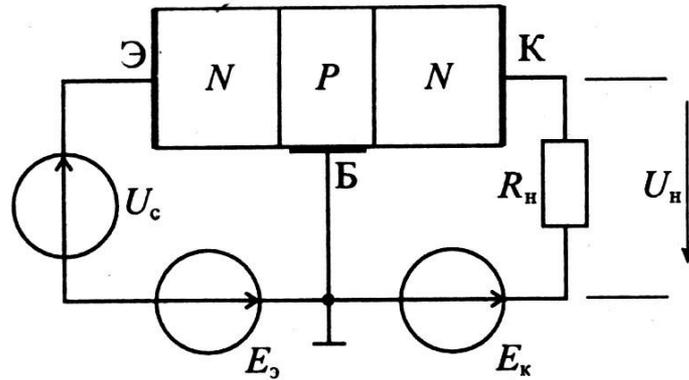


## Первый транзистор

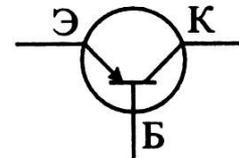
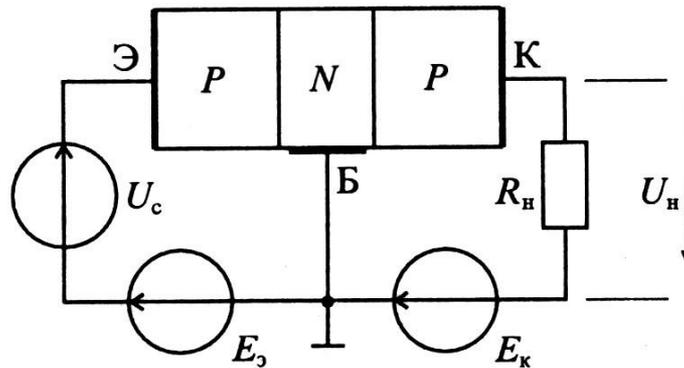
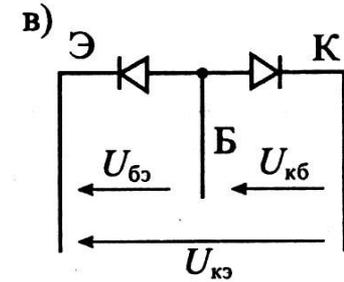
23 декабря 1947 года — американские физики Уильям Шокли (William Shockley), Джон Бардин (John Bardeen) и Уолтер Браттейн (Walter Brattain). В 1956 году - Нобелевская премия в области физики.

Название «транзистор» придумал их коллега Джон Пирс (John R. Pierce). Слово transistor образовано путем соединения двух терминов: transconductance (активная межэлектродная проводимость) и variable resistor или varistor (переменное сопротивление, варистор).

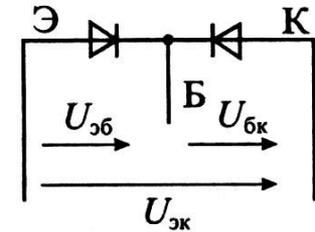
# Биполярные транзисторы



n-p-n

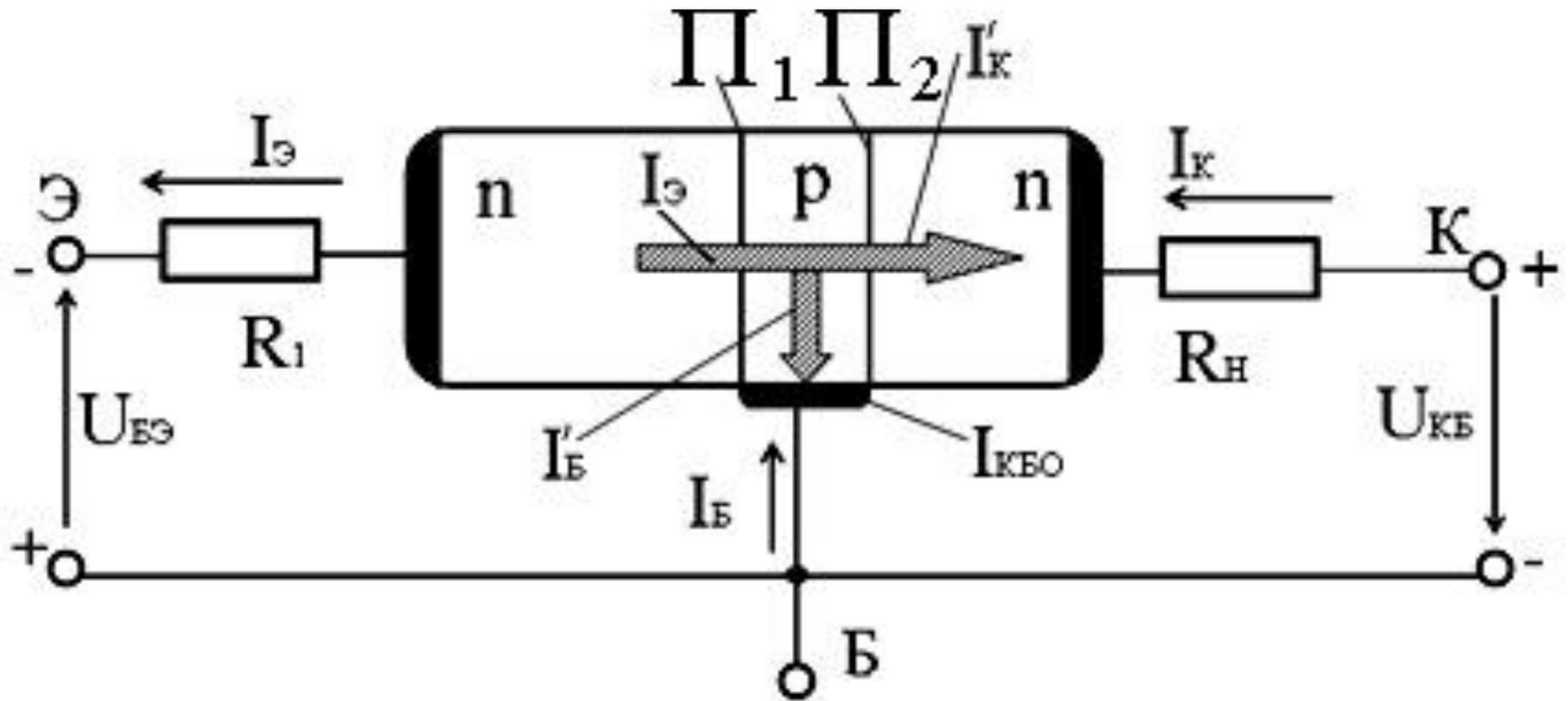


p-n-p



# Транзистор n-p-n типа

## Схема распределения токов



Эмиттер

База

Коллектор



## Взаимосвязь токов

$$I'_K = \alpha I_\ominus \quad (1)$$

$\alpha$ - коэффициент передачи тока эмиттера  
 $\alpha=0,95\dots 0,99$

Выходной ток транзистора:

$$I_K = I'_K + I_{КБ0} \quad (2)$$

$I_{КБ0}$  - обратный ток



Ток в выводе базы:

$$I_B = I_B' - I_{КБ0} \quad (3)$$

С учетом (1):

$$I_K = \alpha I_{\text{Э}} + I_{КБ0} \quad (4)$$

Поскольку  $I_{\text{Э}} \gg I_{КБ0}$ , то

$$I_K \approx \alpha I_{\text{Э}} \quad (5)$$



Ток базы:

$$I_B = I_E - I_K \quad (6)$$

С учетом (5):

$$I_B = \frac{1}{\alpha} I_K - I_K$$

ИЛИ:

$$I_B = \frac{1 - \alpha}{\alpha} I_K$$



Отсюда:

$$\frac{I_K}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta \quad (7)$$

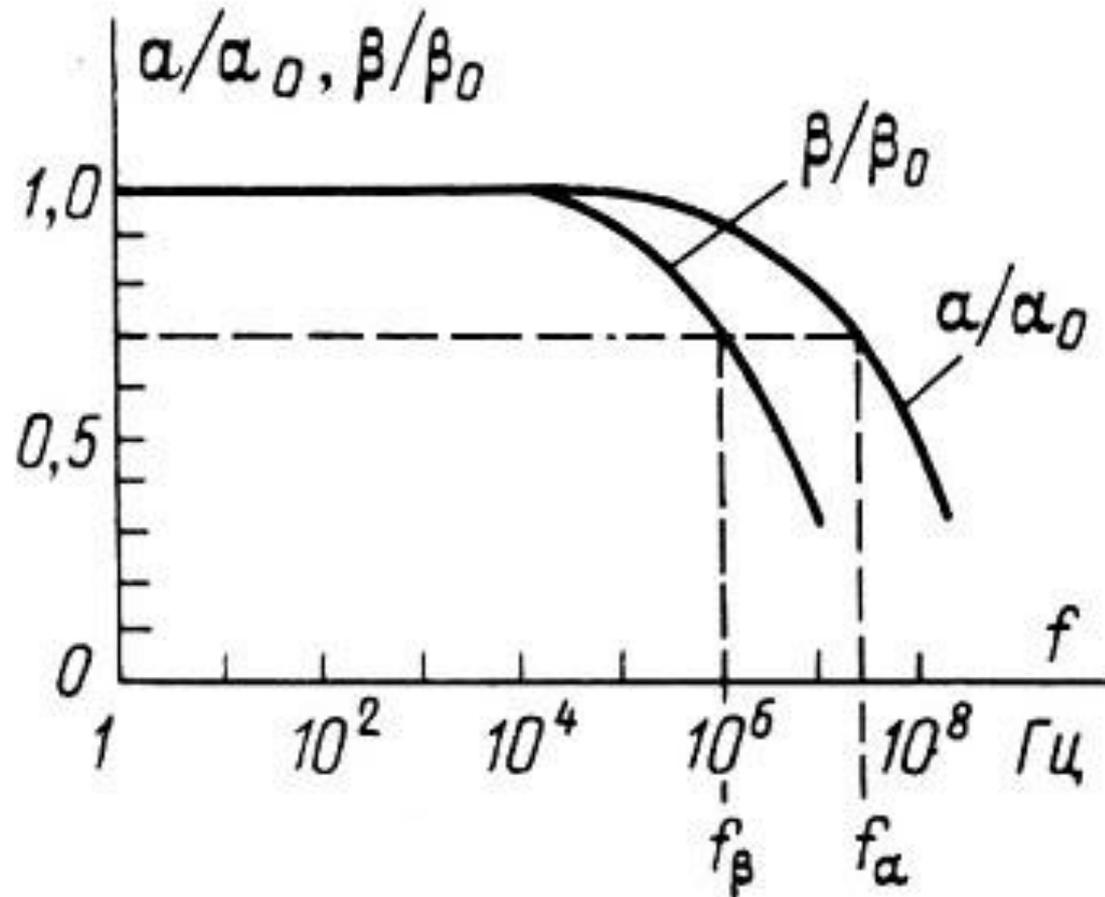
$$I_K = \beta I_B \quad (8)$$

$\beta$  - динамический коэффициент передачи тока  
базы

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$



## Уменьшение коэффициентов $\alpha$ и $\beta$ с увеличением частоты



# Режимы работы транзисторов

Нормальный (активный) режим – эмиттерный переход смещен в прямом направлении, коллекторный – в обратном.

Инверсный режим – коллекторный переход смещен в прямом направлении, эмиттерный – в обратном.



## Режимы работы транзисторов

Режим отсечки – оба перехода транзистора смещены в обратном направлении.

$$I_K = I_{KB0} \quad I_{\text{Э}} \approx 0 \quad I_B \approx -I_{KB0}$$

Режим насыщения – оба перехода транзистора смещены в прямом направлении.

$$I_{K\text{max}} < \alpha I_{\text{Э}} \quad U_{K\text{Энас}} \approx \varphi_T \frac{1 - \alpha}{\alpha}$$



# Параметры, характеризующие транзистор как усилительный элемент

Коэффициенты усиления:

- по току  $k_I = \Delta I_{\text{ВЫХ}} / \Delta I_{\text{ВХ}}$

- по напряжению  $k_U = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{ВХ}}$

- по мощности  $k_P = k_I / k_U = \Delta P_{\text{ВЫХ}} / \Delta P_{\text{ВХ}}$

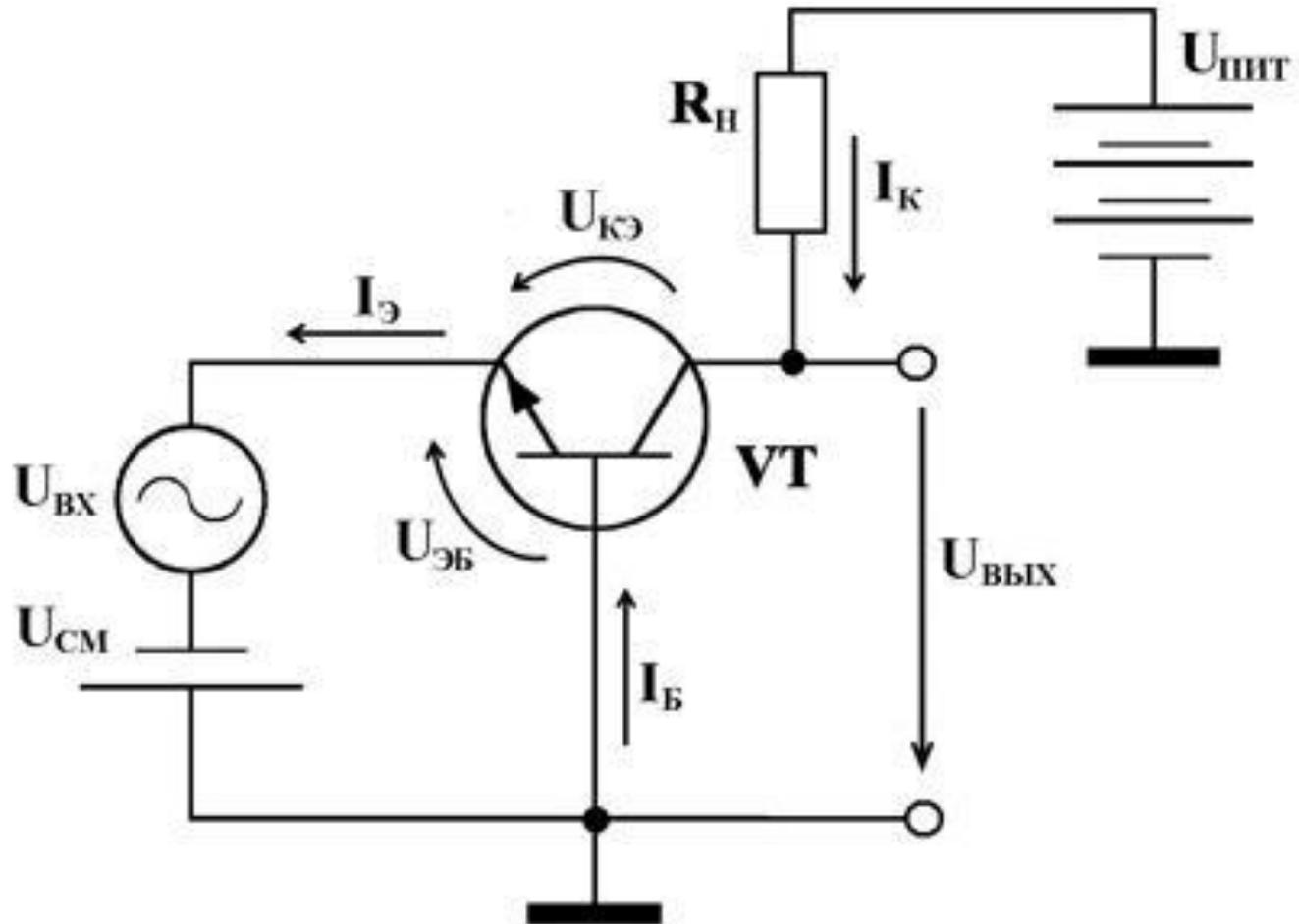
- входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} / I_{\text{ВХ}}$

- выходное сопротивление  $R_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВЫХ}}$



# Схемы включения транзисторов

## Схема с общей базой (ОБ)



# Схемы включения транзисторов

## Схема с общей базой (ОБ)

$$k_{I6} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Э} = \alpha \quad R_{BX6} = \frac{U_{ЭБ}}{I_Э}$$

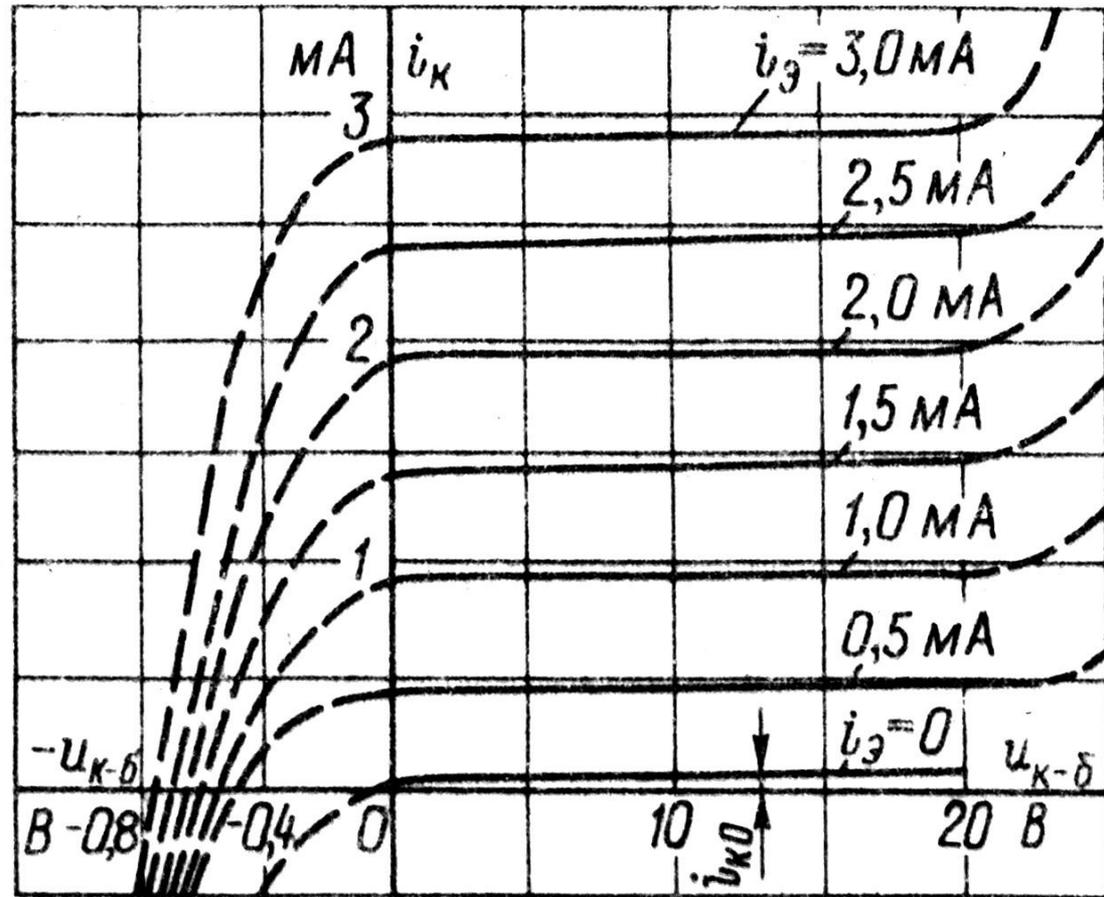
$$k_{U6} = \frac{\Delta U_H}{\Delta U_{ЭБ}} = \frac{\Delta I_K \cdot R_H}{\Delta I_Э \cdot R_{BX6}} = \alpha \frac{R_H}{R_{BX6}}$$

$$k_{U6} \gg 1, \quad \text{так как } R_H \gg R_{BX6}$$



# Характеристики транзисторов

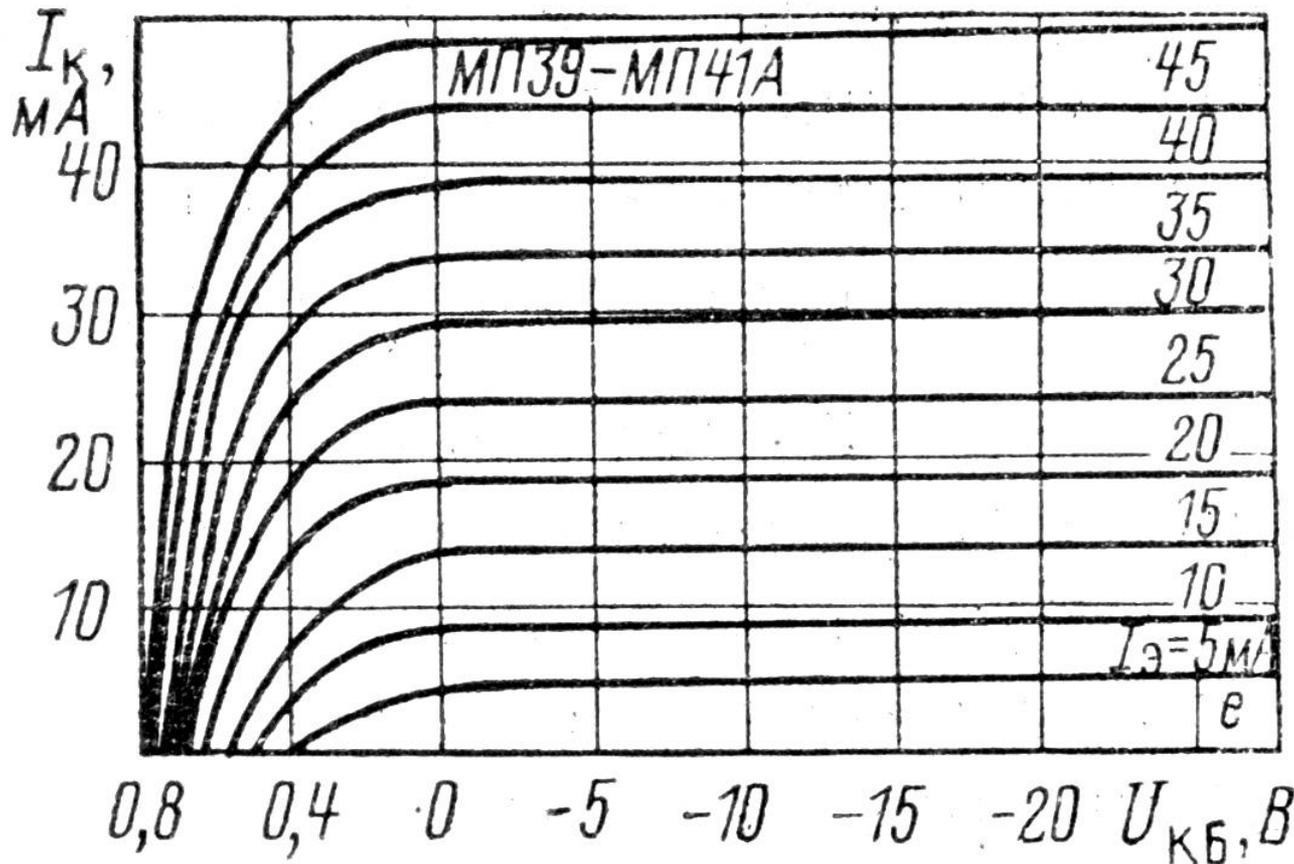
Выходные характеристики  $I_K = f(U_{КБ})$   
 схема с ОБ n-p-n



# Характеристики транзисторов

Выходные характеристики  $I_K = f(U_{KB})$

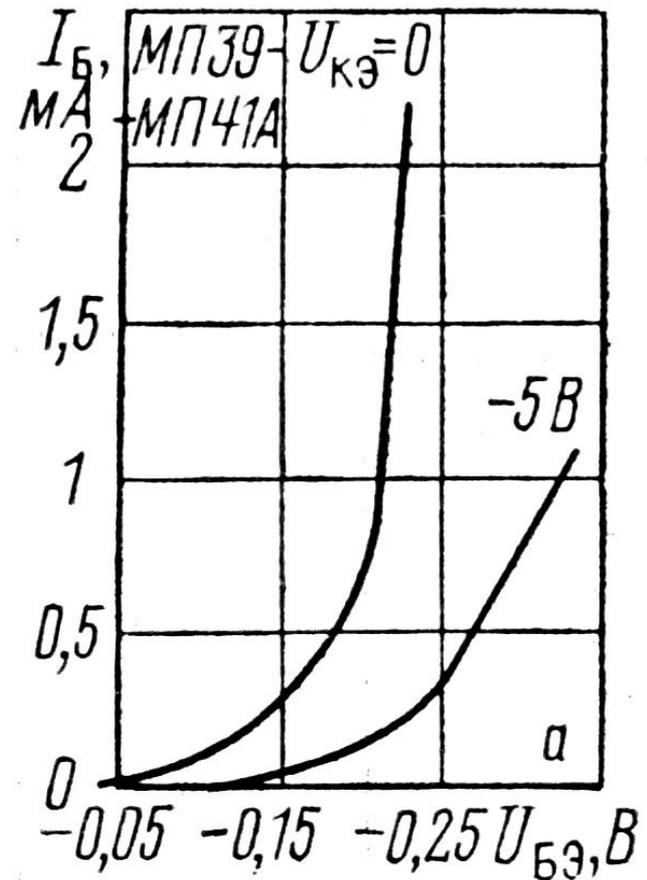
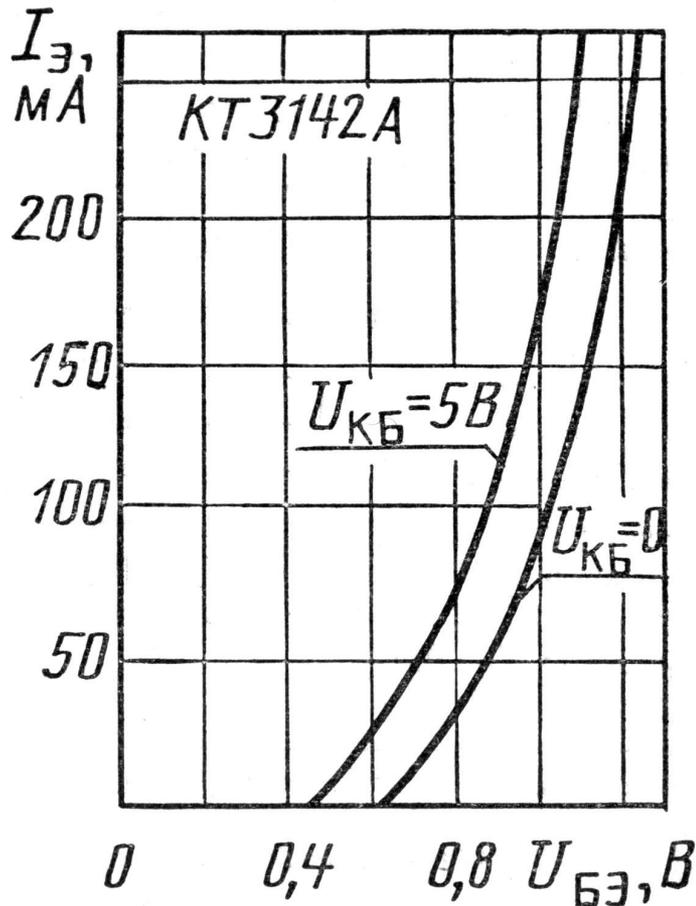
p-n-p схема с ОБ



# Характеристики транзисторов

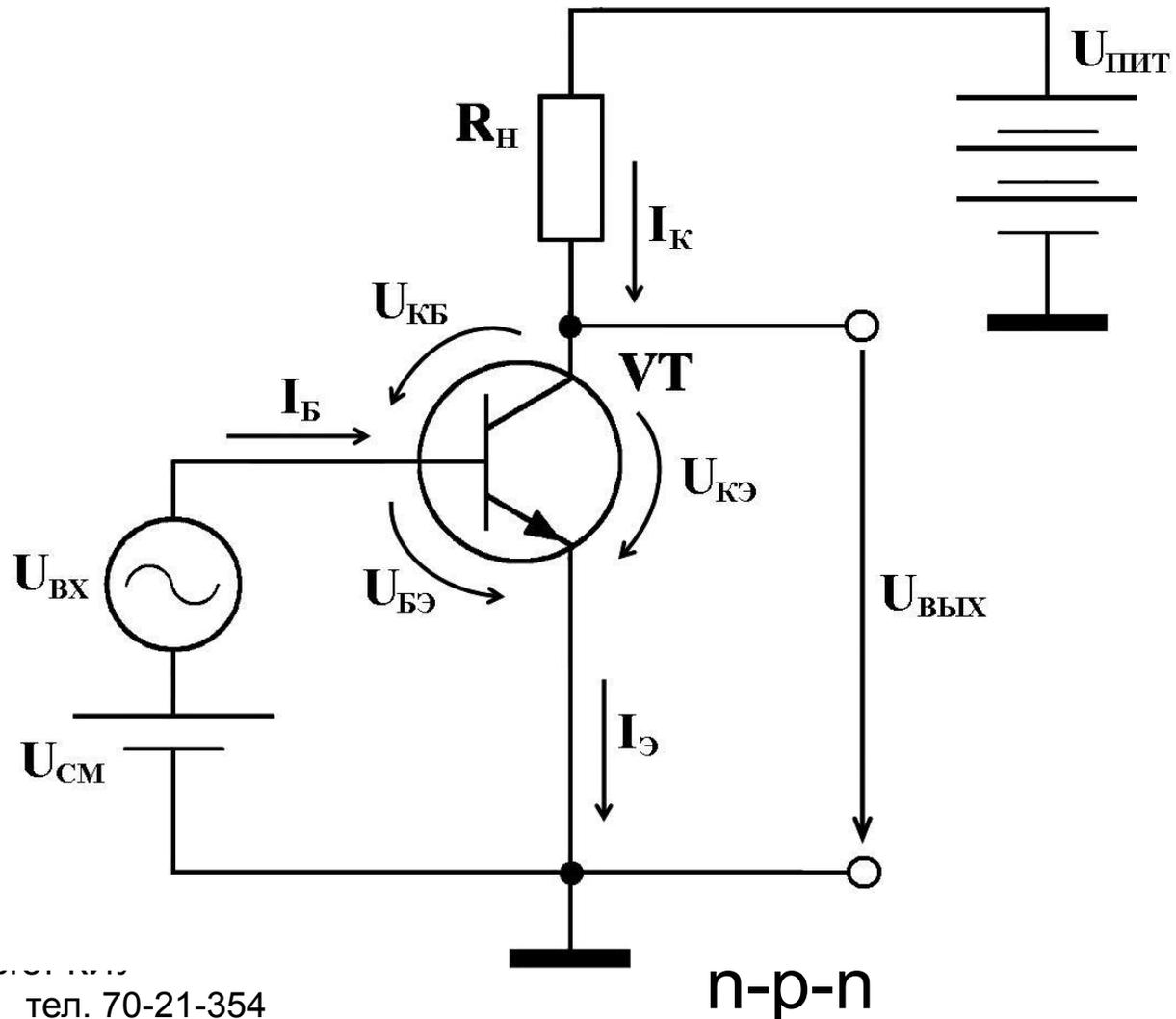
Входные характеристики  $I_{Э} = f(U_{ЭБ})$

n-p-n                      схема с ОБ                      p-n-p



# Схемы включения транзисторов

## Схема с общим эмиттером (ОЭ)



# Схемы включения транзисторов

## Схема с общим эмиттером (ОЭ)

$$k_{I_{\text{Э}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = \beta$$

$$R_{\text{ВХ}_{\text{Э}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}} \cdot I_{\text{Э}}}{I_{\text{Э}} \cdot I_{\text{Б}}} = R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}} \frac{I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}}{I_{\text{Б}}} = R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}} (\beta + 1)$$

$$k_{U_{\text{Э}}} = \frac{\Delta U_{\text{Н}}}{\Delta U_{\text{ЭБ}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}} \cdot R_{\text{Н}}}{\Delta I_{\text{Б}} \cdot R_{\text{ВХ}_{\text{Э}}}} = \beta \frac{R_{\text{Н}}}{\beta \cdot R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}}} = \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}}}$$

$$k_{U_{\text{Э}}} \gg 1, \quad \text{так как } R_{\text{Н}} \gg R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}}$$



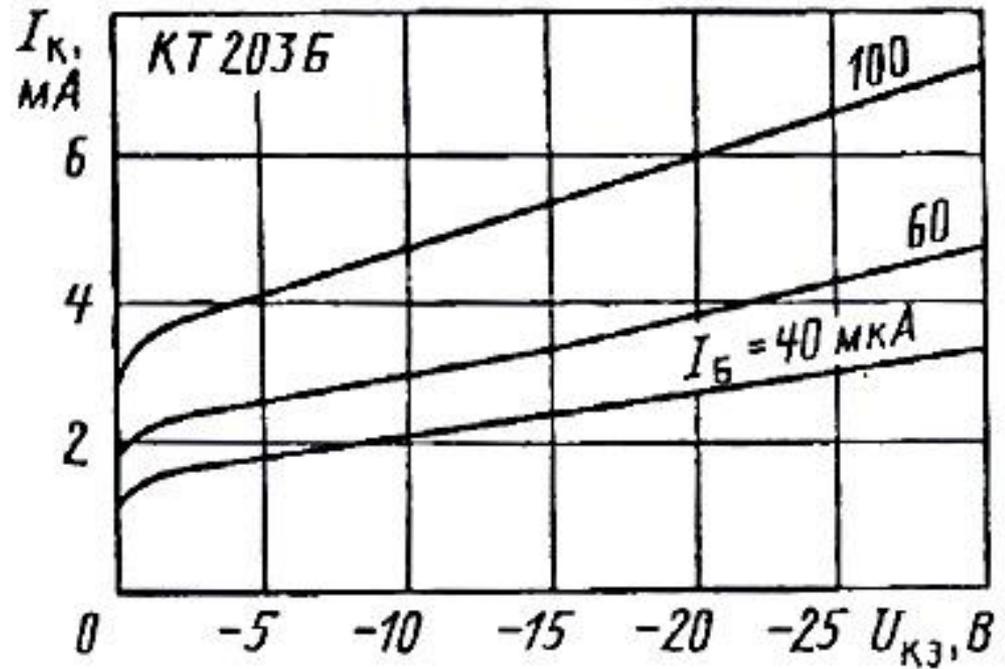
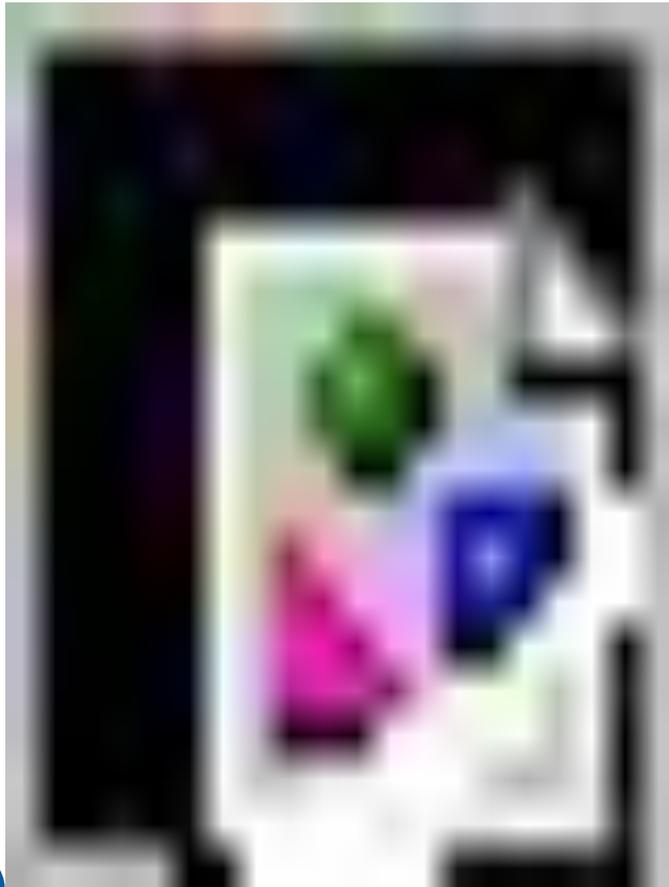
# Характеристики транзисторов

Выходные характеристики  $I_K = f(U_{KЭ})$

n-p-n

схема с ОЭ

p-n-p



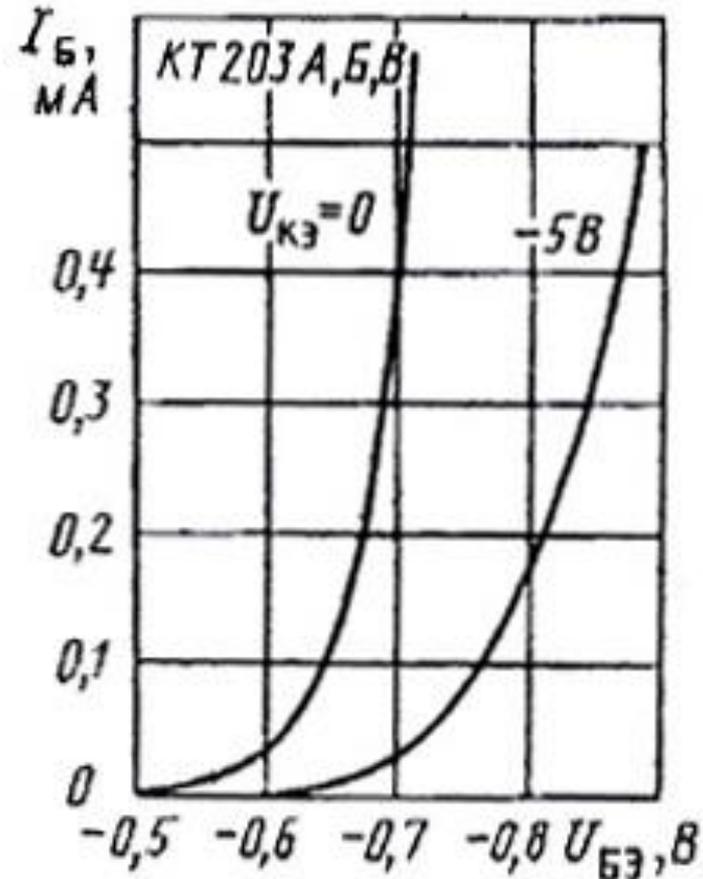
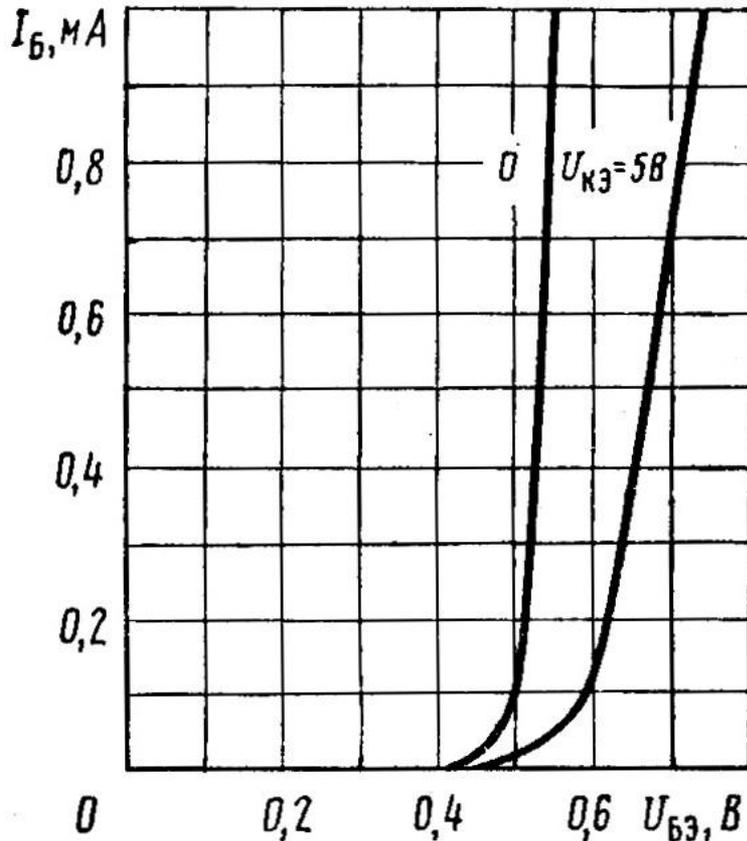
# Характеристики транзисторов

Входные характеристики  $I_B = f(U_{БЭ})$

n-p-n

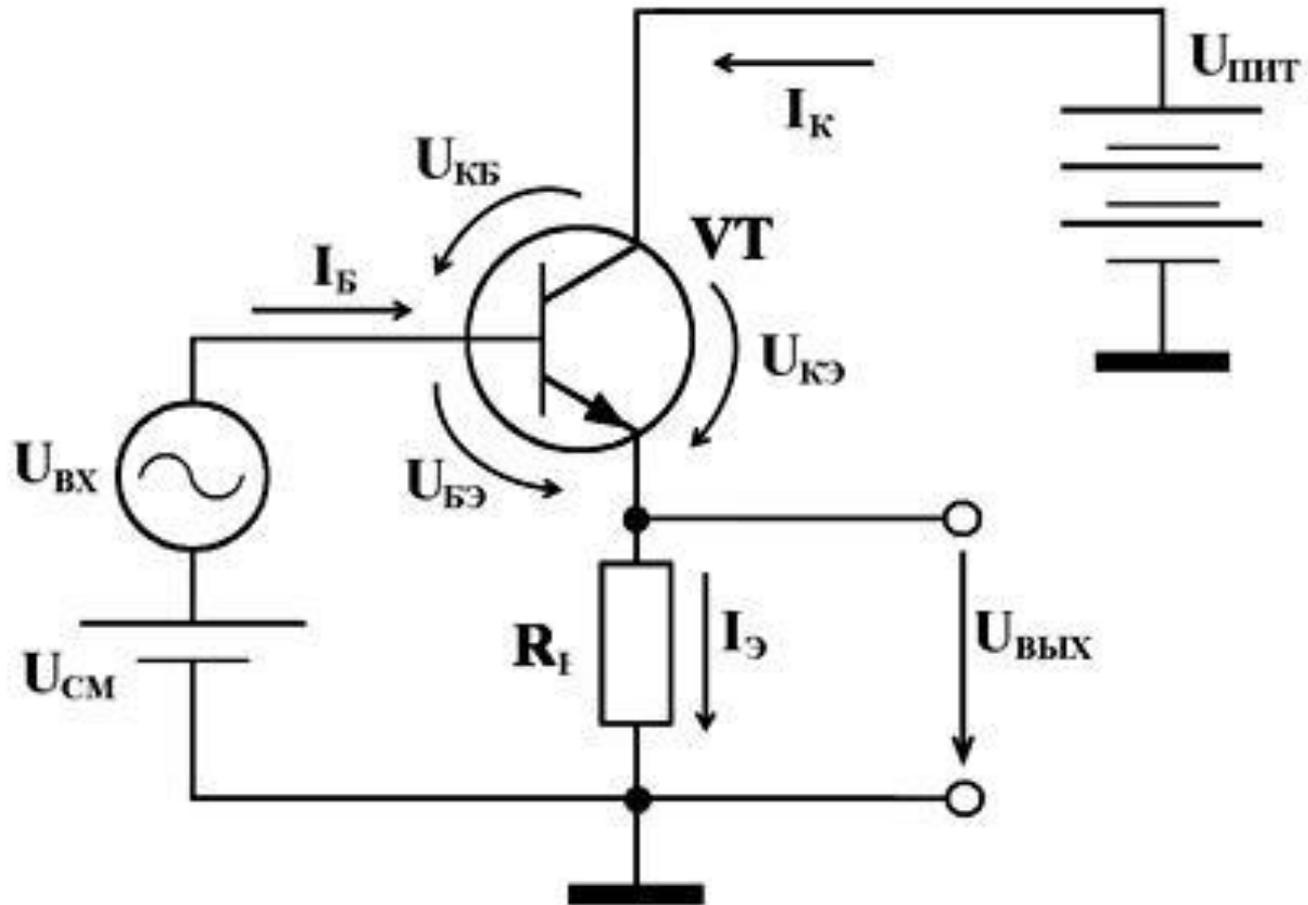
схема с ОЭ

p-n-p



# Схемы включения транзисторов

## Схема с общим коллектором (ОК)



n-p-n



# Схемы включения транзисторов

## Схема с общим коллектором (ОК)

$$k_{I_{\text{К}}} = \frac{\Delta I_{\text{Э}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}} + \Delta I_{\text{Б}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = \beta + 1$$

$$k_{U_{\text{К}}} = \frac{\Delta U_{\text{Н}}}{\Delta U_{\text{КБ}}} = \frac{\Delta U_{\text{Н}}}{\Delta U_{\text{ЭБ}} + \Delta U_{\text{Н}}} = \frac{\Delta I_{\text{Э}} \cdot R_{\text{Н}}}{\Delta I_{\text{Э}} \cdot R_{\text{ВХ6}} + \Delta I_{\text{Э}} \cdot R_{\text{Н}}}$$

$$= \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХ6}} + R_{\text{Н}}}$$

т.е.  $k_{U_{\text{К}}} \approx 1$



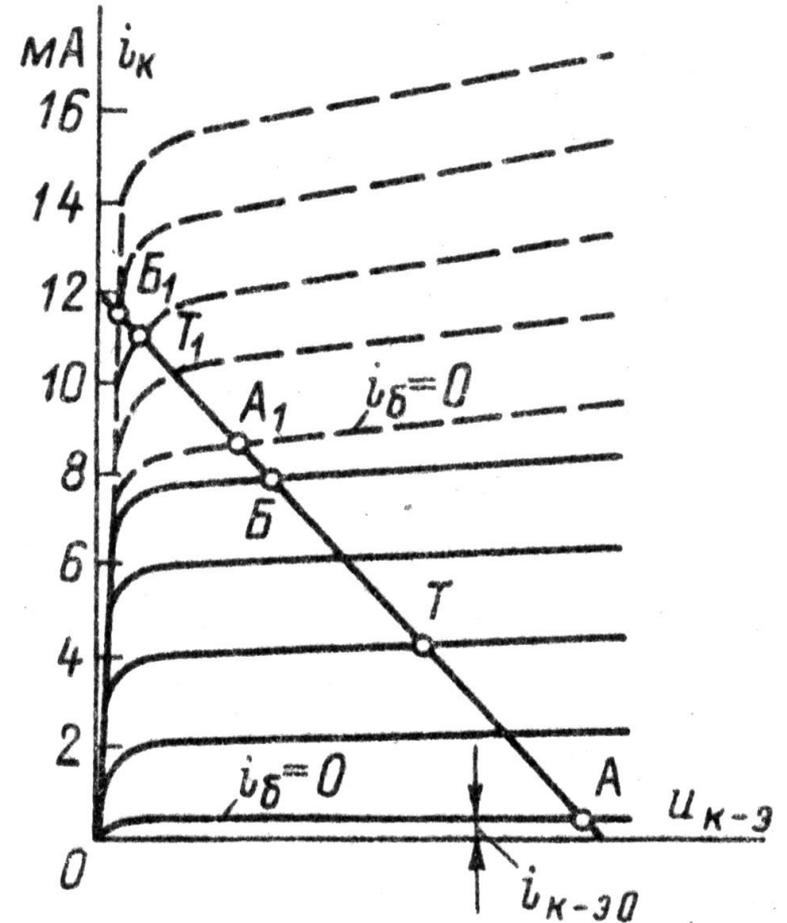
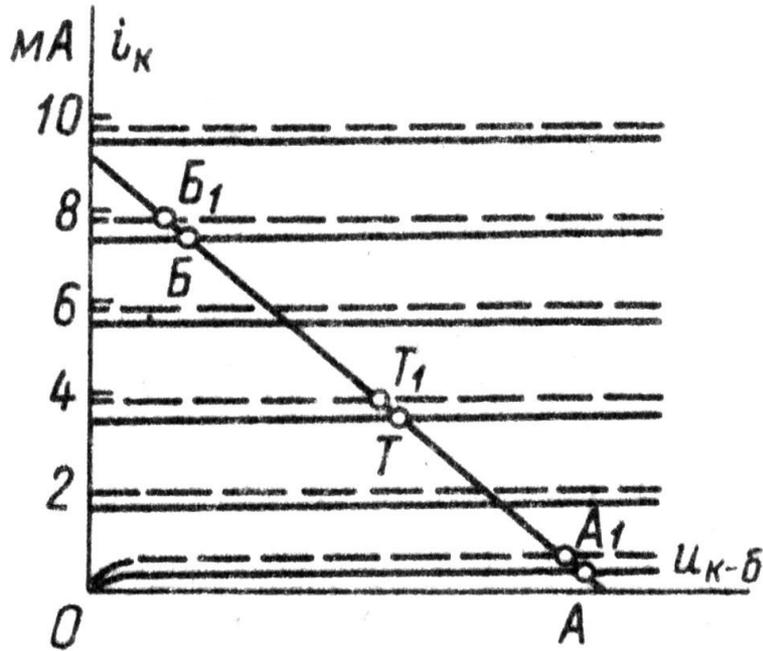
# Схемы включения транзисторов

## Схема с общим коллектором (ОК)

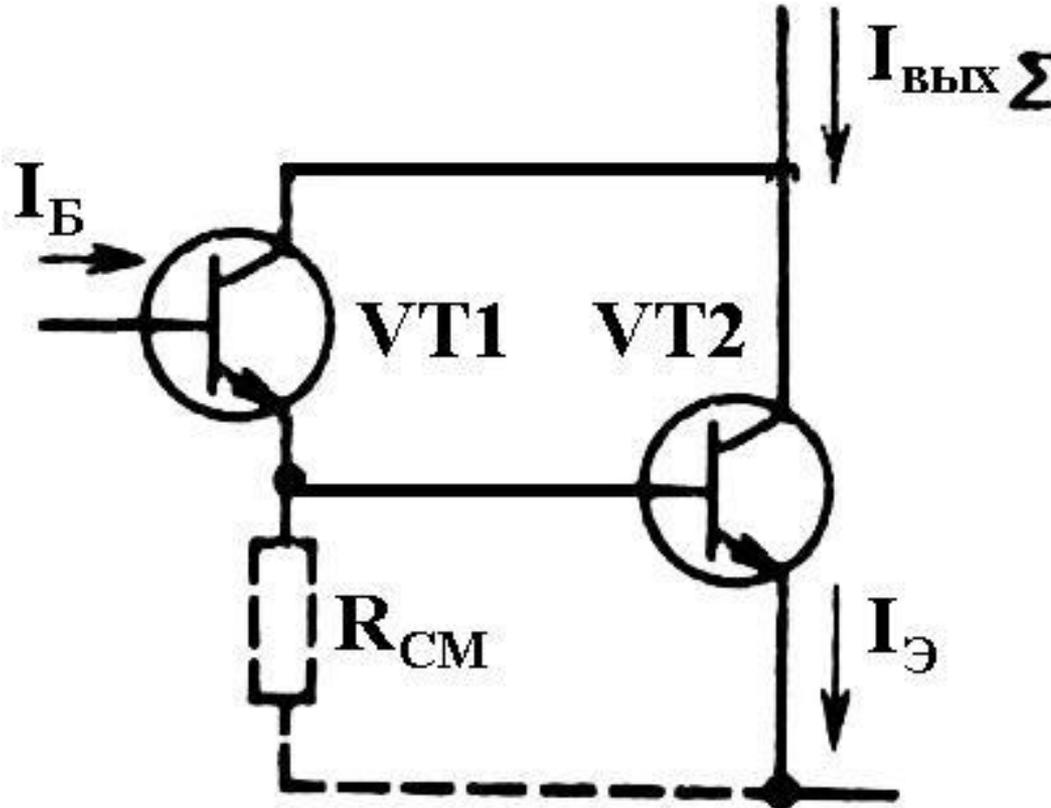
$$\begin{aligned} R_{\text{ВХк}} &= \frac{U_{\text{КБ}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}} + U_{\text{Н}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}} \cdot I_{\text{Э}}}{I_{\text{Б}} \cdot I_{\text{Э}}} + \frac{U_{\text{Н}}}{I_{\text{Б}}} = \\ &= \frac{U_{\text{ЭБ}}}{I_{\text{Э}}} \cdot \frac{I_{\text{Э}}}{I_{\text{Б}}} + \frac{I_{\text{Э}} \cdot R_{\text{Н}}}{I_{\text{Б}}} = R_{\text{ВХб}} (\beta + 1) + R_{\text{Н}} (\beta + 1) \end{aligned}$$



# Влияние температуры на характеристики транзисторов



# Составной транзистор (схема Ларригтона)



$$\beta_{K1} = I_{K1} / I_{B1} = I_{K1} / (I_{B1} + I_{E1}) \quad \beta_{K2} = I_{K2} / I_{B2} = I_{K2} / (I_{B2} + I_{E2}) \quad I_{B2} = I_{Э1}$$



## Составной транзистор (схема Дарлингтона)

$$I_{КБ0} = 0$$

$$I_{К2} = (I_{Э1} - I_{К1})\beta_1 + (I_{Б1} - I_{Б1})\beta_1 + I_{Б1}(\beta_1 - 1)\beta_1 + I_{К2}$$

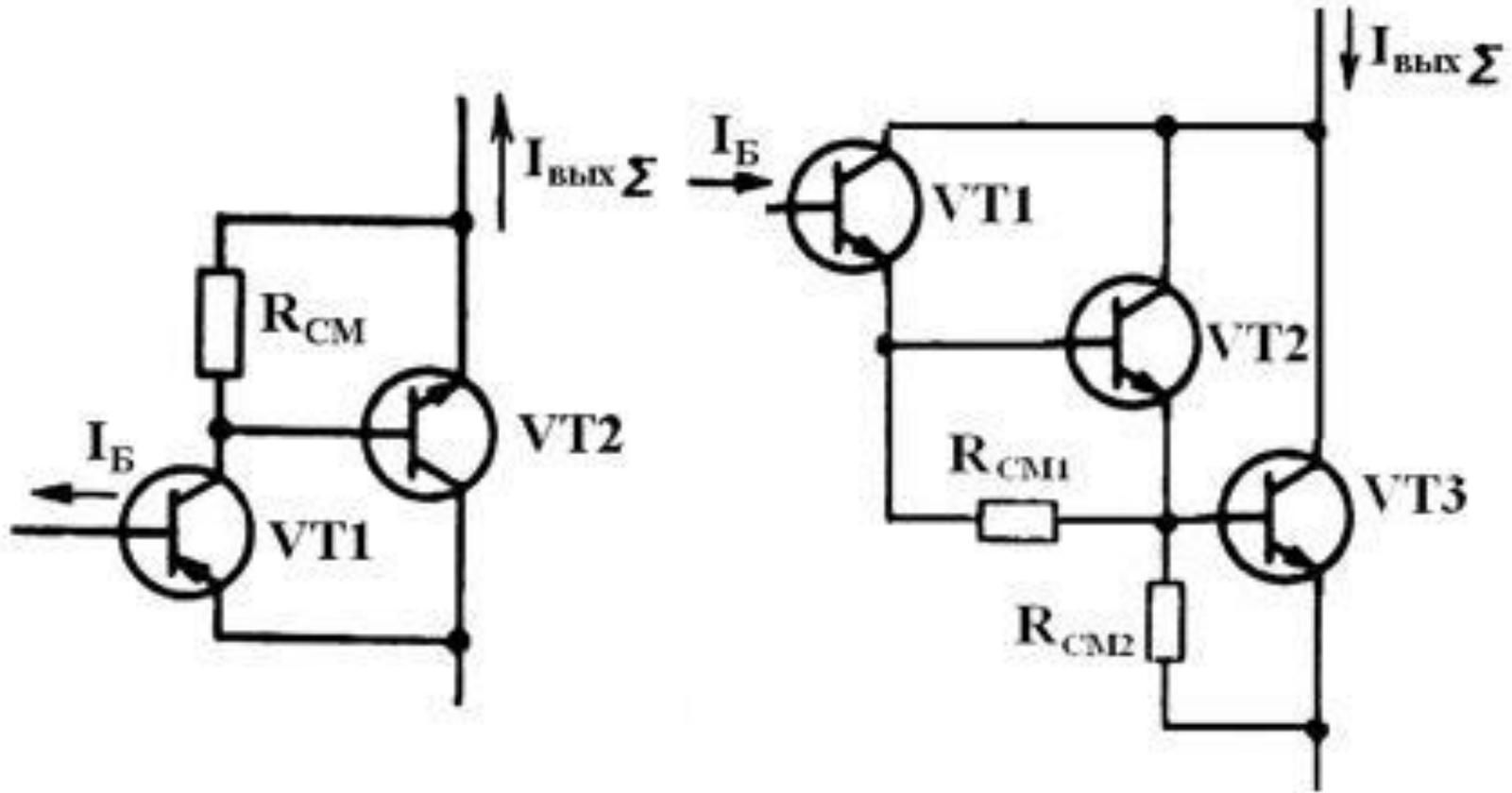
$$I_{ВЫХ.Σ} = (I_{К1} + I_{К1})\beta_1 + I_{Б1}(\beta_1 + \beta_1\beta_2) + I_{Б1} + I_{К2}$$

$$\beta_1 + \beta_2 \leq \beta_1 \cdot \beta_2$$

$$I_{ВЫХ.Σ} = I_{Б1} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2$$



# Составной транзистор (схема Ларригтона)



# Источник тока

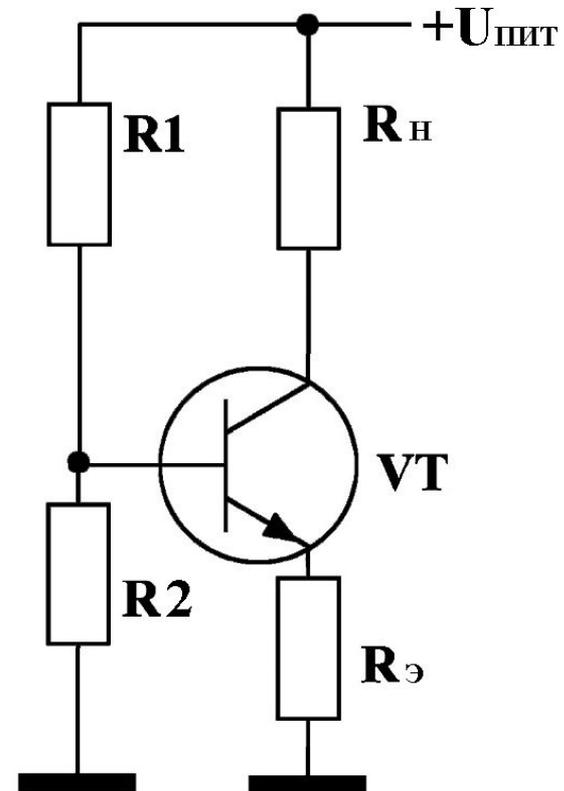
Ток коллектора

$$I_K = \frac{\beta(U_B - U_{БЭ})}{R_B + R_{Э}}$$

Здесь

$$U_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ПИТ}$$

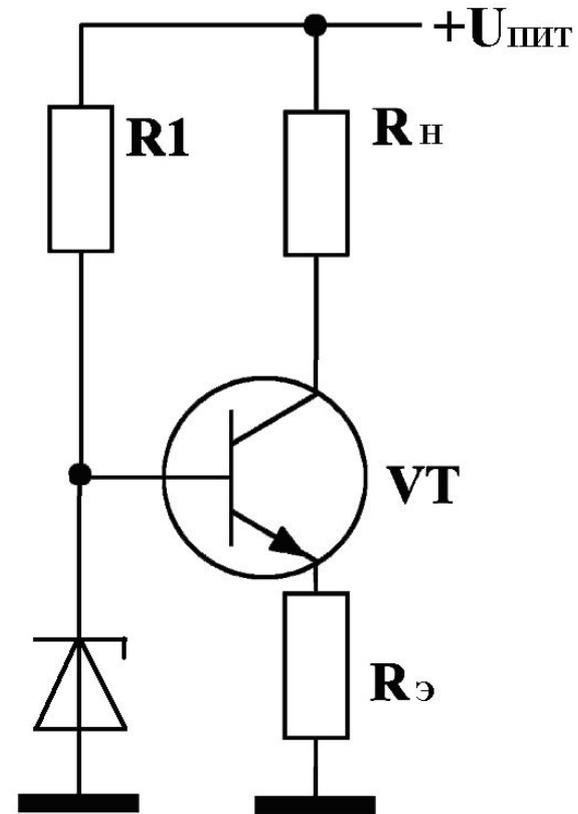
$$R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$



# Улучшенная схема источника тока

Ток коллектора  
(выходной ток)

$$I_K = I_{\text{ВЫХ}} = \frac{\beta(U_D - U_{\text{БЭ}})}{R_1 + 1}$$



# «Токовое зеркало»

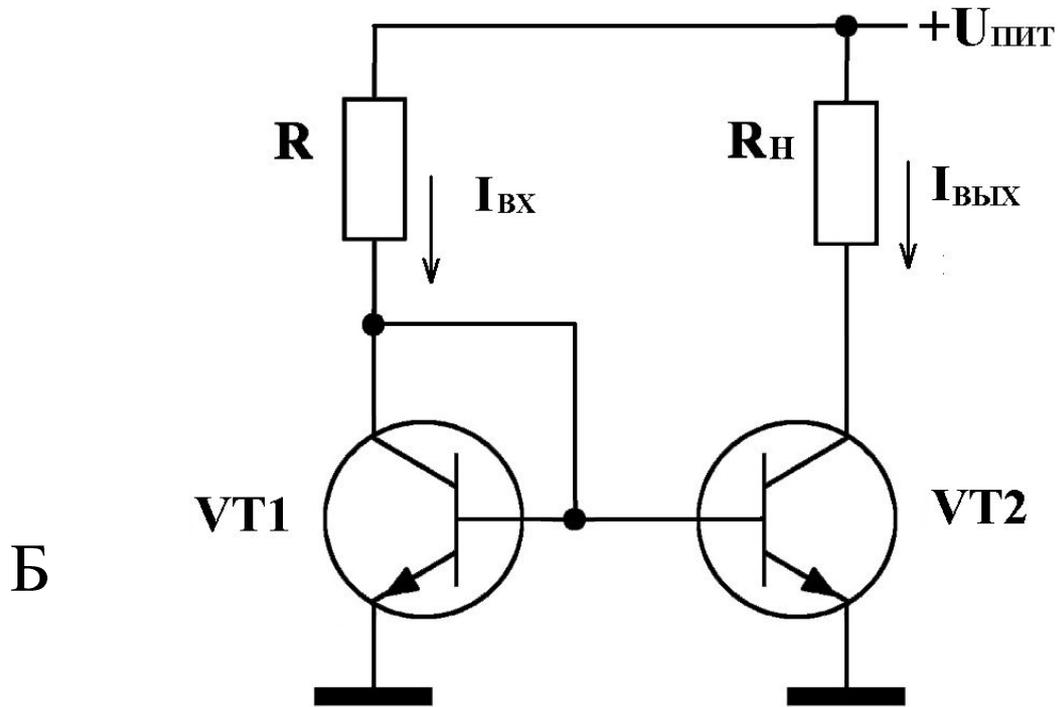
$$U_{БЭ1} = U_{БЭ2}$$

$$I_{Б1} = I_{Б2} = I_{Б}$$

$$\beta I_{Б1} = I_{К2} =$$

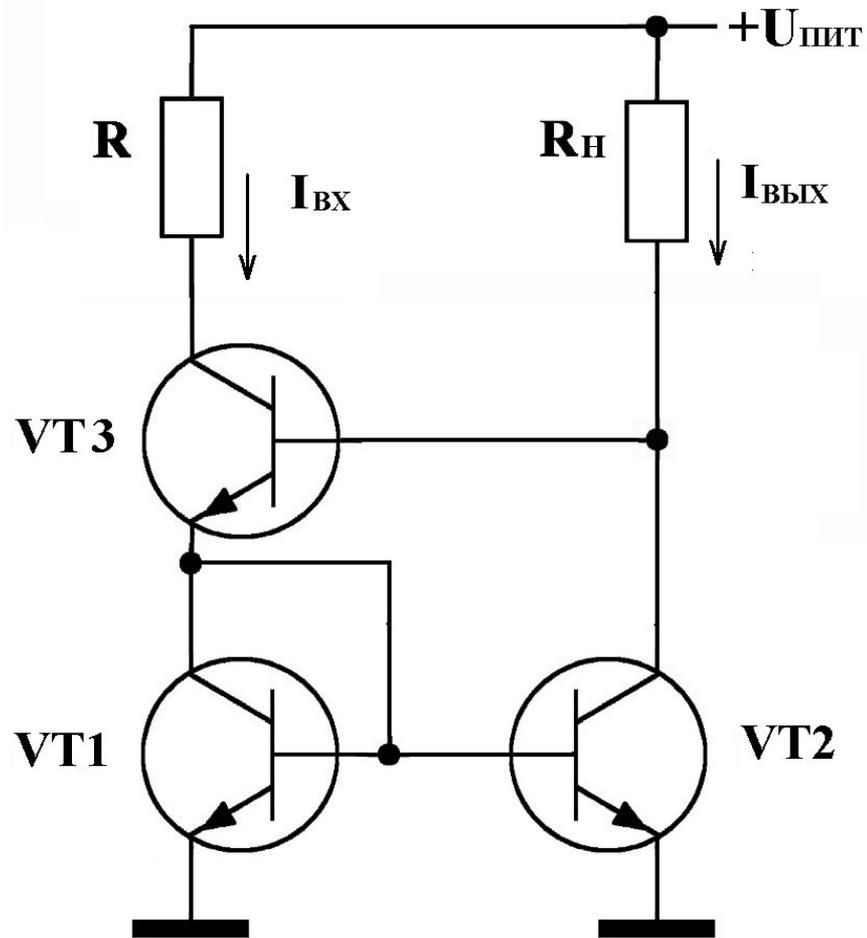
$$\beta I_{Б} = +2I_{Б}$$

$$I_{Н} = I_{Б}$$



$$I_{Н} = I_{Б} = \frac{\beta}{\beta + 2) I_0 \approx I_0$$

# «Токовое зеркало» Уилсона



## Контрольное задание

Какая из схем включения транзистора  
имеет:

- а- наибольшее входное сопротивление
- б – наибольший коэффициент усиления по току
- в – наибольший коэффициент усиления по напряжению



**Лучше** совсем не знать чего-либо, чем знать  
плохо.

*Публилий Сир*



**Продолжение**

**следует**