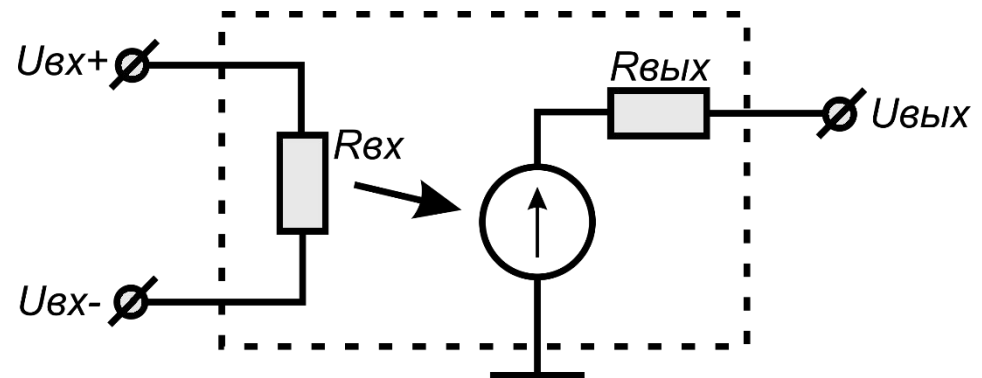
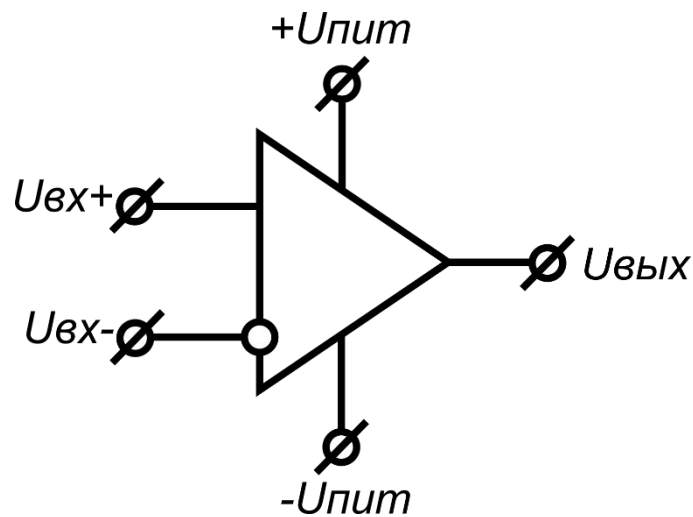


Аналоговая техника

Лекция 4.

Операционные усилители

- Операционный усилитель (ОУ) – основной элемент аналоговой схемотехники, на его базе реализуются узлы, выполняющие операции над аналоговыми сигналами. К таким операциям относятся масштабирование, сравнение, сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и т.д.

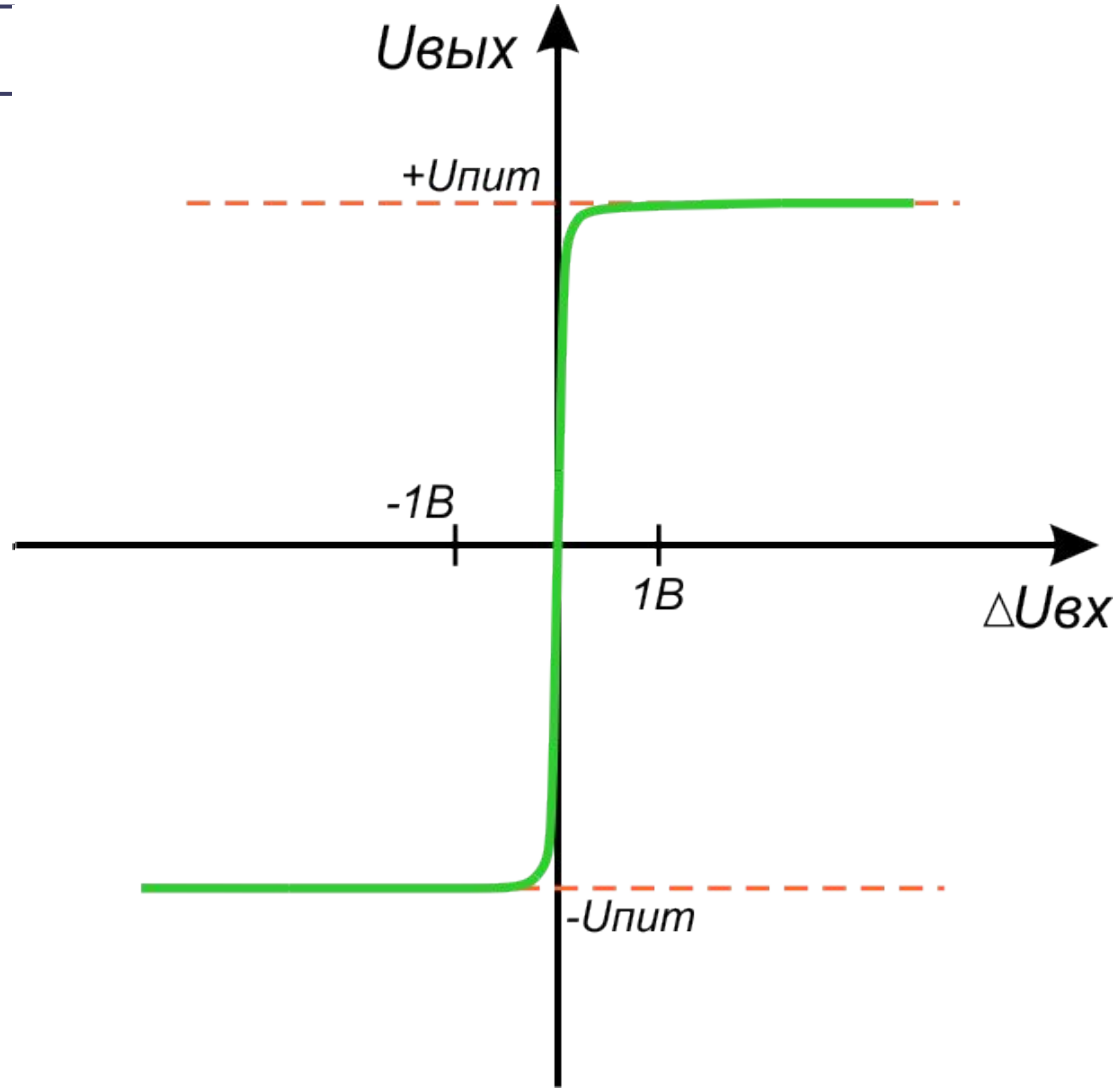


$$U_{\text{ВЫХ}} = k \cdot (U_{\text{ВХ+}} - U_{\text{ВХ-}})$$

- **Передаточная характеристика**

$$U_{\text{ВЫХ}} = k \cdot \Delta U_{\text{ВХ}}$$

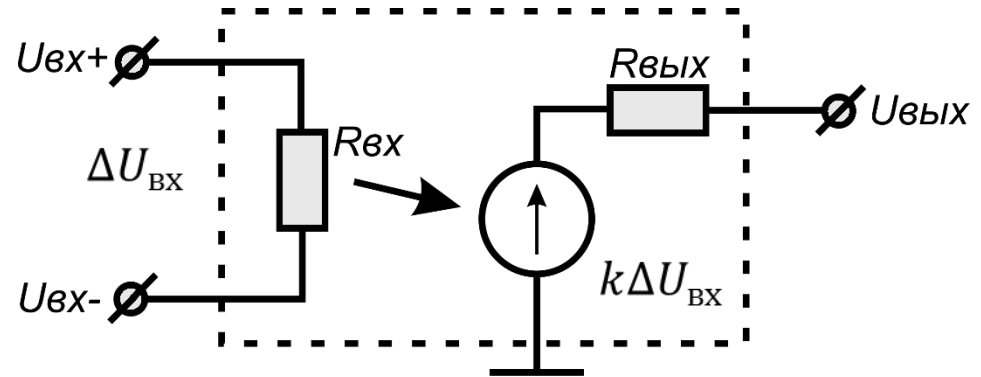
$$k = 10^5 \dots 10^6$$



- **Концепция идеального ОУ**

- применяется для инженерных расчетов схем на ОУ, при наличии обратной связи. Предполагается, что ОУ обладает следующими идеальными характеристиками:

- $k = \infty$
- $R_{ВХ} = \infty$
- $R_{ВЫХ} = 0$



$$R_{ВХ} = \infty$$

$$I_{ВХ+} \approx I_{ВХ-} \approx 0$$

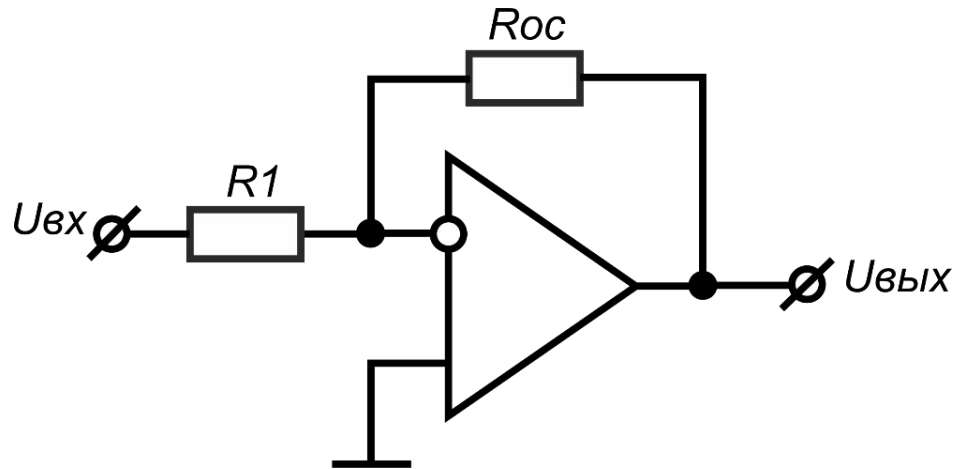
$$U_{ВЫХ} = k \cdot \Delta U_{ВХ} \quad \Delta U_{ВХ} \leq \frac{U_{ПИТ}}{K} = 0$$

$$U_{ВЫХ} \leq U_{ПИТ}$$

$$\varphi_+ = \varphi_-$$

- необходимо, чтобы ОУ был **охвачен отрицательной обратной связью** и работал **в линейном режиме!**

- **Инвертирующее включение**



$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \left(-\frac{R_{\text{OC}}}{R_1} \right)$$

$$\varphi_+ = 0 \text{ В} \quad \varphi_- = \varphi_+ = 0 \text{ В}$$

$$I_1 = \frac{U_{\text{ВХ}} - \varphi_-}{R_1} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1}$$

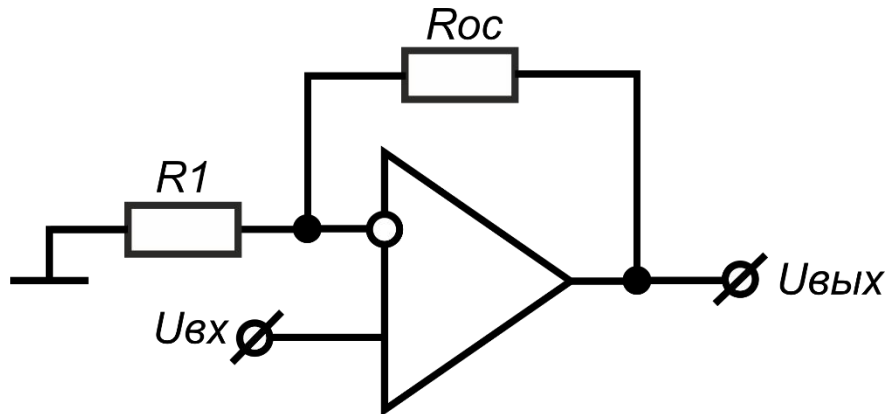
$$I_1 = I_{\text{ВХ-}} + I_{\text{OC}}$$

$$I_{\text{OC}} = I_1$$

$$I_{\text{OC}} R_{\text{OC}} = U_{R_{\text{OC}}} = \varphi_- - U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВЫХ}}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_{\text{OC}} R_{\text{OC}} = -\frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} \cdot R_{\text{OC}}$$

- **Неинвертирующее включение**



$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \left(1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right)$$

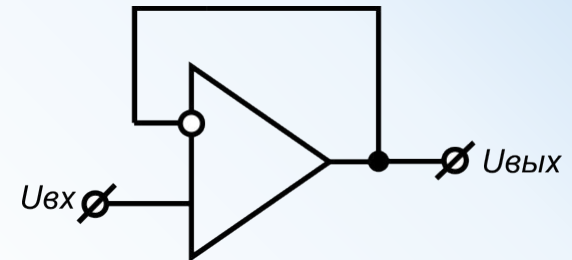
$$\varphi_+ = U_{\text{ВХ}} \quad \varphi_- = \varphi_+ = U_{\text{ВХ}}$$

$$I_1 = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} \quad I_{\text{ОС}} = I_1 = I$$

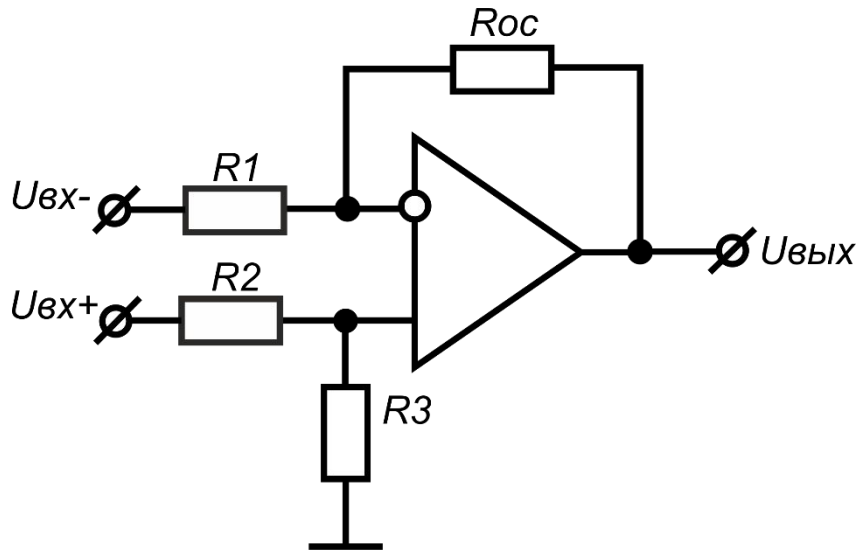
$$U_{\text{ВЫХ}} = I \cdot (R_{\text{ОС}} + R_1) = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} \cdot (R_{\text{ОС}} + R_1)$$

Повторитель напряжения

$$R_1 = \infty. \quad U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}$$



- Дифференциальное включение



$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{OC}}}{R_1} (U_{\text{ВХ+}} - U_{\text{ВХ-}})$$

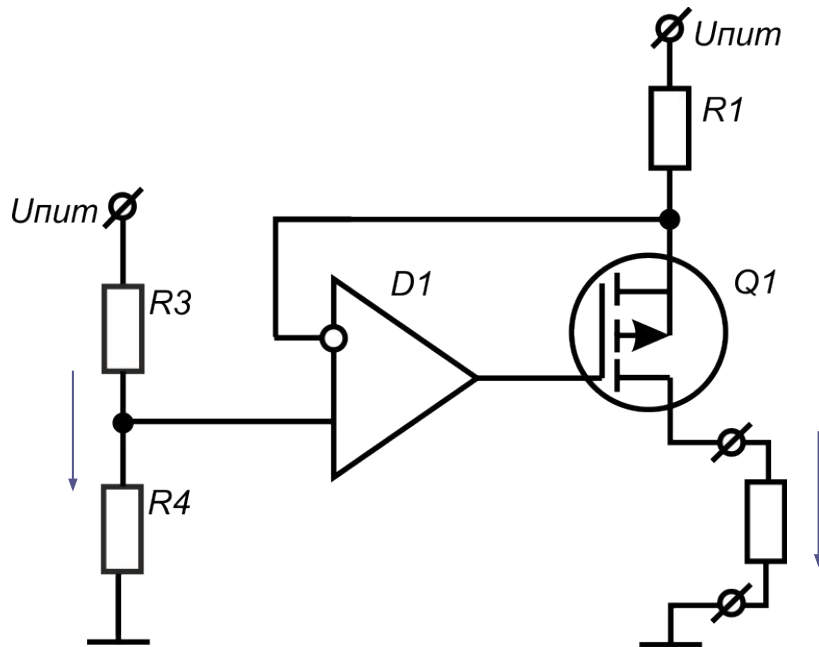
$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ-}} \left(-\frac{R_{\text{OC}}}{R_1} \right) + \varphi_{\text{ВХ+}} \left(1 + \frac{R_{\text{OC}}}{R_1} \right)$$

$$\varphi_{\text{ВХ+}} = U_{\text{ВХ+}} \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ-}} \left(-\frac{R_{\text{OC}}}{R_1} \right) + U_{\text{ВХ+}} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \left(1 + \frac{R_{\text{OC}}}{R_1} \right)$$

$$\frac{R_{\text{OC}}}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = k$$

- **Источники тока на ОУ**

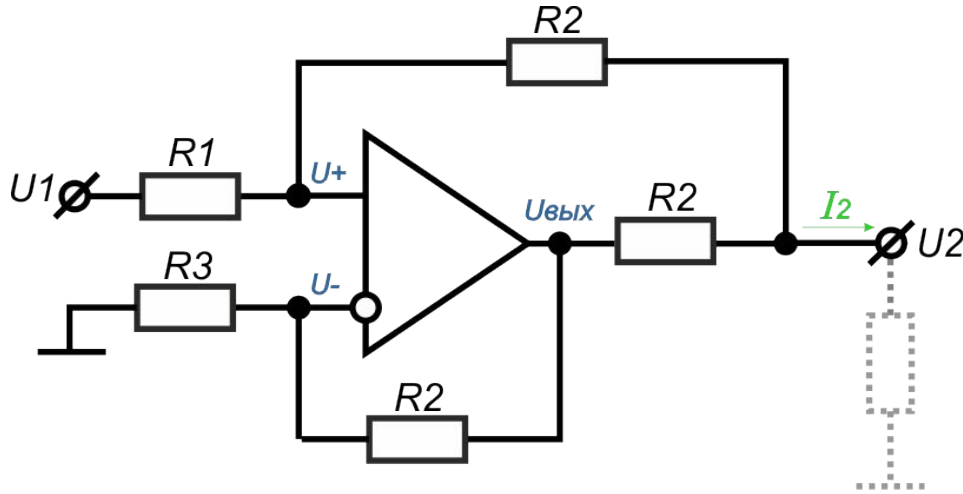


$$\varphi_- = \varphi_+ = U_{пит} \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$I_H = \frac{U_{пит} - \varphi_-}{R_1}$$

$$R_1 = R_3 \quad \rightarrow \quad I_H = \frac{U_{пит}}{R_3 + R_4}$$

- Источники тока на ОУ



$$I_2 = \frac{U_1}{R_1 || R_2}$$

$$\frac{(U_{\text{ВЫХ}} - U_+)}{R_2} - \frac{U_+}{R_3} = 0$$

$$I_2 = \left(\frac{1}{2R_2} + \frac{R_2 + R_3}{2R_1R_3} \right) U_1 + \left(\frac{R_2 + R_3}{2R_1R_3} - \frac{R_1 + 2R_2}{2R_1R_2} \right) U_2$$

$$\frac{(U_1 - U_+)}{R_2} - \frac{(U_2 - U_+)}{R_2} = 0$$

$$R_3 = \frac{R_2^2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{(U_{\text{ВЫХ}} - U_2)}{R_1} - \frac{(U_2 - U_+)}{R_2} - I_2 = 0$$