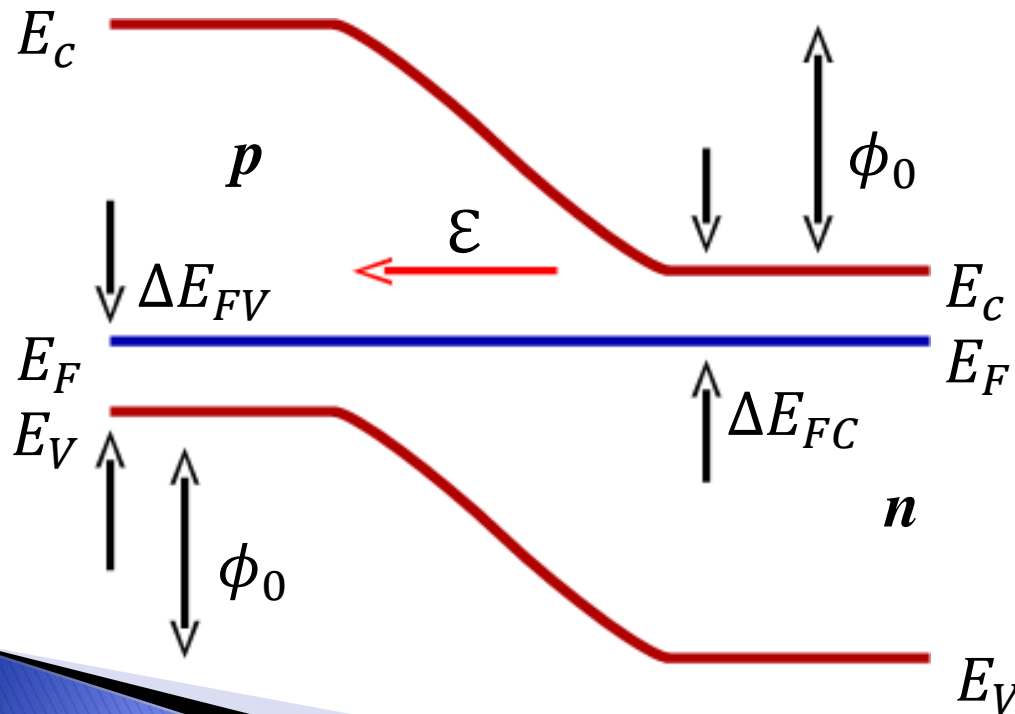
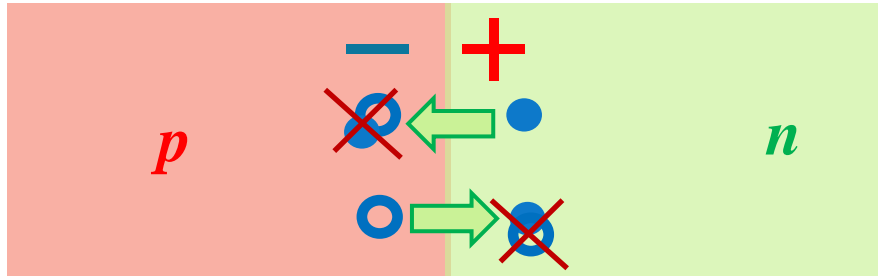




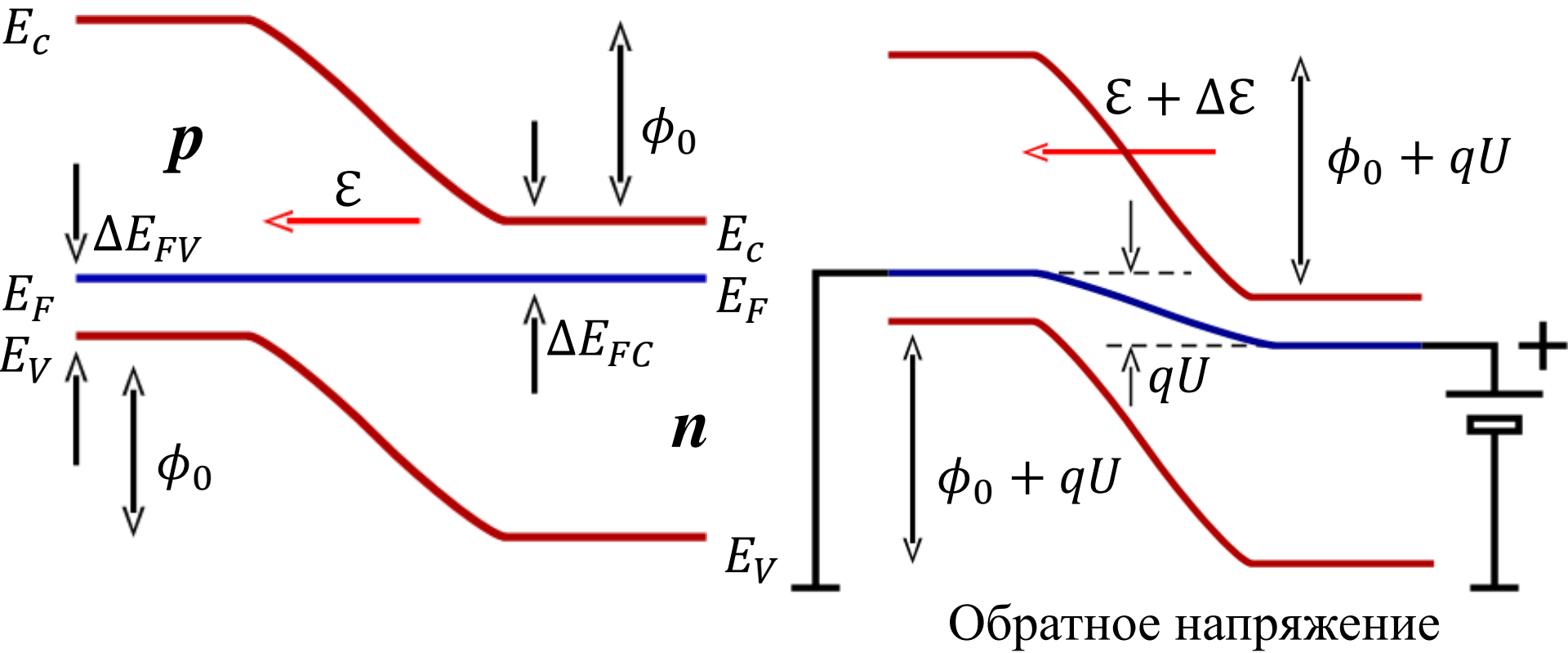
p-n переход: соединяем два несобственных полупроводника с разным типом допирования и одинаковой шириной запрещенной зоны



Установится термодинамическое равновесие – уровень Ферми одинаков с обеих сторон!

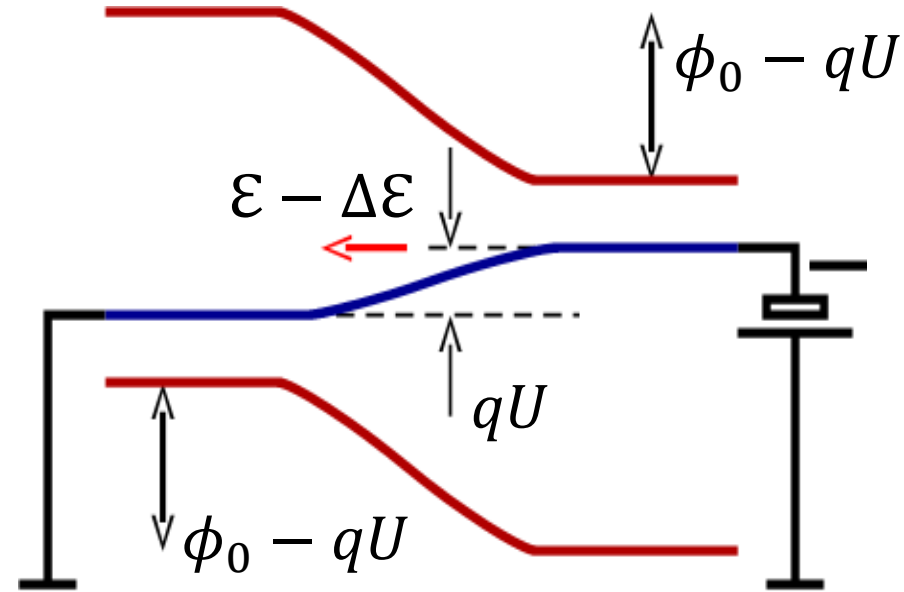
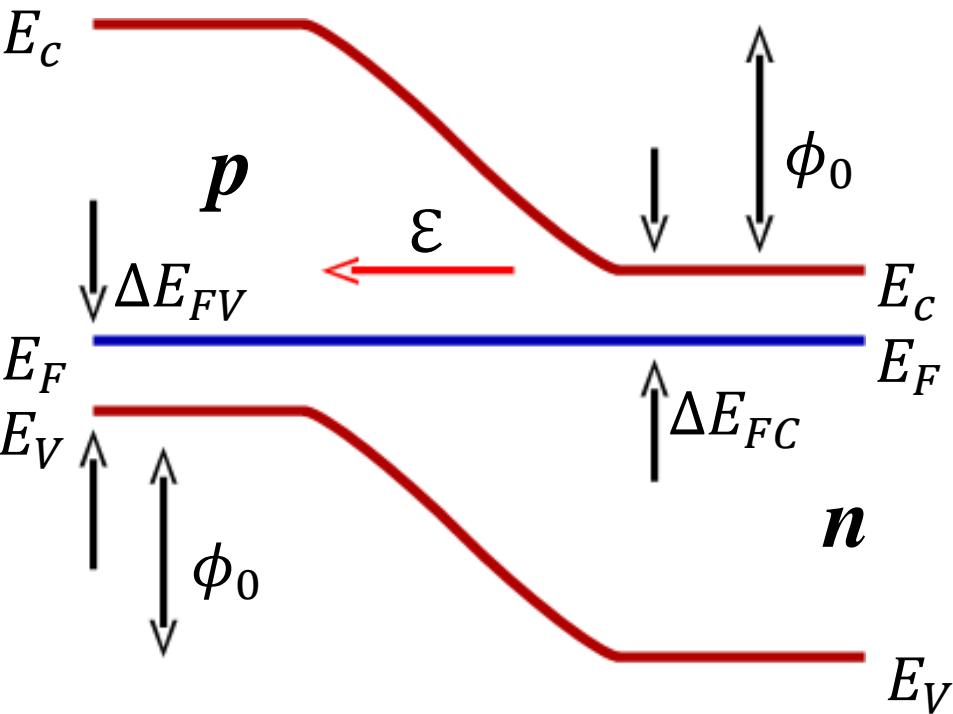


# Энергетическая диаграмма р-п контакта





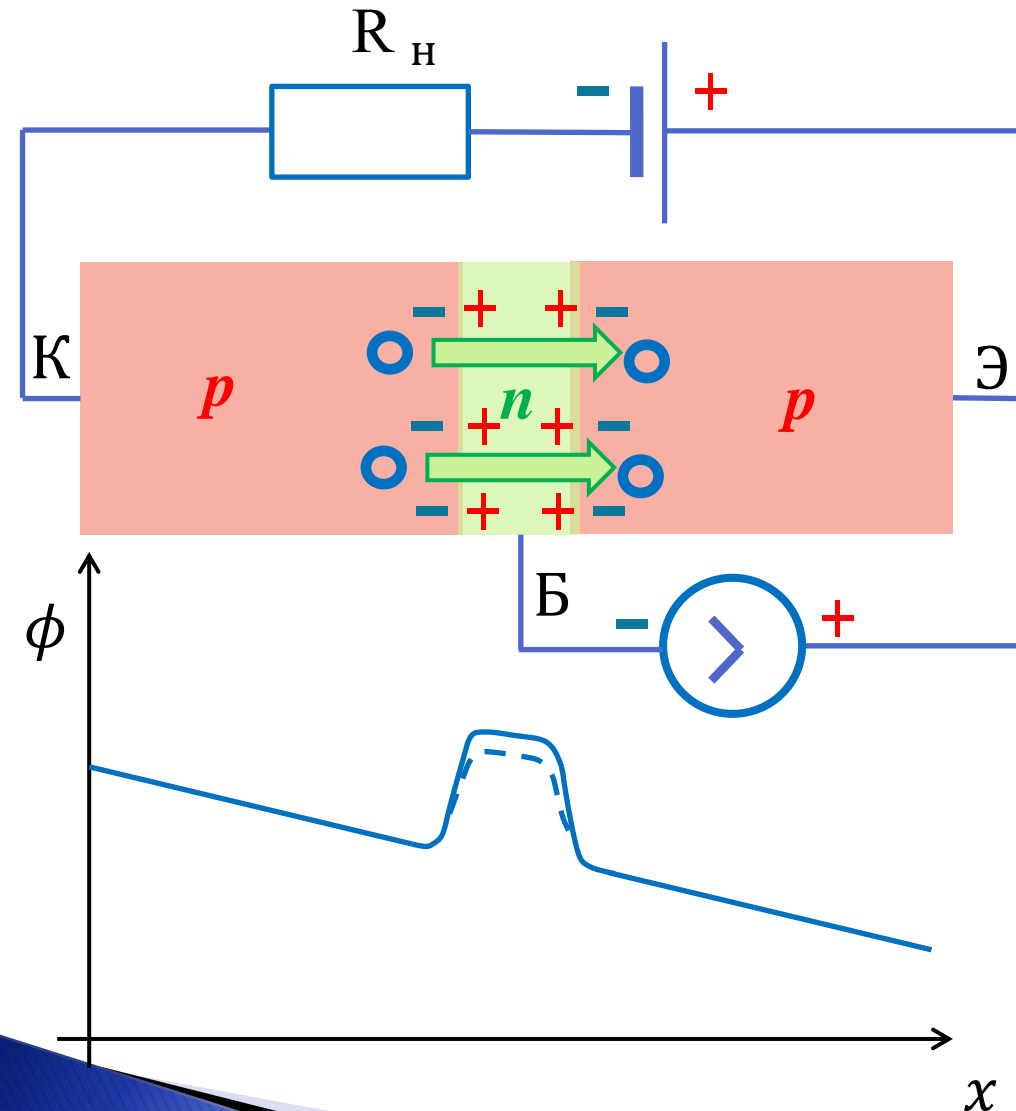
# Энергетическая диаграмма р-п контакта



Прямое напряжение



# Биполярный транзистор



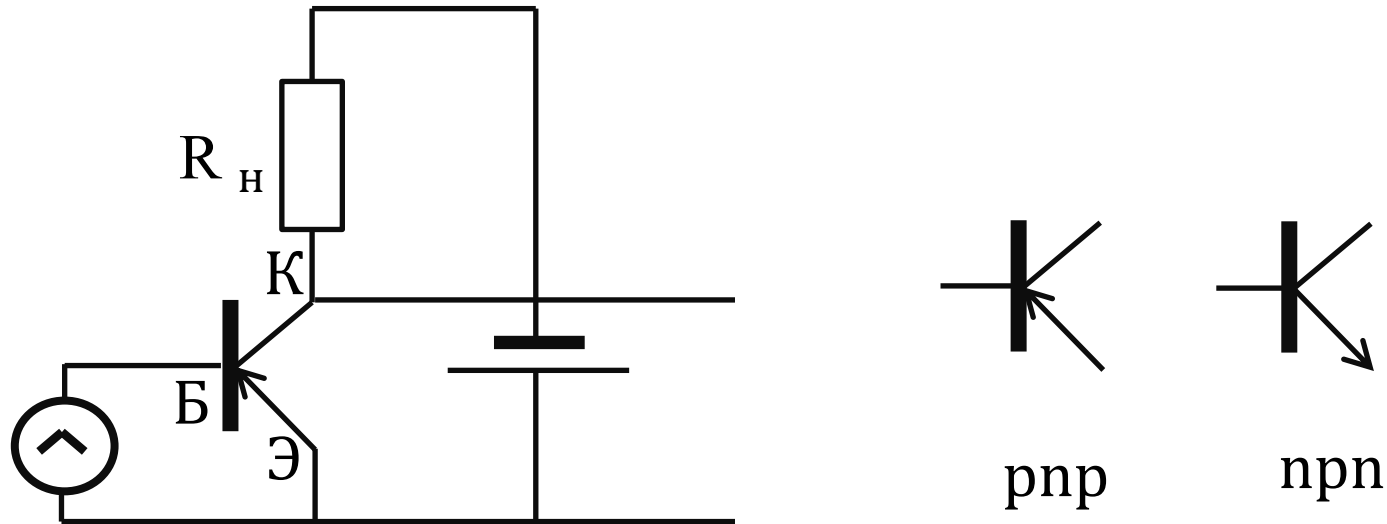
1). Толщина базы  $\ll$  диффузионной длины

2).  $I_b \ll I_K \rightarrow I_E \sim I_K$   
большинство дырок  
«промахиваясь»  
(не рекомбинируя)  
достигают коллектора.

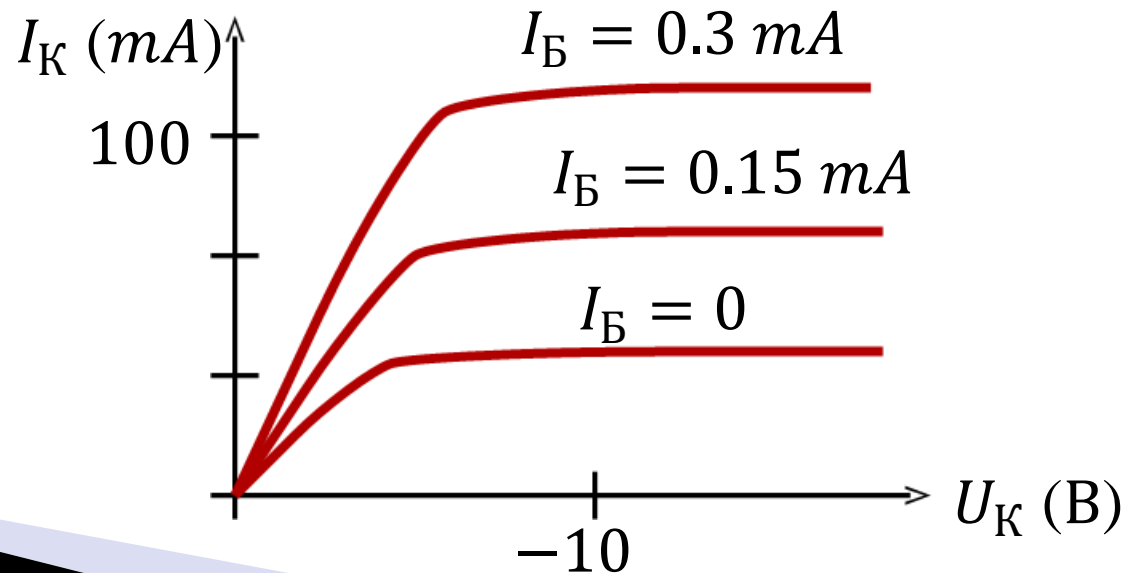
1). Изменение тока базы  
меняет высоту  
потенциального барьера



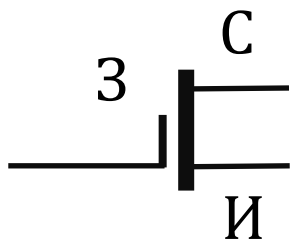
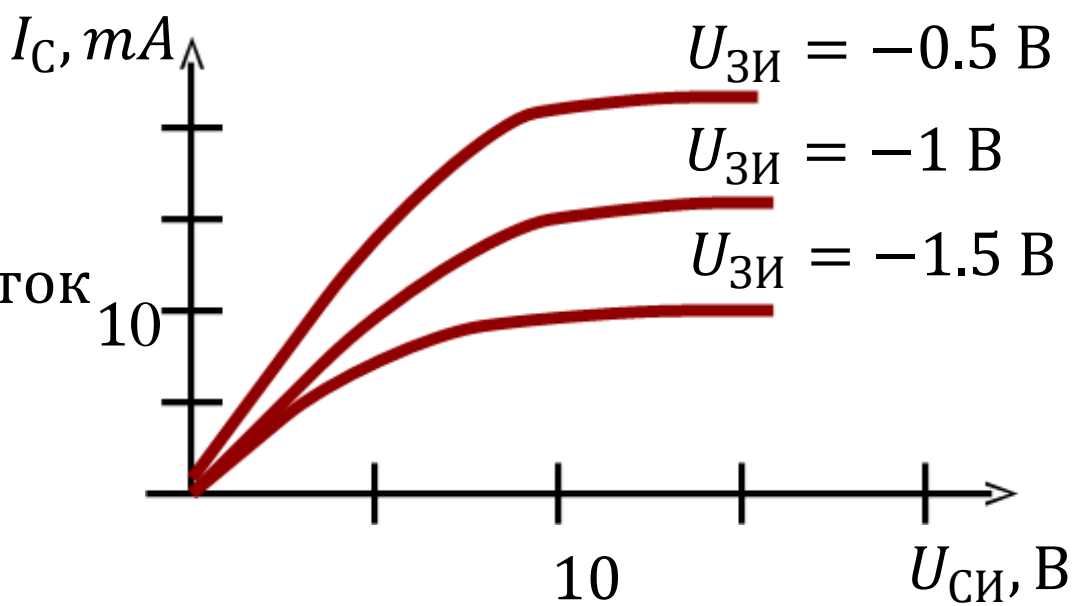
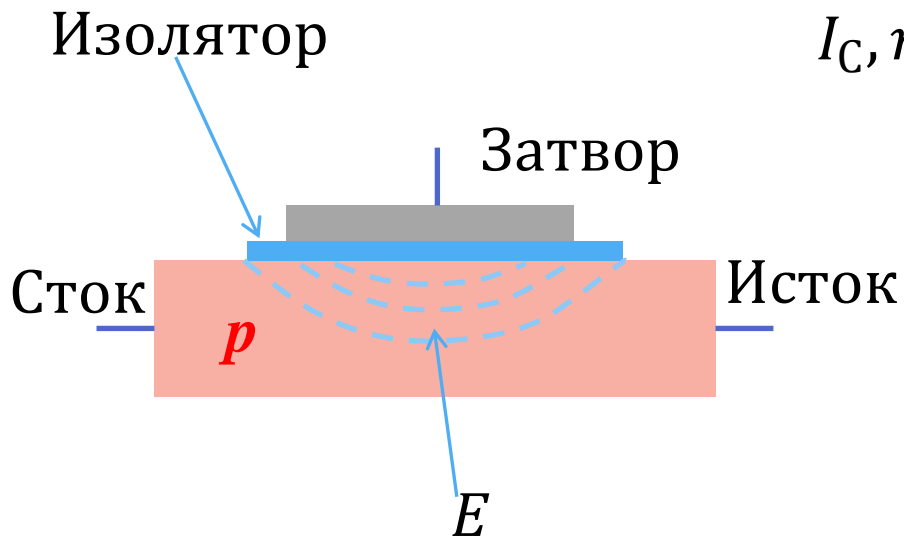
# Биполярный транзистор



## Типичные характеристики биполярного транзистора



# Полевой транзистор (FET)



$$S_{\text{дифф}} = -\frac{\partial I_C}{\partial U_{ЗИ}} \sim 0,2 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$R_{\text{вх}} = R_{ЗИ} = \frac{\partial U_{ЗИ}}{\partial I_3} = 10^8 \dots 10^{12} \text{ Ом,}$$

$$R_{СИ} \sim 10^4 \text{ Ом,} \quad f = 0 \dots 10^{11} \text{ Гц}$$



# Основные параметры полевого транзистора

Входное сопротивление

$$R_{ВХ} = \frac{\partial U_3}{\partial I_3} \approx 10^8 \dots 10^{12} \text{ Ом} \quad (1)$$

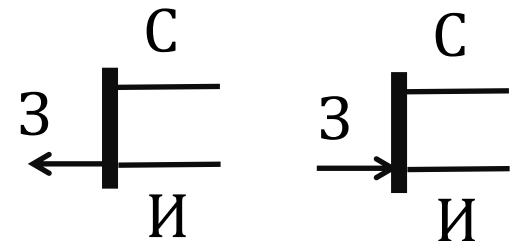
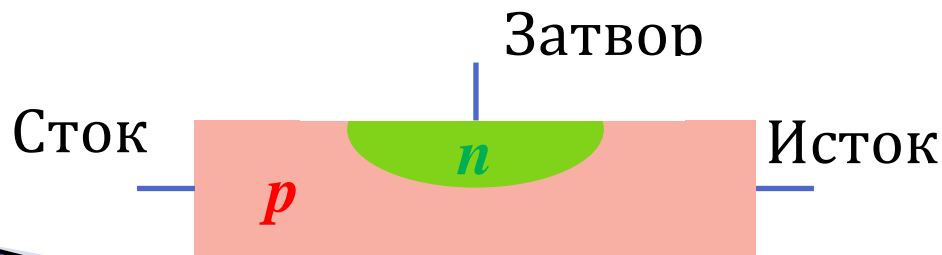
Крутизна

$$S = \frac{\partial I_C}{\partial U_3} \approx 10^{-3} \text{ 1/Ом} \quad (2)$$

Выходное сопротивление

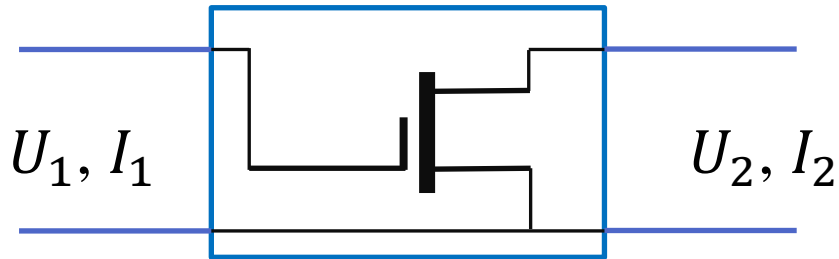
$$R_{ВЫХ} = \frac{\partial U_C}{\partial I_C} \approx 10^4 \text{ Ом} \quad (3)$$

## Полевой транзистор с полупроводниковым затвором





# Транзистор как четырехполюсник



Статические параметры:

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2$$

Дифференциальные параметры:

$$\Delta U_1 = \left. \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \right|_{\Delta U_2=0} \Delta I_1 + \left. \frac{\partial U_1}{\partial U_2} \right|_{\Delta I_1=0} \Delta U_2$$

$$\Delta I_2 = \left. \frac{\partial I_2}{\partial I_1} \right|_{\Delta U_2=0} \Delta I_1 + \left. \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \right|_{\Delta I_1=0} \Delta U_2$$





Полевой транзистор:

$$\Delta U_3 = \left. \frac{\partial U_3}{\partial I_3} \right|_{\Delta U_C=0} \Delta I_3 + \left. \frac{\partial U_3}{\partial U_C} \right|_{\Delta I_3=0} \Delta U_C$$

$$\Delta I_C = \left. \frac{\partial I_C}{\partial I_3} \right|_{\Delta U_C=0} \Delta I_3 + \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_C} \right|_{\Delta I_3=0} \Delta U_C$$

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{\partial U_3}{\partial I_3} \approx 10^8 \dots 10^{12} \text{ Ом}, \quad R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\partial U_C}{\partial I_C} \approx 10^4 \text{ Ом},$$

$$S = \frac{\partial I_C}{\partial U_3} \approx 10^{-3} \text{ 1/Ом},$$



Полевой транзистор:

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{\partial U_3}{\partial I_3} \approx 10^8 \dots 10^{12} \text{ Ом}, \quad R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\partial U_C}{\partial I_C} \approx 10^4 \text{ Ом},$$

$$S = \frac{\partial I_C}{\partial U_3} \approx 10^{-3} \text{ 1/Ом},$$

Усиление по току:

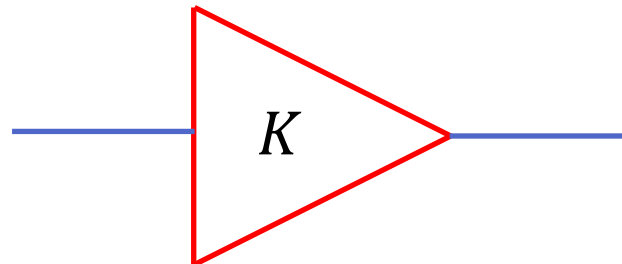
$$\frac{\partial I_C}{\partial I_3} = \frac{\partial I_C}{\partial U_3} \times \frac{\partial U_3}{\partial I_3} = SR_{\text{ЗИ}} \approx 10^{-3} \times 10^{12} = \mathbf{10^9} \text{ (!)}$$

Усиление по напряжению:

$$\frac{\partial U_C}{\partial U_3} = \frac{\Delta I_C R_{\text{СИ}}}{\Delta I_3 R_{\text{ЗИ}}} \approx 10^9 \times \frac{10^4}{10^8 \dots 10^{12}} \approx \mathbf{10 \dots 10^5}$$



# Усилители электрических сигналов



$K$  - коэффициент усиления (= передачи)

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(\omega)}{U_{\text{ВХ}}(\omega)} \quad \text{— частотная зависимость}$$

$|\tilde{K}(\omega)|$  — амплитудно — частотная характеристика,

$\arg(\tilde{K}(\omega))$  — фазово — частотная характеристика,

$K(U_{\text{ВХ}})$  — амплитудная характеристика (учет нелинейности)



## Децибелы:

$$N[\text{dB}] = 10 \log \frac{W_{\text{ВЫХ}}}{W_{\text{ВХ}}} = 20 \log \frac{|U_{\text{ВЫХ}}|}{|U_{\text{ВХ}}|},$$
$$K = \frac{|U_{\text{ВЫХ}}|}{|U_{\text{ВХ}}|},$$

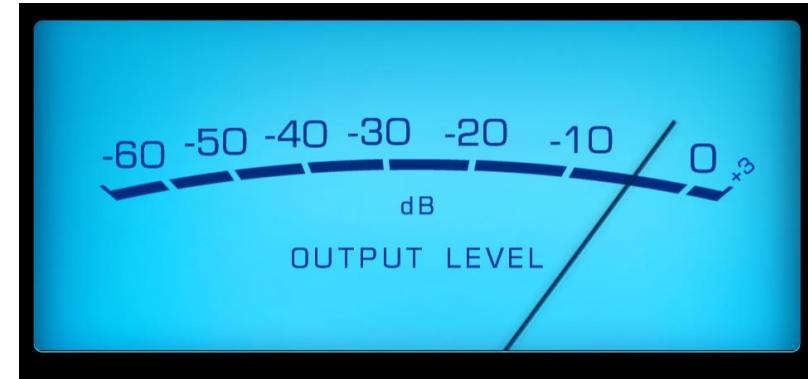
### Примеры:

$$K = 100, \Rightarrow N = 40 \text{ Дб},$$

### Каскад усилителей:

$$K_{\Sigma} = K_1 \times K_2 \times K_3,$$
$$N_{\Sigma} = N_1 + N_2 + N_3,$$

$$N[\text{dBm}] = 10 \log \frac{W}{1 \text{ мВт}}$$

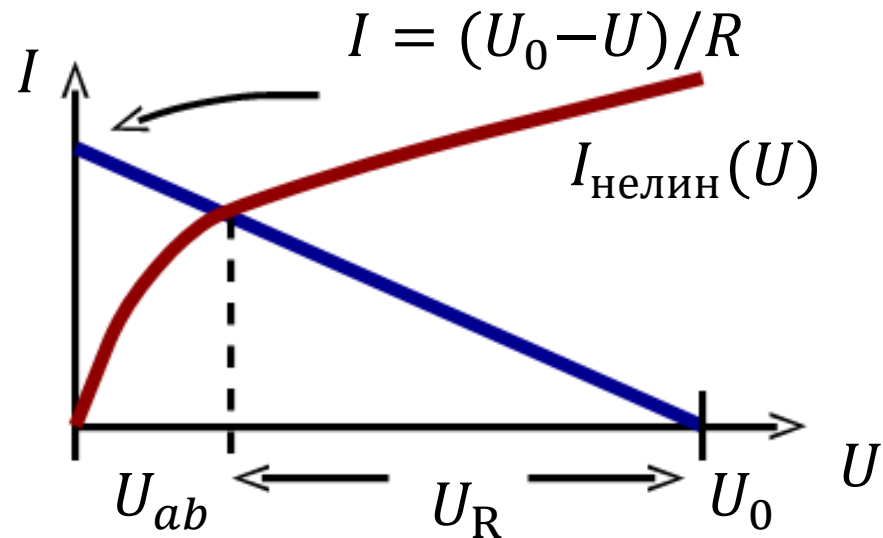
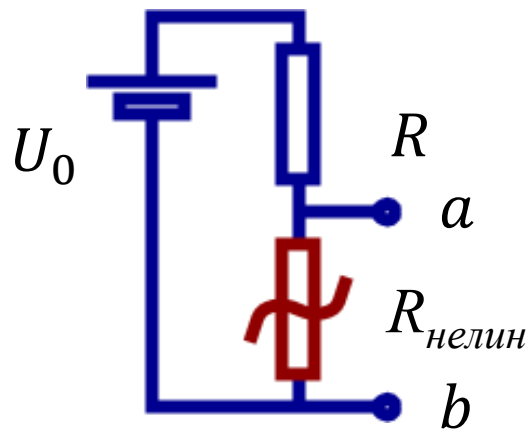




# Расчет цепи с нелинейным сопротивлением

Пусть нелинейная характеристика  $I_{\text{нелин}}(U)$  известна.

$$I_{\text{нелин}}(U_{ab}) = (U_0 - U_{ab})/R$$

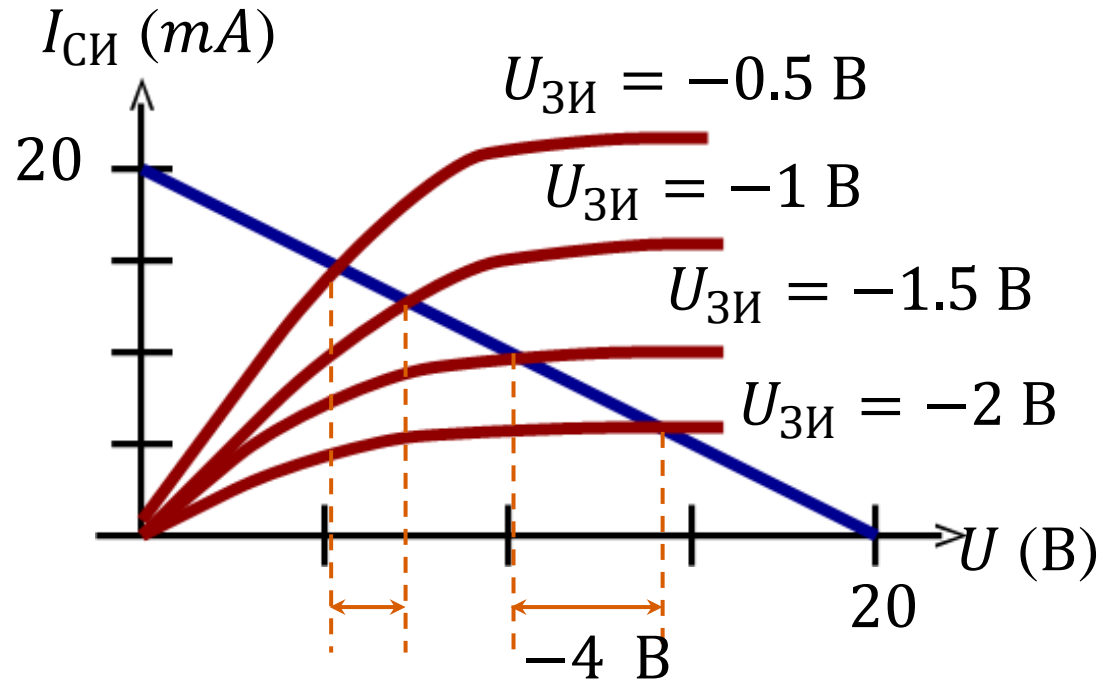
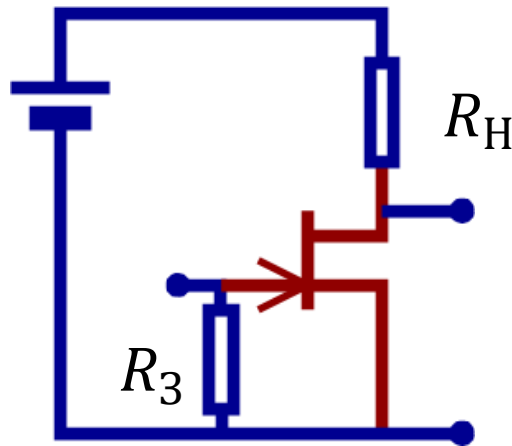


Полевой транзистор - нелинейное сопротивление, управляемое напряжением на затворе.



# Пример: графический расчет статического $K$

$$U_0 = 20 \text{ В} \quad R_H = 1 \text{ кОм}$$



Рабочая точка:

$$U_{3\_0} \cong -2 \text{ В}$$

$$K_U = \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta U_{3И}} = \frac{-4 \text{ В}}{0,5 \text{ В}} = -8,$$

**Инвертирующий усилитель  $\Rightarrow$  знак  $K_U$  отрицательный.**

Из графика видны нелинейные искажения  $\Rightarrow K_U(U_{3И})$ .

При  $U_{3\_0} = -1 \text{ В}$  коэффициент усиления **меньше:**

$$K_U \cong -4.$$



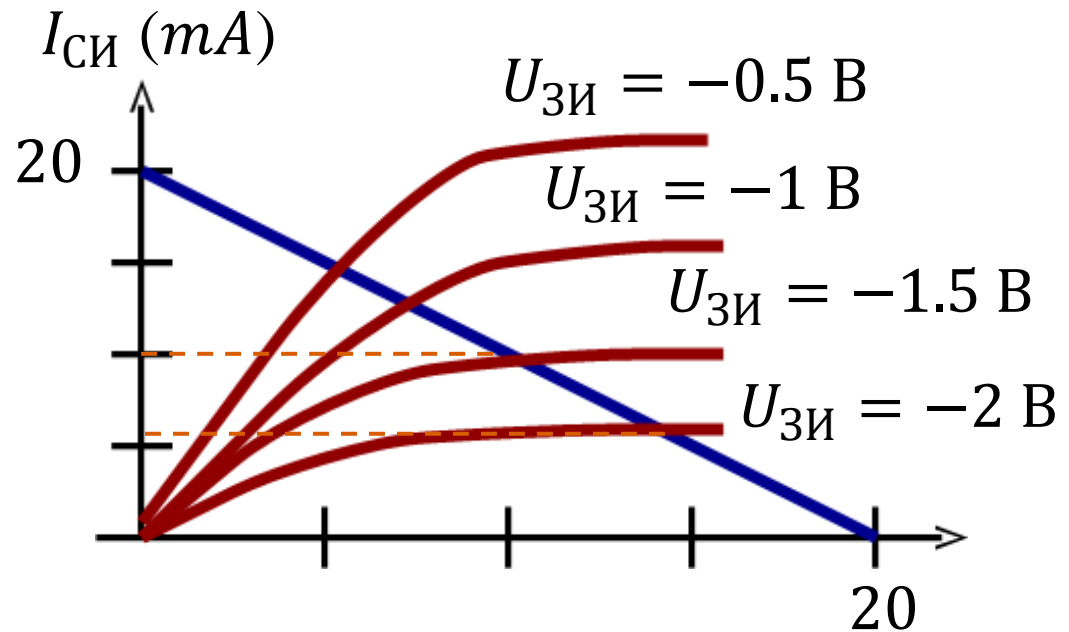
## Расчет коэффициента усиления по току и по мощности

Примем  $R_{\text{вх}} = 10^7 \text{ Ом}$ ,  
тогда из графика получаем

$$\Delta I_{\text{вх}} \approx \frac{0,5 \text{ В}}{10^7 \text{ Ом}} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ А}$$

$\Delta I_{\text{СИ}} \approx 5 \text{ мА}$  (см. график).

Следовательно,



$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{СИ}}}{\Delta I_{\text{вх}}} \approx 10^5.$$

$$K_W = \frac{\Delta I_{\text{СИ}}^2 R_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{вх}}^2 R_{\text{вх}}} = K_I^2 \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вх}}} \\ \approx 10^{10} \times \frac{10^3}{10^7} \approx 10^6.$$



## Аналитический расчет

$$\Delta U_0 = 0 = R_H \Delta I_{\text{ВЫХ}} + \Delta U_{\text{ВЫХ}} \Rightarrow \Delta I_{\text{ВЫХ}} = -\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{R_H} \quad (4)$$

$$\Delta I_{\text{ВЫХ}} = \underbrace{\frac{\partial I_{\text{ВЫХ}}}{\partial U_{\text{ВХ}}}}_S \Delta U_{\text{ВХ}} + \underbrace{\frac{\partial I_{\text{ВЫХ}}}{\partial U_{\text{ВЫХ}}}}_{1/R_{\text{СИ}}} \Delta U_{\text{ВЫХ}} \quad (5)$$

Крутизна  $S = \frac{\Delta I_{\text{СИ}}}{\Delta U_{\text{ЗИ}}} \cdot R_{\text{СИ}} = \frac{\Delta U_{\text{СИ}}}{\Delta I_{\text{СИ}}}$ . Подставляем (4)  $\rightarrow$  (5):

$$\frac{-\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{R_H} = S \Delta U_{\text{ВХ}} + \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{СИ}}},$$
$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} = -S \cdot \frac{R_H R_{\text{СИ}}}{R_H + R_{\text{СИ}}} = -\underbrace{S R_{\text{СИ}}}_{\mu} \cdot \frac{R_H}{R_H + R_{\text{СИ}}}$$

$\mu = S R_{\text{СИ}}$ . При  $R_{\text{СИ}} \gg R_H$  имеем  $K_U \cong -S R_H \cong -S Z_H(\omega)$ .

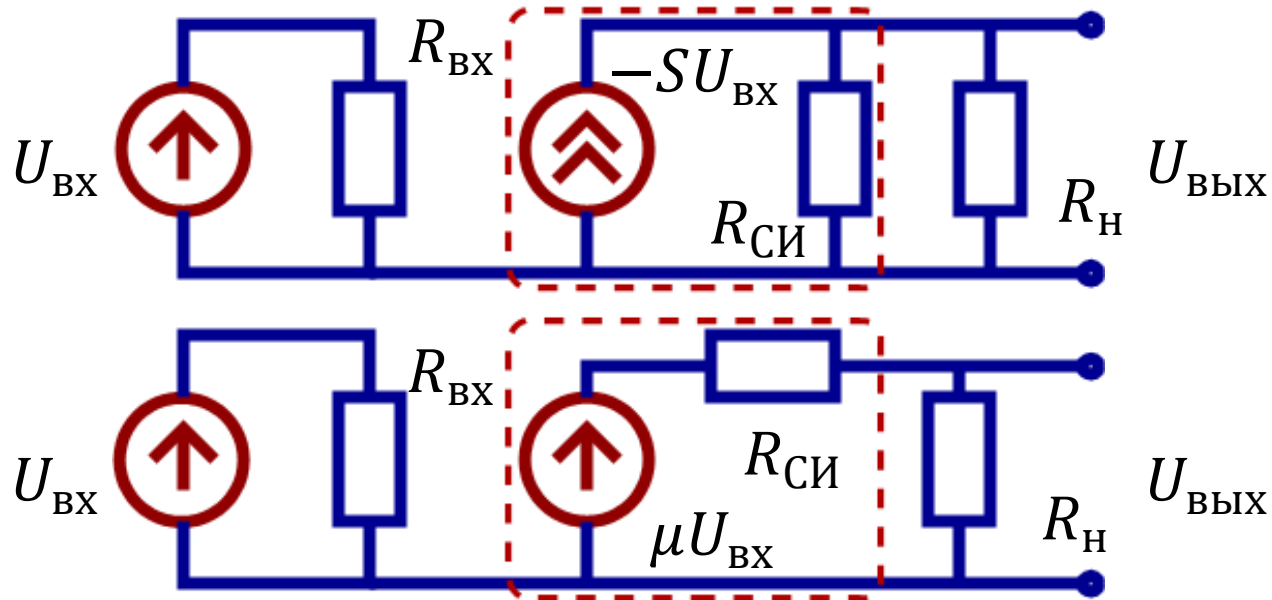
Величины  $S$  и  $R_{\text{СИ}}$  не постоянны, а зависят от выбора рабочей точки.





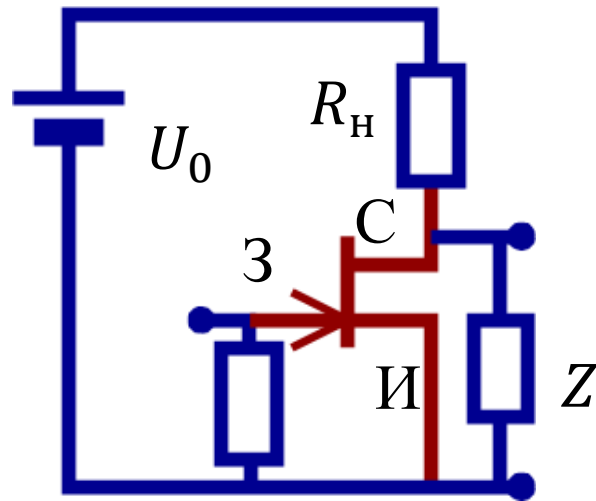
## Эквивалентные схемы усилителя

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = -S \Delta U_{\text{ВХ}} \times \frac{R_{\text{Н}} R_{\text{СИ}}}{R_{\text{Н}} + R_{\text{СИ}}} = -\mu \Delta U_{\text{ВХ}} \times \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Н}} + R_{\text{СИ}}}$$





## Расчет простого усилителя



$$0 = R_H \Delta I_{\text{ВЫХ}} + \Delta U_{\text{ВЫХ}} \quad (6)$$

$$\Delta I_{\text{ВЫХ}} = S \Delta U_{\text{ВХ}} + \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{СИ}}} + \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{Z} \quad (7)$$

Подставляя (6) в (7) получаем:

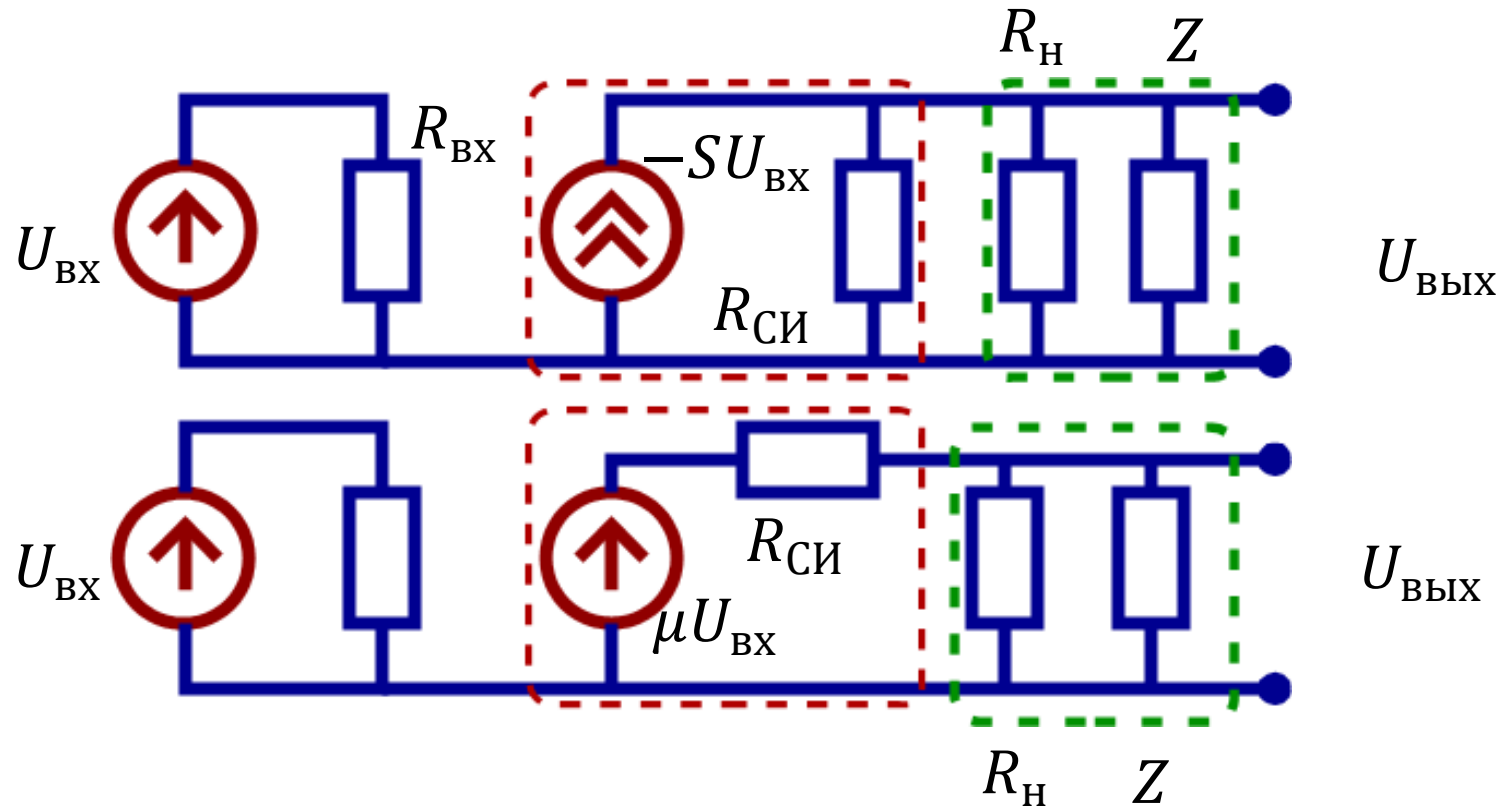
$$S \Delta U_{\text{ВХ}} = -\Delta U_{\text{ВЫХ}} \left( \frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_{\text{СИ}}} + \frac{1}{Z} \right), \quad (8)$$

$$S R_{\text{СИ}} \Delta U_{\text{ВХ}} = \mu \Delta U_{\text{ВХ}} = -\Delta U_{\text{ВЫХ}} \times \frac{R_{\parallel} + R_{\text{СИ}}}{R_{\parallel}}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{R_{\parallel}} = \frac{1}{R_H} + \frac{1}{Z}$$



Это соответствует эквивалентным схемам:



Сопротивления  $R_{Н}$  и  $Z$  включены параллельно (!)