

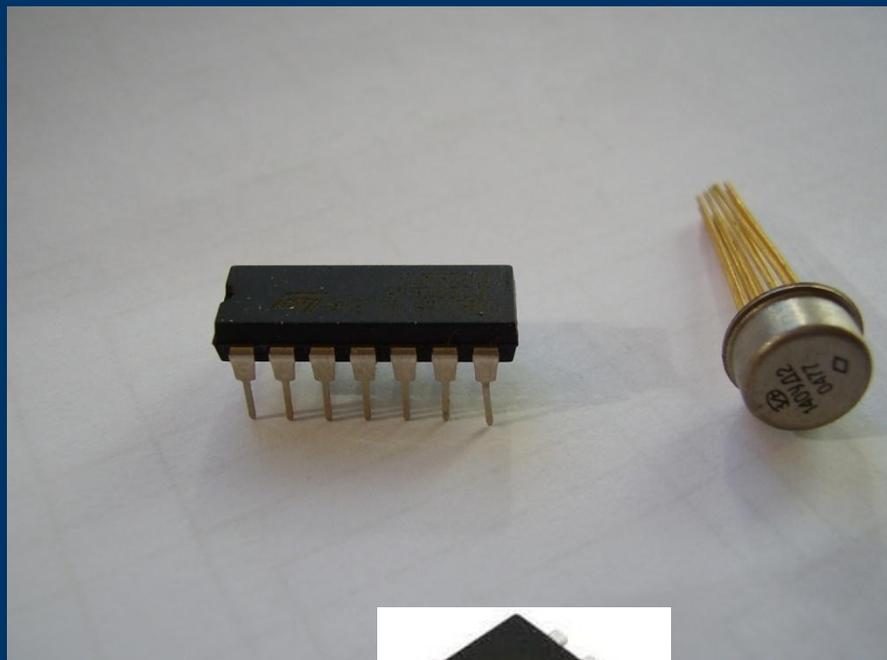
Курс «Электроника и информационно-измерительная техника»
Лектор: Зализный Д.И.

Лекция 10

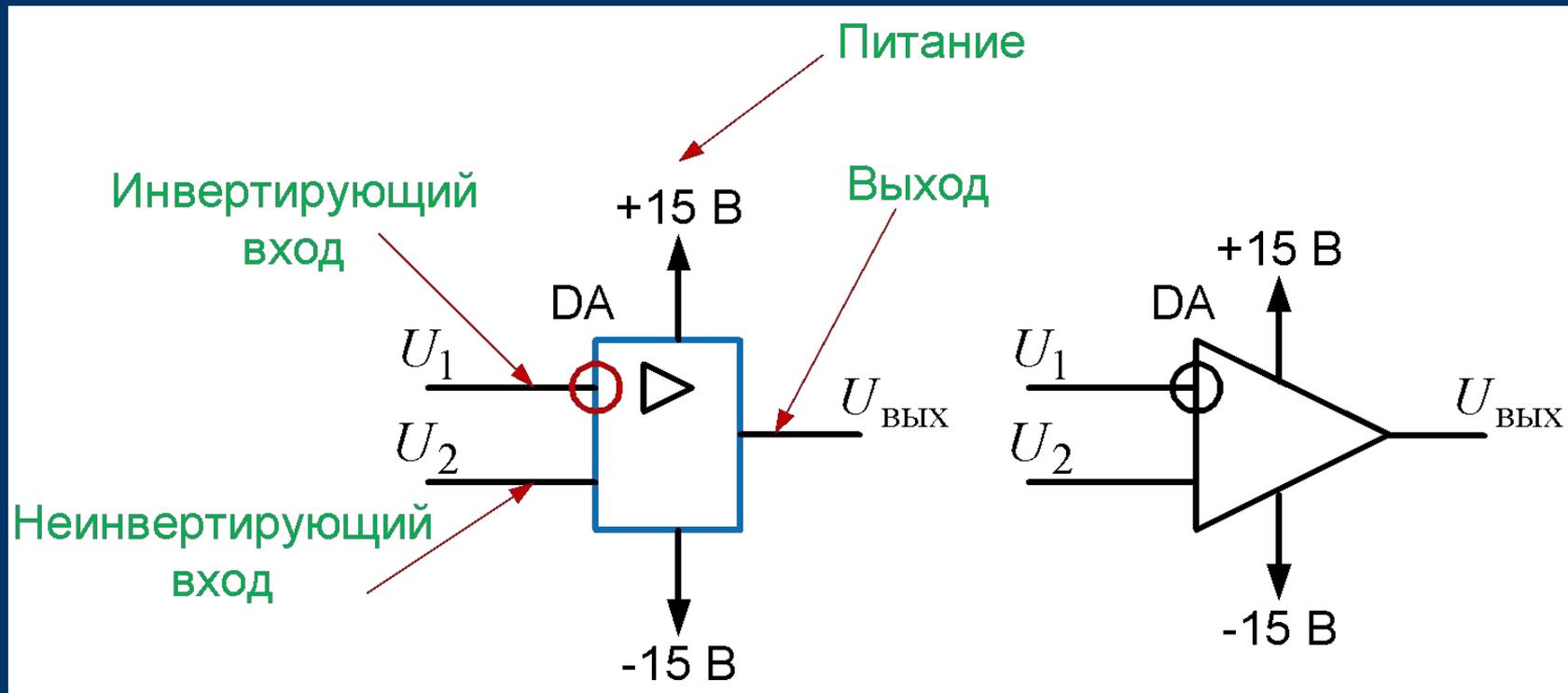
Функциональные элементы на операционном усилителе

Операционный усилитель

Корпуса микросхем операционных усилителей



Условные обозначения операционного усилителя



$$U_{\text{ВЫХ}} = k_{oy} \cdot (U_2 - U_1)$$

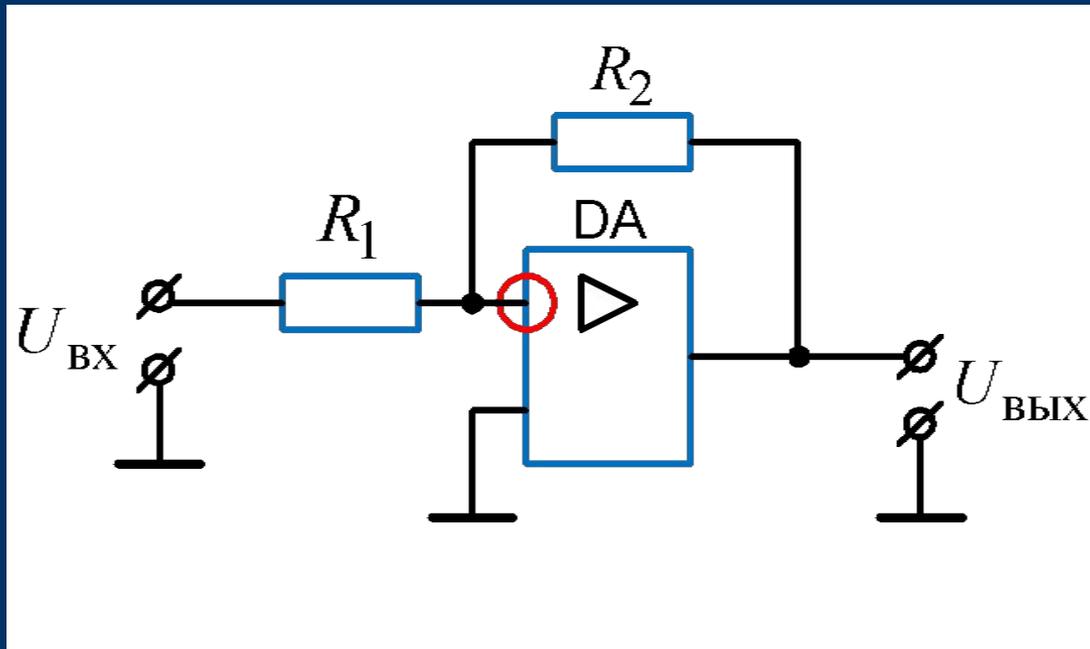
$$(U_2 - U_1) \rightarrow 0$$

$$k_{oy} \rightarrow \infty$$

У реального операционного усилителя: $k_{oy} = 10^5 \dots 10^6$

Инвертирующий усилитель

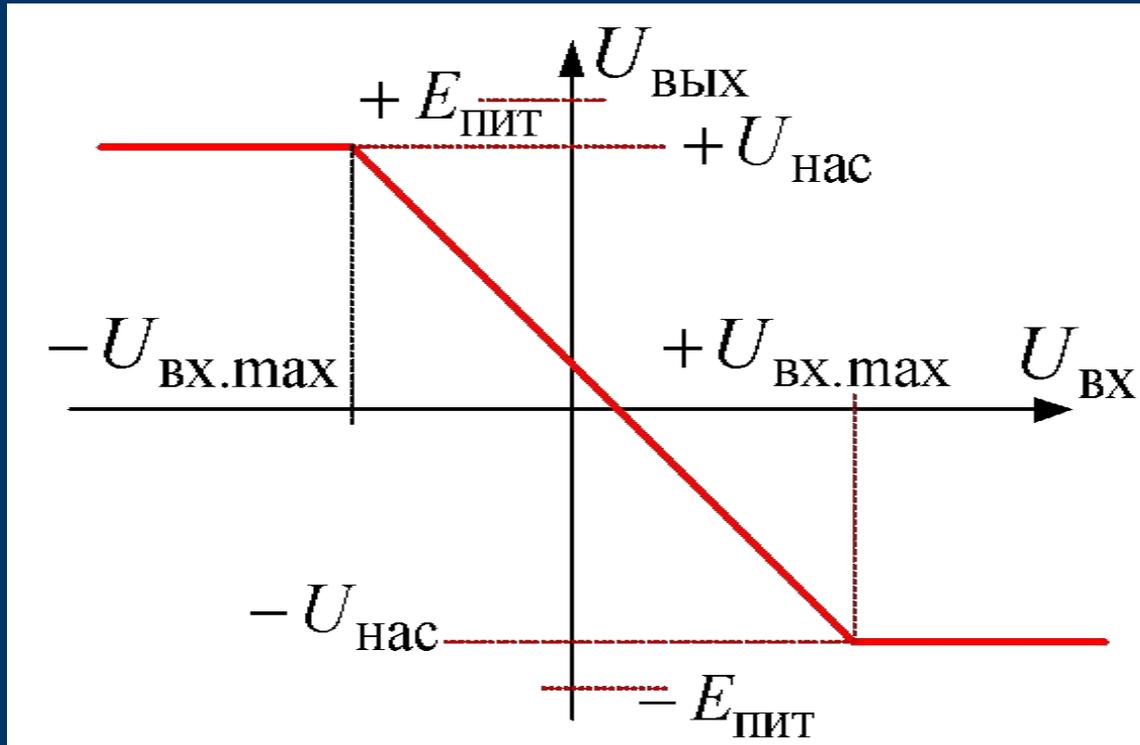
Инвертирующий усилитель



Коэффициент усиления

$$k_{ус} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

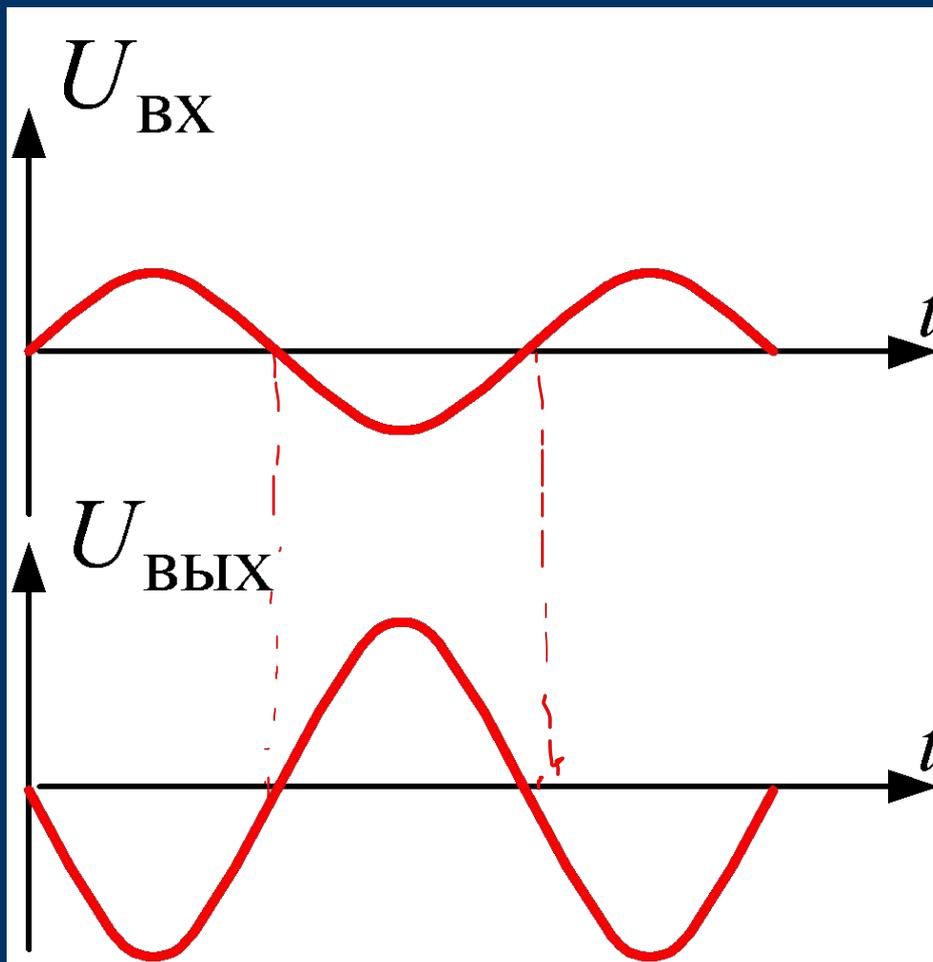
Передаточная характеристика инвертирующего усилителя



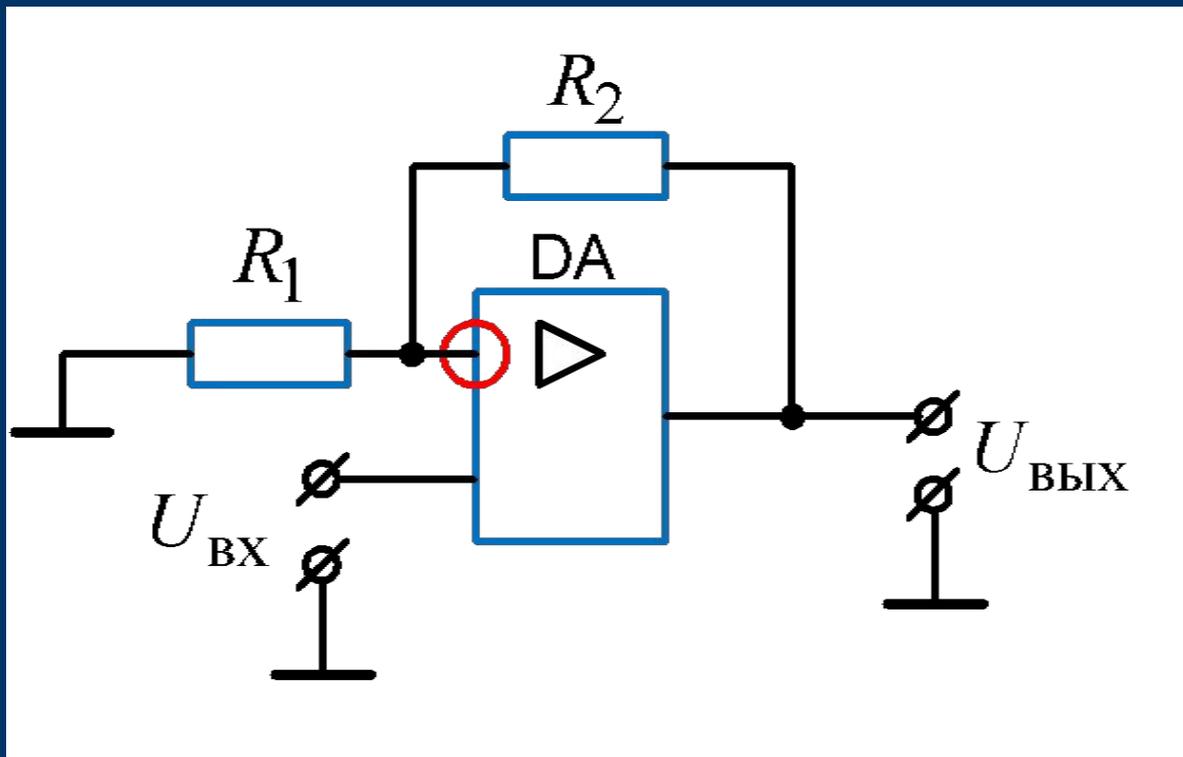
Коэффициент усиления

$$k_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Осциллограммы работы инвертирующего усилителя



Неинвертирующий усилитель

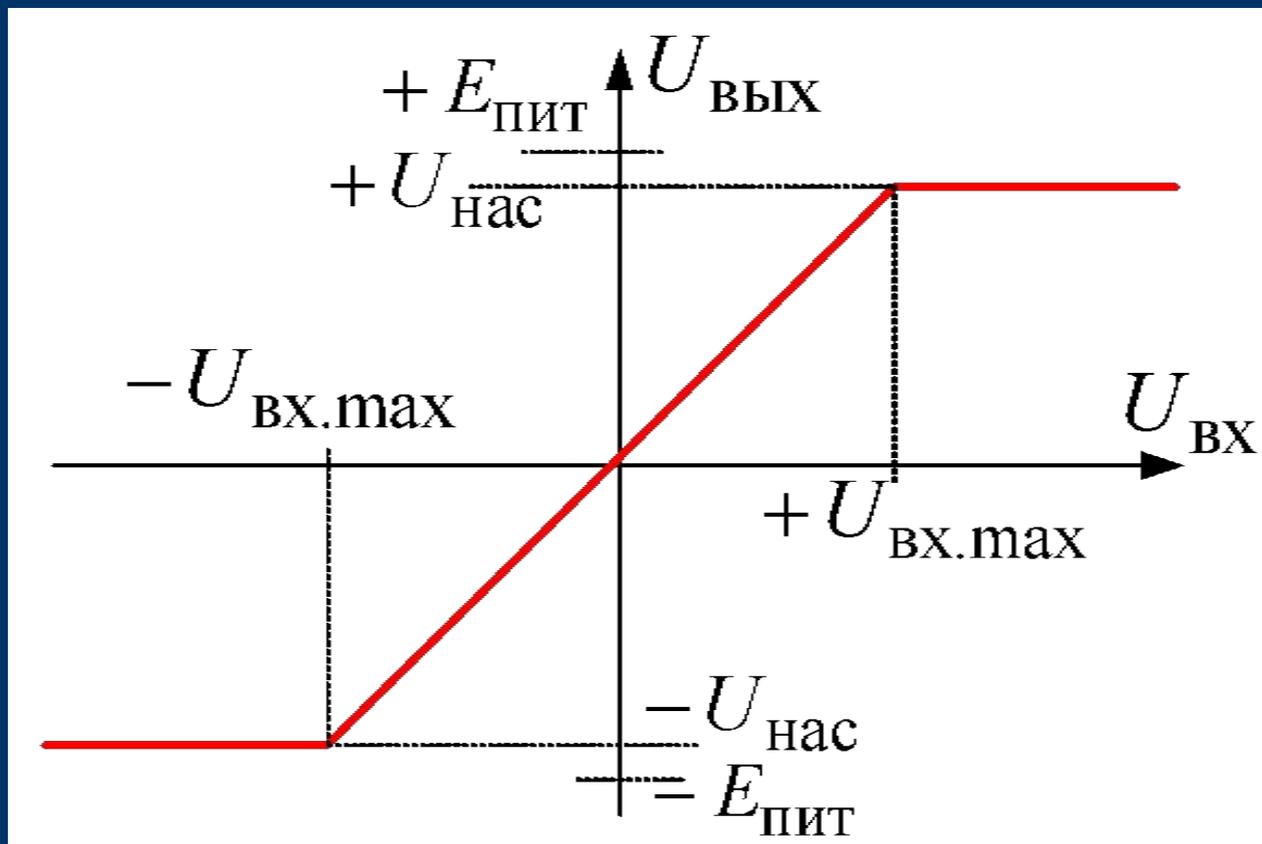


Коэффициент усиления

$$k_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

$$I_1 = \frac{-U_1}{R_1} \quad I_2 = \frac{U_1 - U_{\text{ВЫХ}}}{R_2} \quad U_1 \approx U_2 = U_{\text{ВХ}}$$

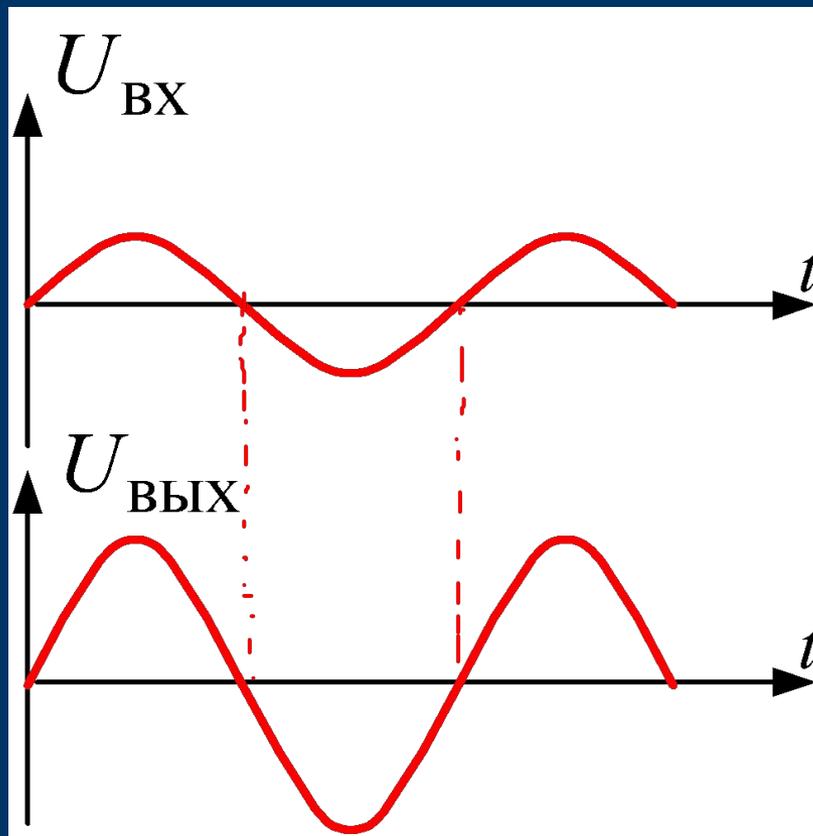
Передаточная характеристика неинвертирующего усилителя



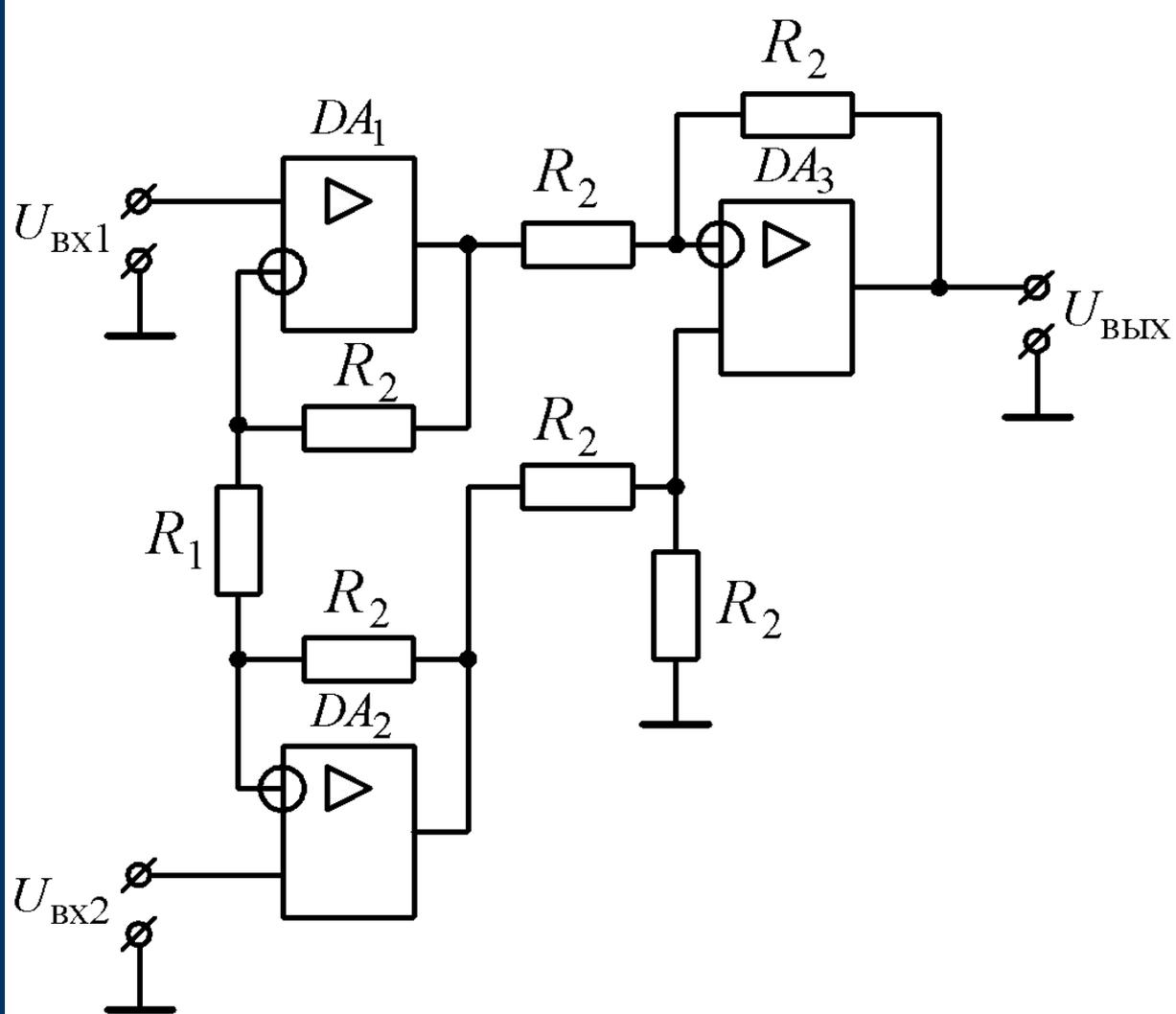
Коэффициент усиления

$$k_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Осциллограммы работы неинвертирующего усилителя

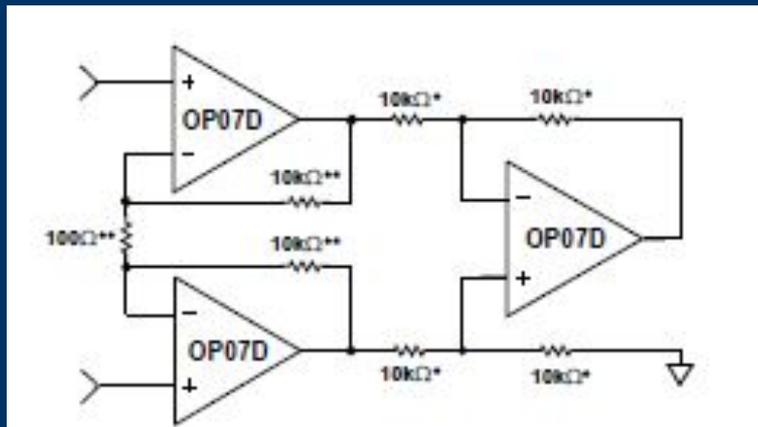
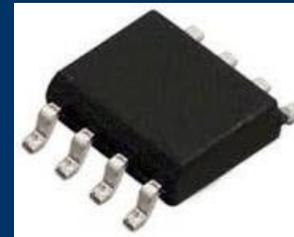
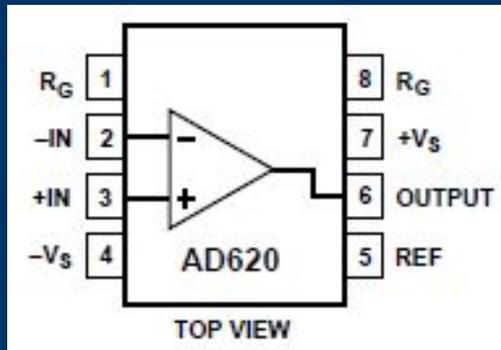


Инструментальный усилитель



$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_{\text{BX1}} - U_{\text{BX2}})$$

Микросхема AD620



Частотные фильтры на операционном усилителе

Частотные фильтры



Фильтр низких частот



Фильтр высоких частот



Полосовой фильтр

Фильтр низких частот

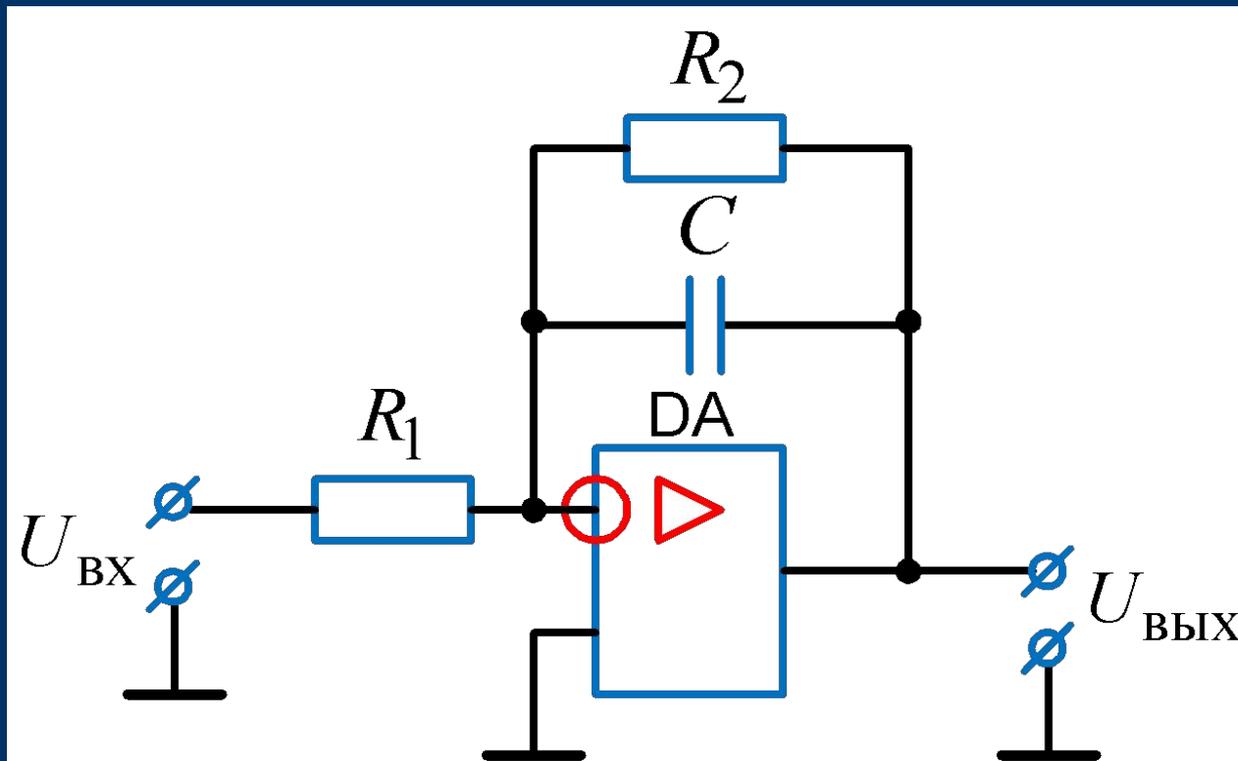
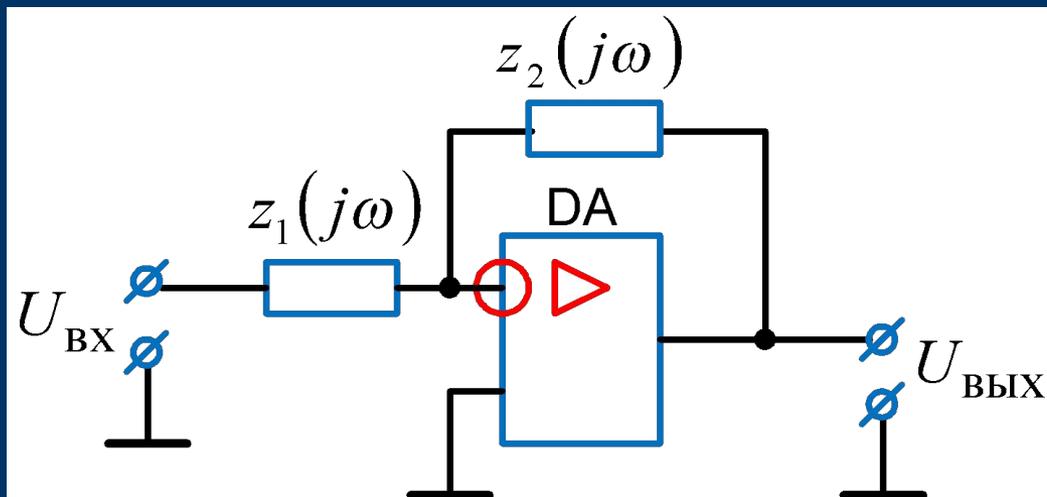


Схема замещения фильтра



Передаточная функция

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = -\frac{z_2(j\omega)}{z_1(j\omega)} = -\frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega \cdot C}}{R_1 + \frac{1}{j\omega \cdot C}} = \\ &= -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega \cdot R_2 \cdot C} = k_{\text{yc}} \cdot \frac{1}{1 + j\omega \cdot T} \end{aligned}$$

Модуль передаточной функции

$$|W(j\omega)| = \sqrt{(\operatorname{Re}\{W(j\omega)\})^2 + (\operatorname{Im}\{W(j\omega)\})^2}$$

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{k_{yc} \cdot (1 - j\omega \cdot T)}{(1 + j\omega \cdot T) \cdot (1 - j\omega \cdot T)} = \frac{k_{yc} \cdot (1 - j\omega \cdot T)}{1 - j^2 \cdot \omega^2 \cdot T^2} = \frac{k_{yc} \cdot (1 - j\omega \cdot T)}{1 + \omega^2 \cdot T^2} \\ &= \frac{k_{yc}}{1 + \omega^2 \cdot T^2} - j \cdot \frac{k_{yc} \cdot \omega \cdot T}{1 + \omega^2 \cdot T^2} \end{aligned}$$

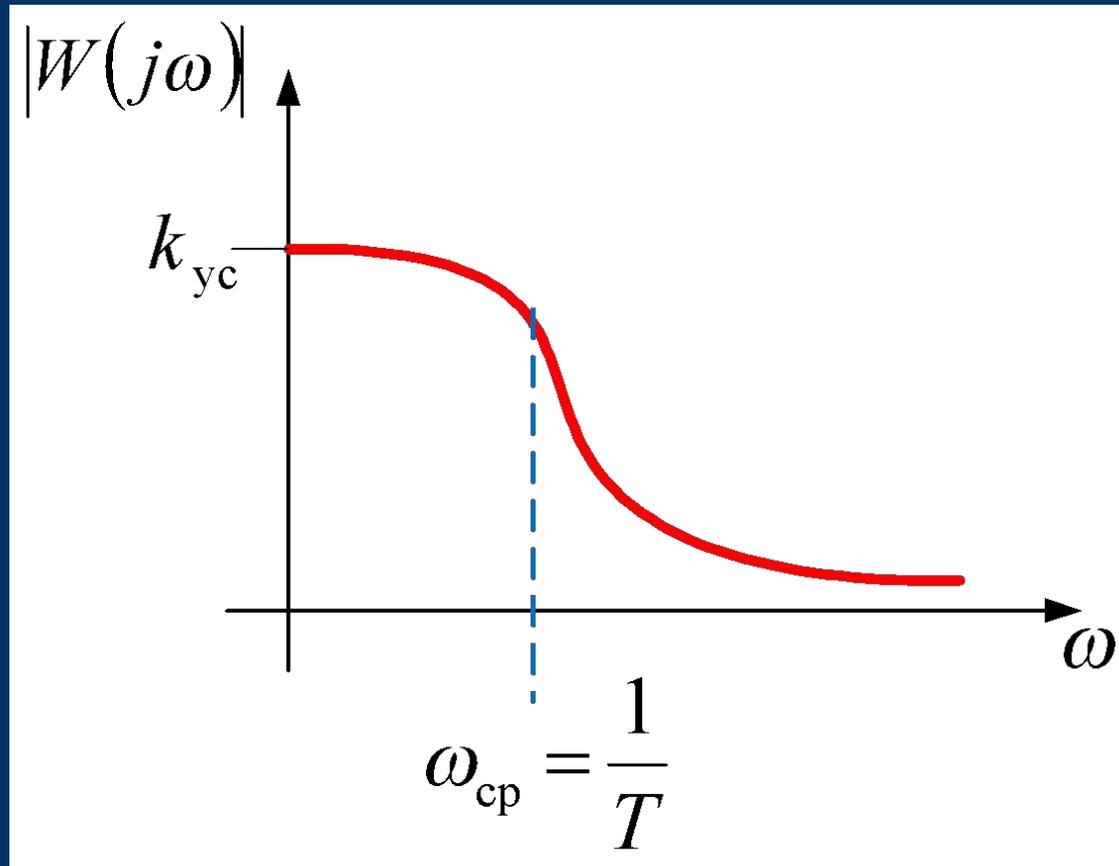
$$\operatorname{Re}\{W(j\omega)\} = \frac{k_{yc}}{1 + \omega^2 \cdot T^2}$$

$$\operatorname{Im}\{W(j\omega)\} = \frac{-k_{yc} \cdot \omega \cdot T}{1 + \omega^2 \cdot T^2}$$

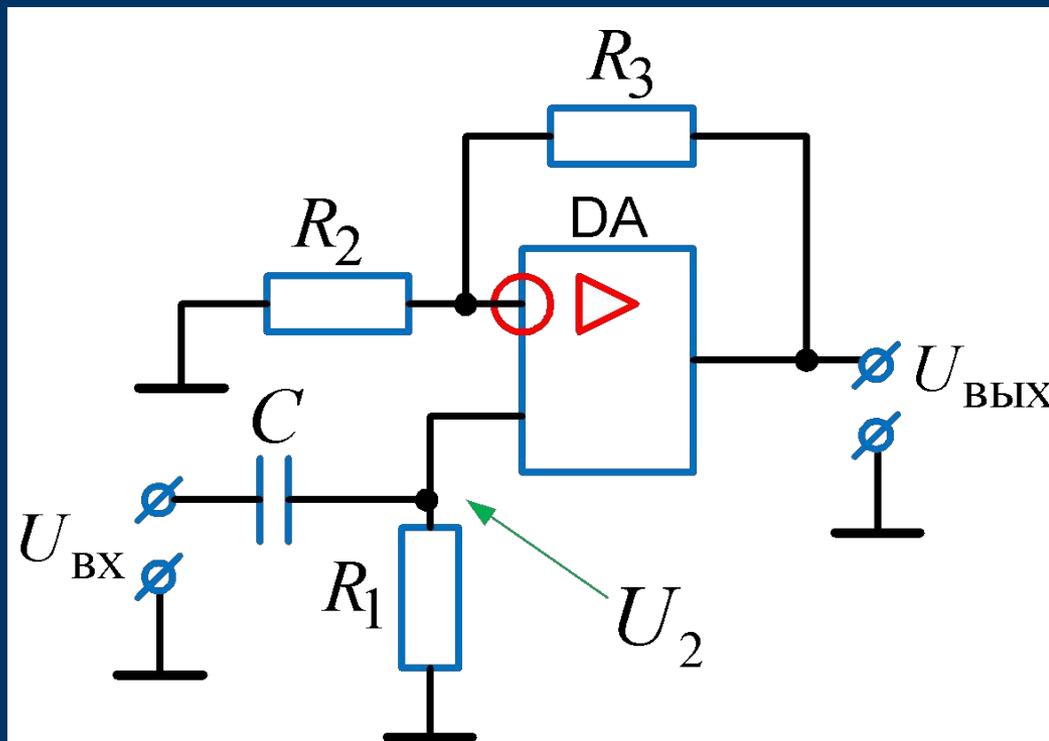
Модуль передаточной функции

$$\begin{aligned} |W(j\omega)| &= \sqrt{\frac{k_{yc}^2}{(1 + \omega^2 \cdot T^2)^2} + \frac{k_{yc}^2 \cdot \omega^2 \cdot T^2}{(1 + \omega^2 \cdot T^2)^2}} = \\ &= \sqrt{\frac{k_{yc}^2 \cdot (1 + \omega^2 \cdot T^2)}{(1 + \omega^2 \cdot T^2)^2}} = \frac{k_{yc}}{\sqrt{(1 + \omega^2 \cdot T^2)}} \end{aligned}$$

Амплитудно-частотная характеристика фильтра низких частот



Фильтр высоких частот



Передаточная функция

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{\left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) \cdot U_2(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{k_{\text{yc}} \cdot U_2(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \\ &= \frac{k_{\text{yc}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + \frac{1}{j\omega \cdot C}} \cdot U_{\text{ВХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = k_{\text{yc}} \cdot \frac{j\omega \cdot R_1 \cdot C}{1 + j\omega \cdot R_1 \cdot C} = k_{\text{yc}} \cdot \frac{j\omega \cdot T}{1 + j\omega \cdot T} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{k_{yc} \cdot j\omega \cdot T \cdot (1 - j\omega \cdot T)}{(1 + j\omega \cdot T) \cdot (1 - j\omega \cdot T)} = \frac{k_{yc} \cdot \omega^2 \cdot T^2 + j \cdot k_{yc} \cdot \omega \cdot T}{1 + \omega^2 \cdot T^2} = \\ &= \frac{k_{yc} \cdot \omega^2 \cdot T^2}{1 + \omega^2 \cdot T^2} + j \cdot \frac{k_{yc} \cdot \omega \cdot T}{1 + \omega^2 \cdot T^2} \end{aligned}$$

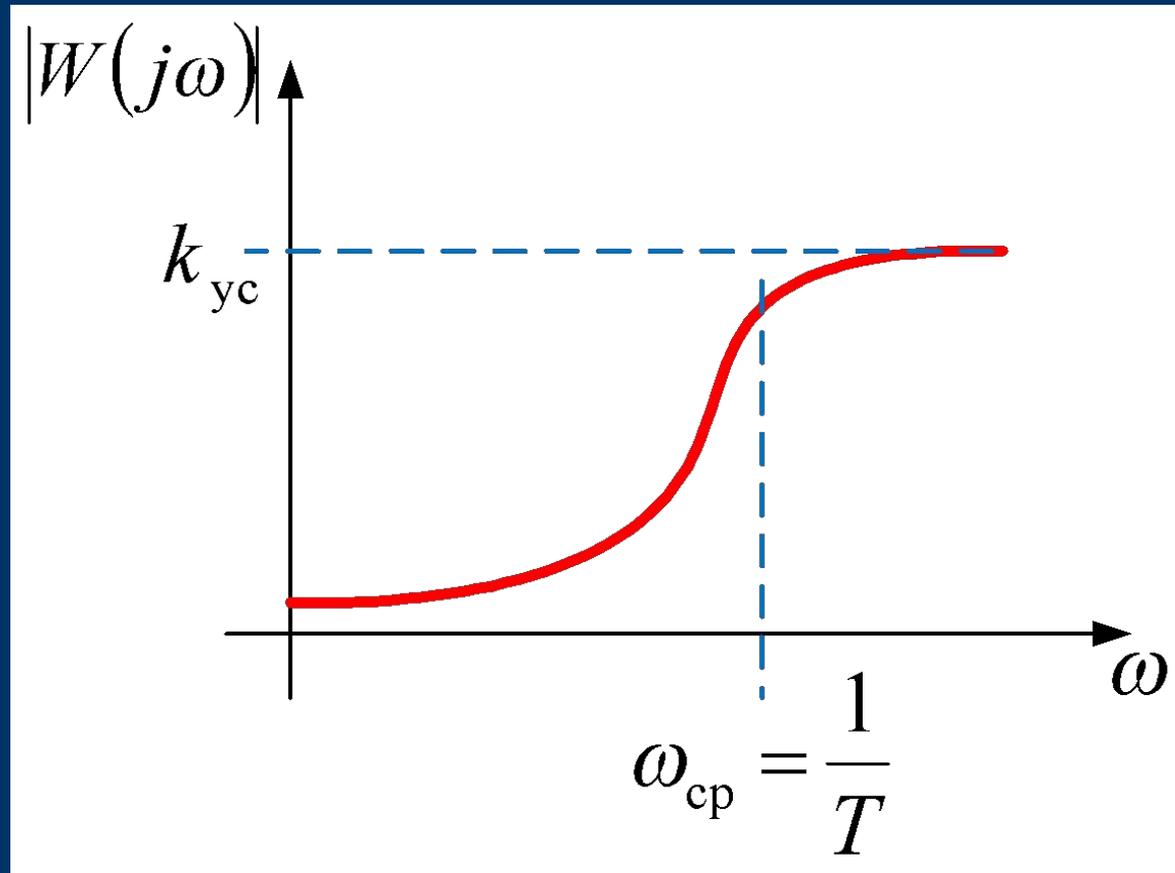
$$\operatorname{Re}\{W(j\omega)\} = \frac{k_{yc} \cdot \omega^2 \cdot T^2}{1 + \omega^2 \cdot T^2}$$

$$\operatorname{Im}\{W(j\omega)\} = \frac{k_{yc} \cdot \omega \cdot T}{1 + \omega^2 \cdot T^2}$$

Модуль передаточной функции

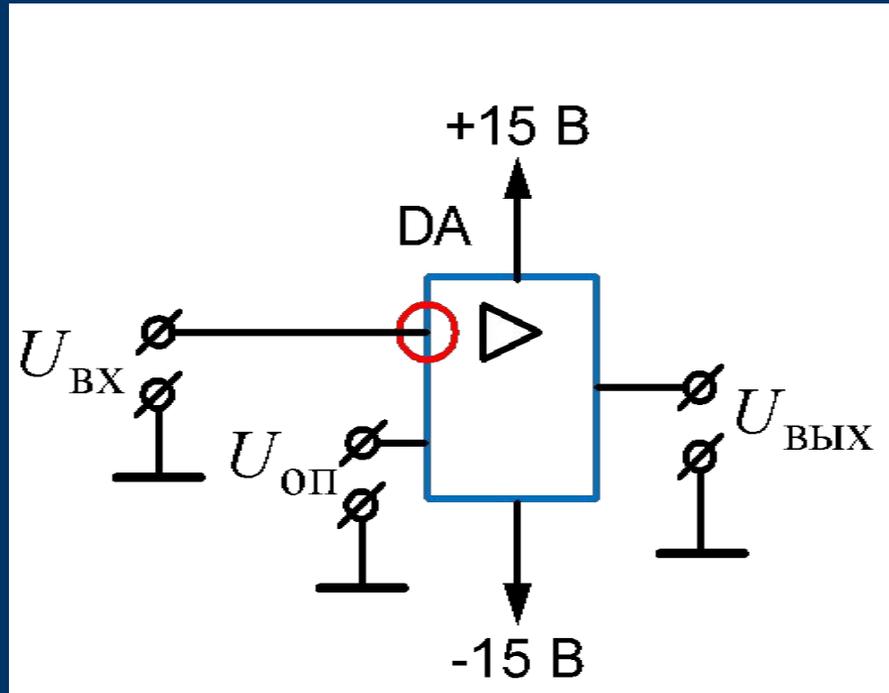
$$\begin{aligned} |W(j\omega)| &= \sqrt{\frac{k_{yc}^2 \cdot \omega^4 \cdot T^4}{(1 + \omega^2 \cdot T^2)^2} + \frac{k_{yc}^2 \cdot \omega^2 \cdot T^2}{(1 + \omega^2 \cdot T^2)^2}} = \\ &= \sqrt{\frac{k_{yc}^2 \cdot \omega^2 \cdot T^2 \cdot (1 + \omega^2 \cdot T^2)}{(1 + \omega^2 \cdot T^2)^2}} = \frac{k_{yc} \cdot \omega \cdot T}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot T^2}} \end{aligned}$$

Амплитудо-частотная характеристика фильтра высоких частот



Компаратор на операционном усилителе

Компаратор



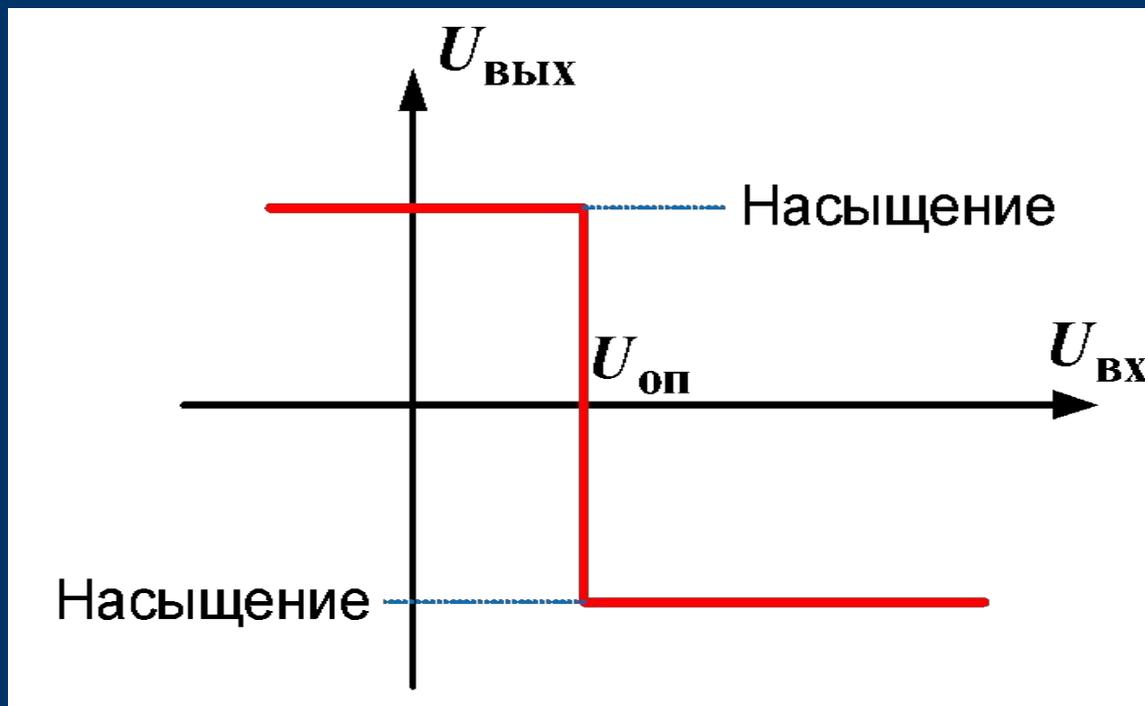
Логические уравнения

$$(U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ОП}}) \rightarrow U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{насыщения}}$$

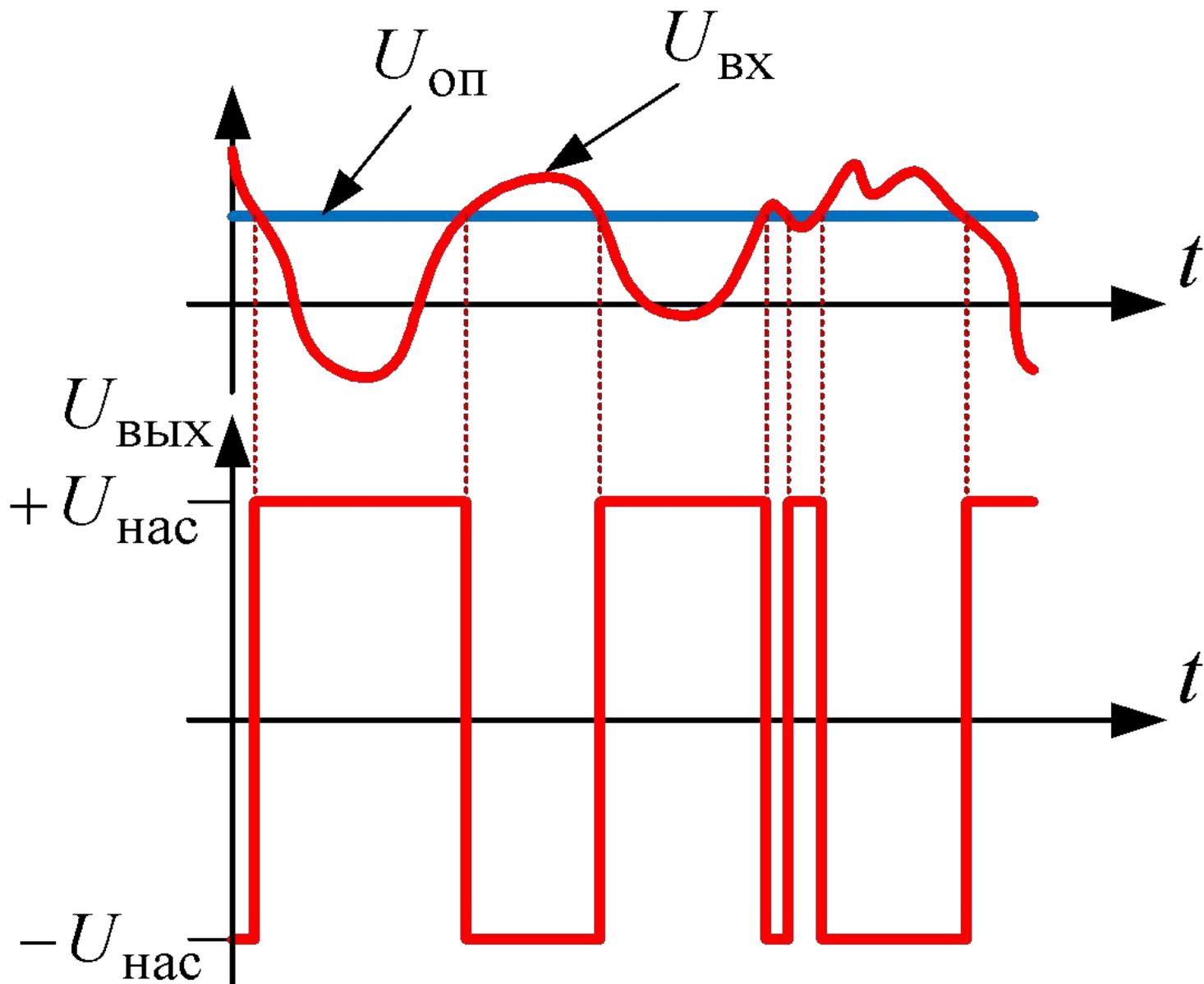
$$(U_{\text{ВХ}} < U_{\text{ОП}}) \rightarrow U_{\text{ВЫХ}} = +U_{\text{насыщения}}$$

$$(U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ОП}}) \rightarrow \text{неопределённость}$$

Передаточная характеристика компаратора



Осциллограммы работы компаратора



Триггер Шмидта на операционном усилителе

Триггер Шмидта

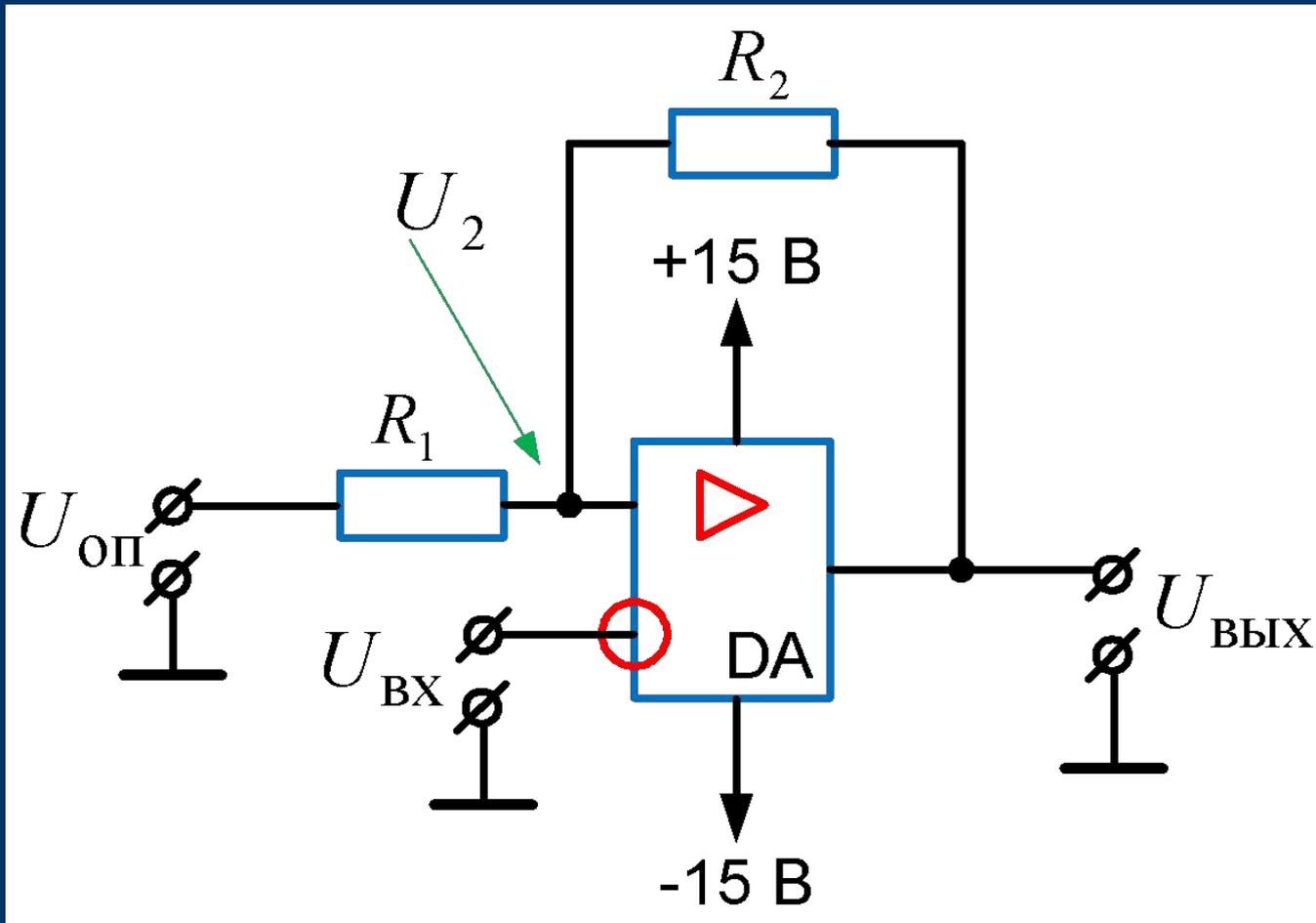
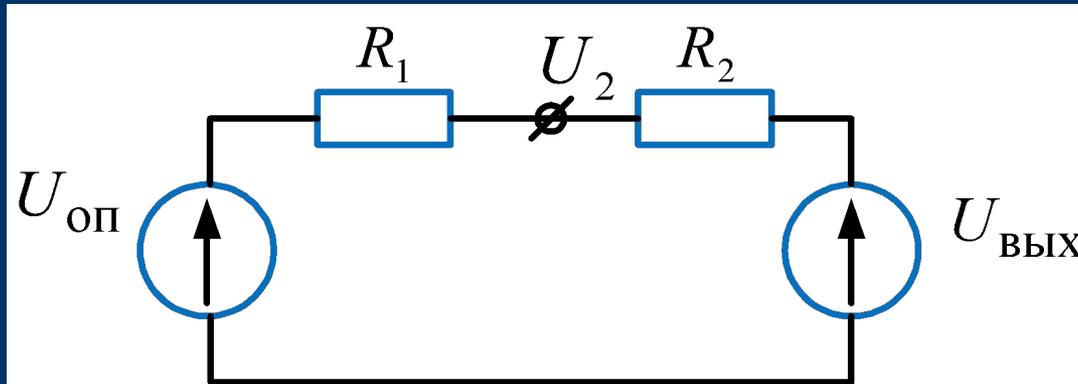


Схема замещения



$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{\text{оп}} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{\text{вых}}$$

Логические уравнения

$$\left(U_{\text{вых}} = +U_{\text{насыщения}} \right) \rightarrow U_2 = U_{\text{сраб}}$$

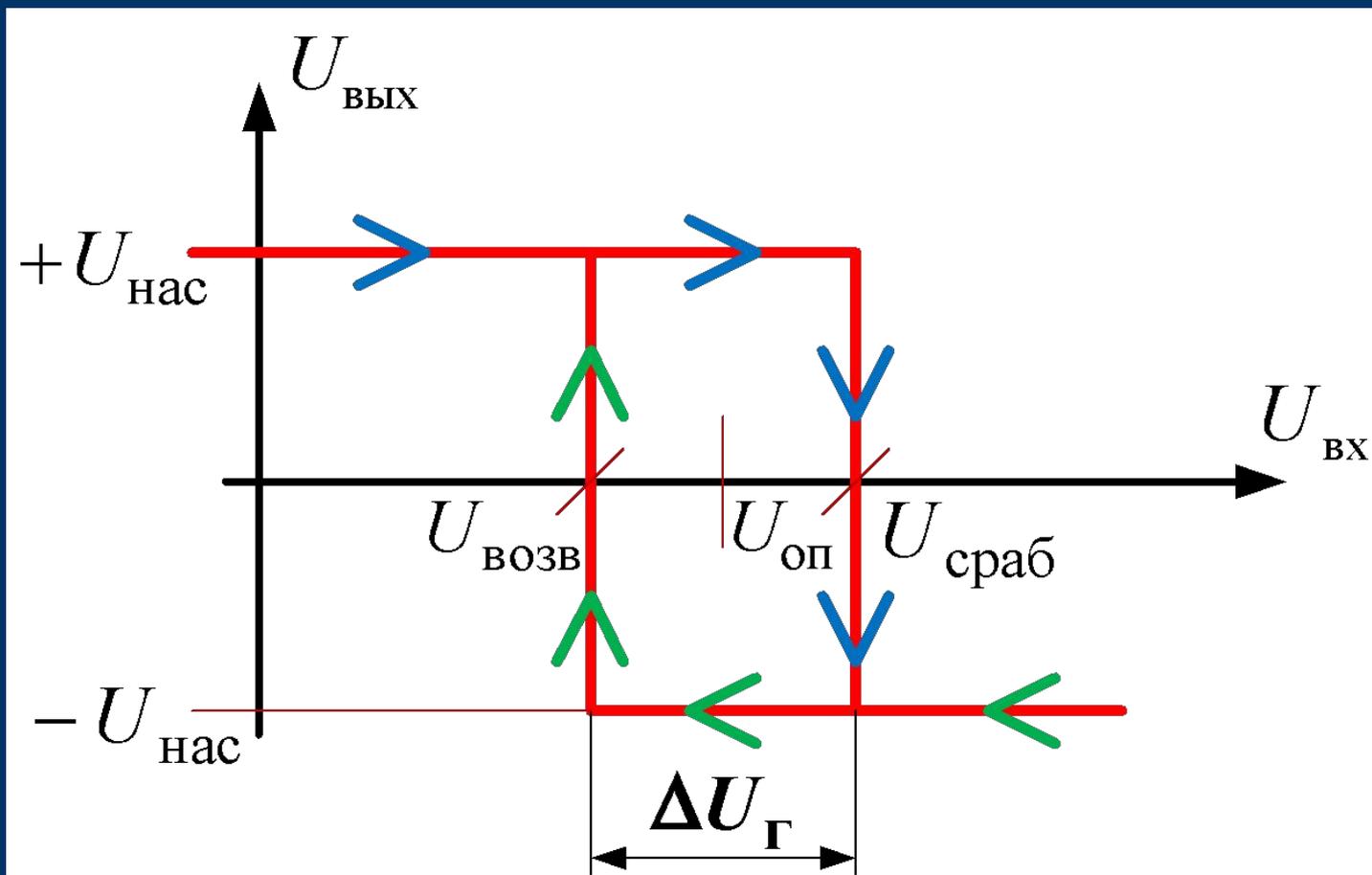
$$\left(U_{\text{вых}} = -U_{\text{насыщения}} \right) \rightarrow U_2 = U_{\text{возв}}$$

Логические уравнения работы триггера Шмидта

$$(U_{\text{ВХ}} > U_{\text{сраб}}) \rightarrow U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{насыщения}}$$

$$(U_{\text{ВХ}} < U_{\text{возв}}) \rightarrow U_{\text{ВЫХ}} = +U_{\text{насыщения}}$$

Передаточная характеристика триггера Шмидта



[Анимация](#)