

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

Лекция 7

Выпрямители

Выпрямители

По виду управления

По количеству фаз

Управляемые

Неуправляемые

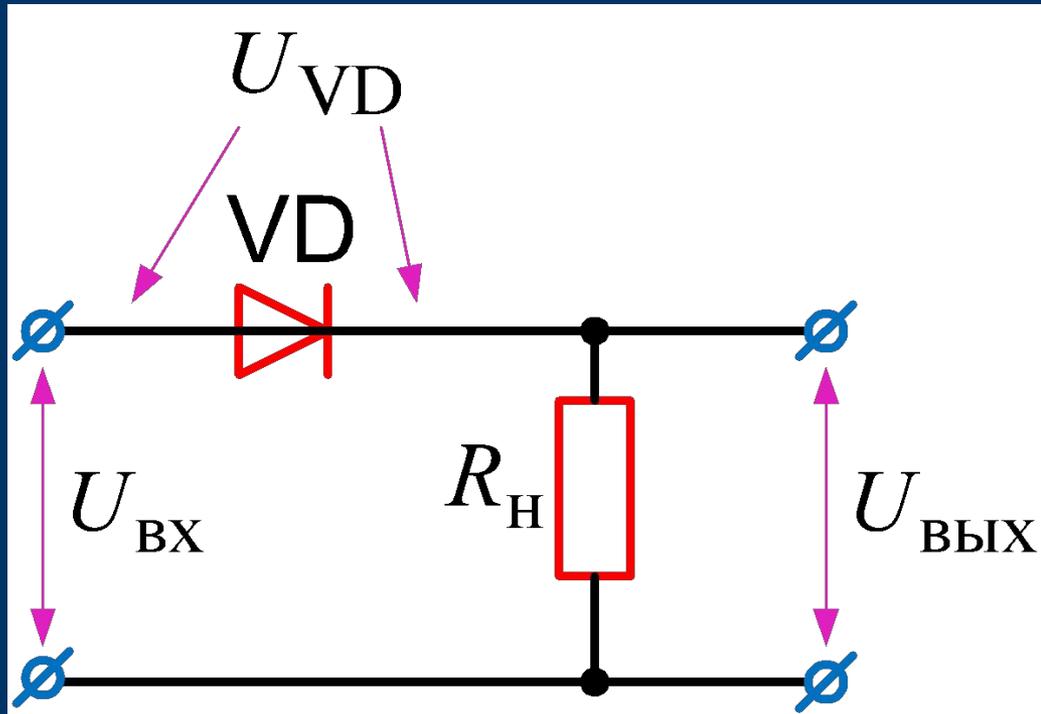
Однофазные

Трёхфазные

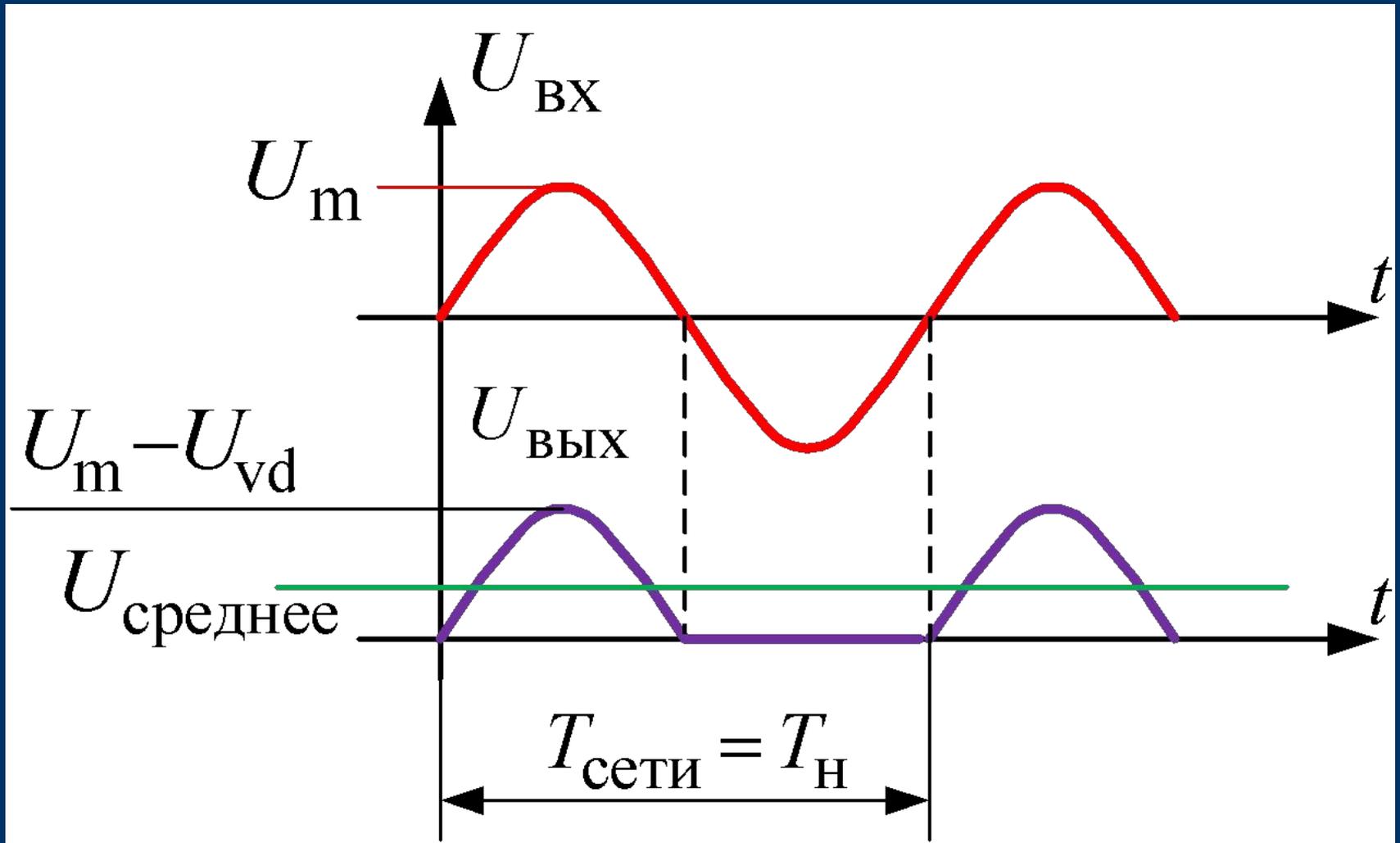
Многофазные

Однофазные неуправляемые выпрямители

Однополупериодный выпрямитель



Осциллограммы работы выпрямителя



Вывод формулы среднего значения напряжения на нагрузке

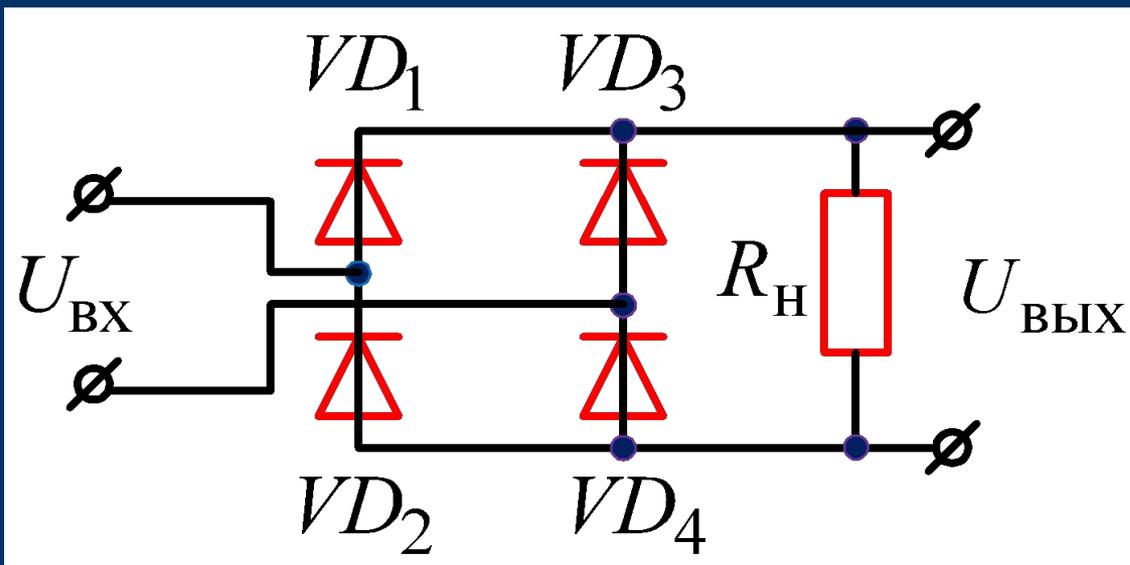
$$\begin{aligned} U_{\text{среднее}} &= \frac{1}{T_{\text{H}}} \cdot \int_0^{T_{\text{H}}} U_{\text{ВЫХ}}(t) \cdot dt = \\ &= \frac{1}{T_{\text{H}}} \cdot \int_0^{T_{\text{H}}/2} U_{\text{ВЫХ}}(t) \cdot dt + 0 = \\ &= \frac{1}{T_{\text{H}}} \cdot \int_0^{T_{\text{H}}/2} (U_{\text{m}} - U_{\text{vd}}) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt \end{aligned}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{сети}} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{сети}}} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{H}}}$$

$$\begin{aligned} U_{\text{среднее}} &= \frac{-(U_{\text{m}} - U_{\text{vd}})}{T_{\text{H}} \cdot \omega} \cdot \cos(\omega \cdot t) \Big|_0^{T_{\text{H}}/2} = \\ &= \frac{-(U_{\text{m}} - U_{\text{vd}})}{T_{\text{H}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{H}}}} \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{H}}} \cdot \frac{T_{\text{H}}}{2}\right) - \cos 0 \right) = \end{aligned}$$

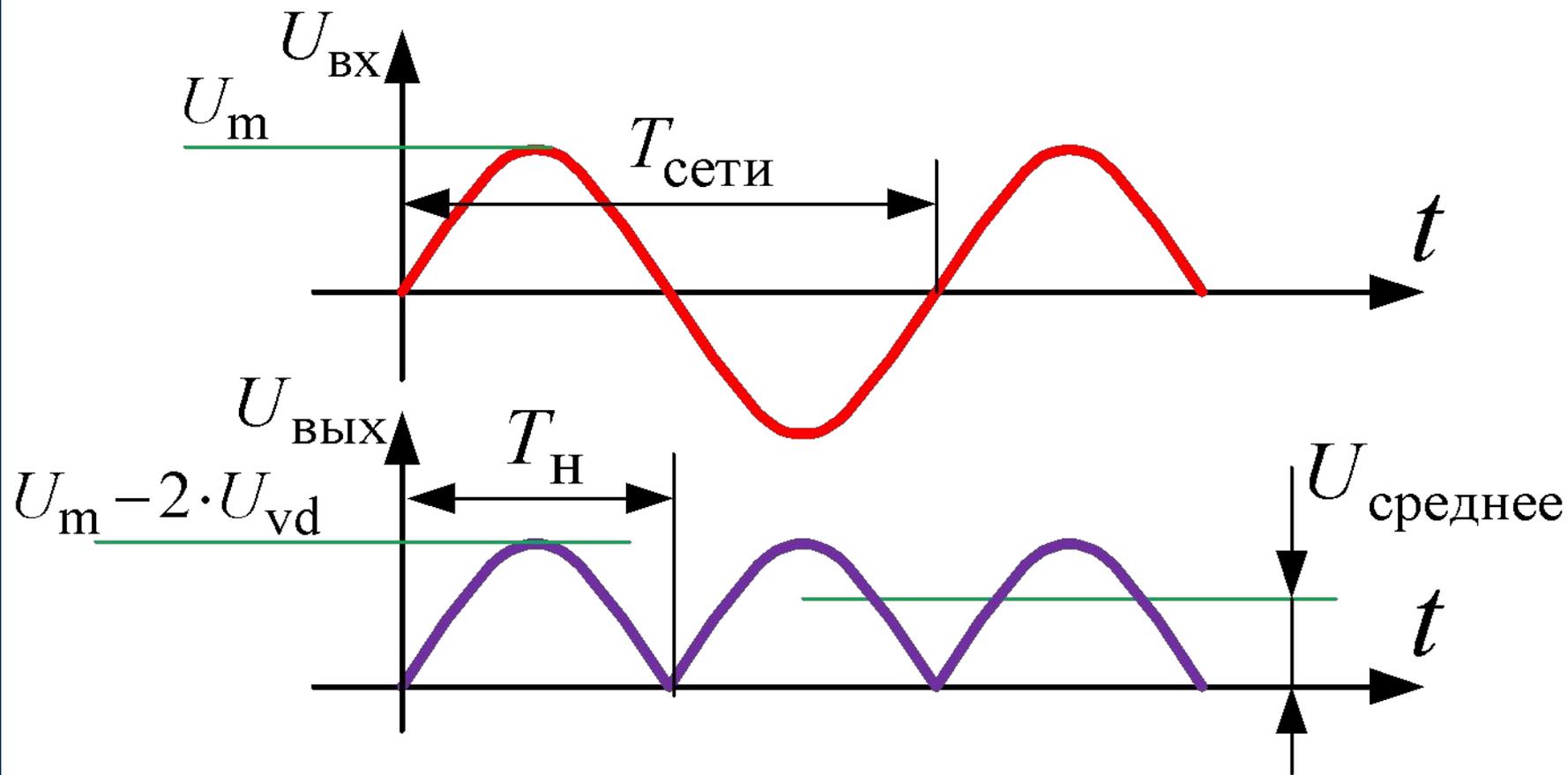
$$\begin{aligned} &= \frac{-(U_m - U_{vd})}{2 \cdot \pi} \cdot (-1 - 1) = \\ &= \frac{U_m - U_{vd}}{\pi} \approx 0,32 \cdot (U_m - U_{vd}) \end{aligned}$$

Двухполупериодный выпрямитель (диодный мост)



[Анимация](#)

Осциллограммы работы выпрямителя



$$T_{\text{H}} = \frac{T_{\text{сети}}}{2}$$

Вывод формулы среднего значения напряжения на нагрузке

$$U_{\text{среднее}} = \frac{1}{T_{\text{H}}} \cdot \int_0^{T_{\text{H}}} U_{\text{ВЫХ}}(t) \cdot dt =$$
$$= \frac{1}{T_{\text{H}}} \cdot \int_0^{T_{\text{H}}} (U_{\text{m}} - 2 \cdot U_{\text{vd}}) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{сети}} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{сети}}} = \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot T_{\text{H}}} = \frac{\pi}{T_{\text{H}}}$$

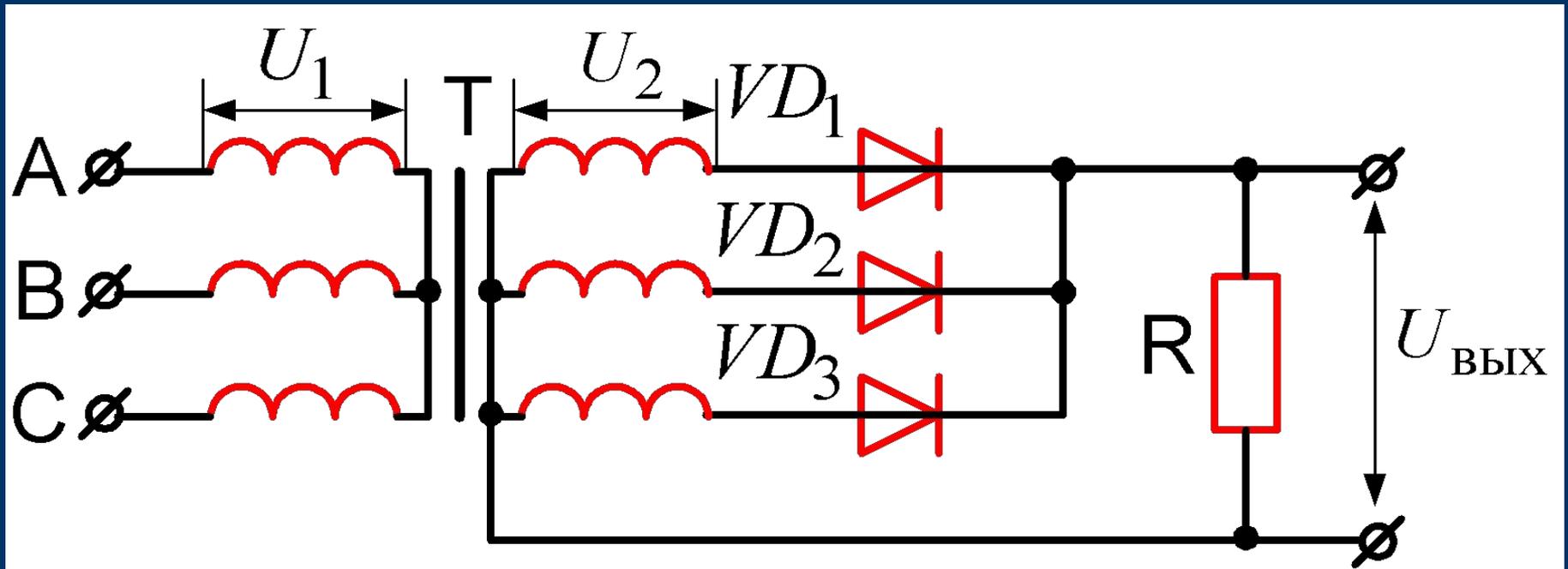
$$\begin{aligned} U_{\text{среднее}} &= \frac{-(U_m - 2 \cdot U_{\text{vd}})}{T_H \cdot \omega} \cdot \cos(\omega \cdot t) \Big|_0^{T_H} = \\ &= \frac{-(U_m - 2 \cdot U_{\text{vd}})}{T_H \cdot \frac{\pi}{T_H}} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi}{T_H} \cdot T_H\right) - \cos 0 \right) = \end{aligned}$$

$$U_{\text{среднее}} = \frac{2}{\pi} \cdot (U_{\text{m}} - 2 \cdot U_{\text{vd}}) \approx 0,64 \cdot (U_{\text{m}} - 2 \cdot U_{\text{vd}})$$

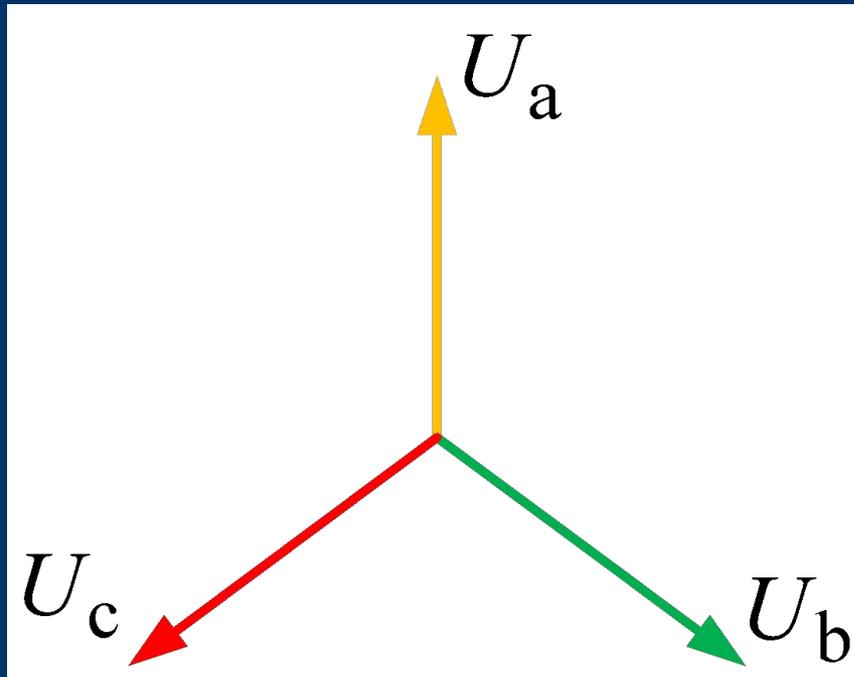
Трёхфазные неуправляемые выпрямители

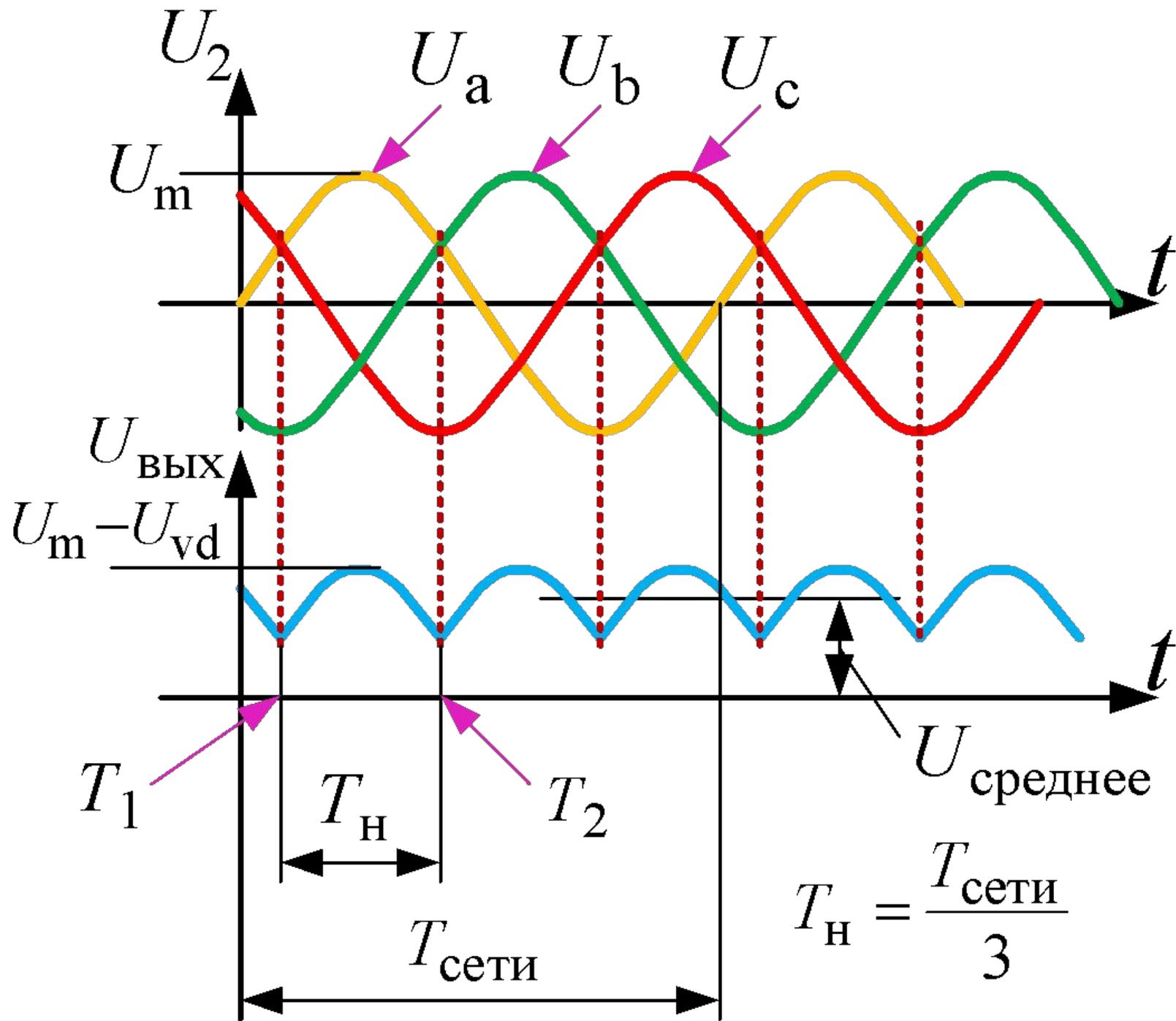
Трёхфазный выпрямитель с нулевым проводом

Трёхфазный выпрямитель с нулевым проводом



Фазные напряжения трёхфазной системы





Вывод формулы среднего значения напряжения на нагрузке

$$U_{\text{среднее}} = \frac{1}{T_{\text{H}}} \cdot \int_{T_1}^{T_2} U_{\text{ВЫХ}}(t) \cdot dt =$$
$$= \frac{1}{T_{\text{H}}} \cdot \int_{T_1}^{T_2} (U_{\text{m}} - U_{\text{vd}}) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{сети}} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{сети}}} = \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot T_{\text{H}}}$$

Тригонометрическое уравнение для расчёта T_1

$$U_a(T_1) = U_c(T_1)$$

$$U_m \cdot \sin(\omega \cdot T_1) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot T_1 + 120^\circ)$$

$$\sin(\omega \cdot T_1) = \sin(\omega \cdot T_1 + 120^\circ)$$

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

$$\begin{aligned}\sin(\omega \cdot T_1) &= \sin(\omega \cdot T_1) \cdot \cos(120^\circ) + \cos(\omega \cdot T_1) \cdot \sin(120^\circ) = \\ &= -\frac{1}{2} \cdot \sin(\omega \cdot T_1) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos(\omega \cdot T_1)\end{aligned}$$



$$\frac{3}{2} \cdot \sin(\omega \cdot T_1) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos(\omega \cdot T_1)$$



$$\frac{\sin(\omega \cdot T_1)}{\cos(\omega \cdot T_1)} = \operatorname{tg}(\omega \cdot T_1) = \frac{\sqrt{3}}{3}$$



$$\omega \cdot T_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{3}}{3}\right) = \frac{\pi}{6}$$



$$T_1 = \frac{\pi}{6 \cdot \omega} = \frac{\pi}{6 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot T_H}} = \frac{T_H}{4}$$



$$T_2 = T_1 + T_H = \frac{T_H}{4} + T_H = \frac{5}{4}T_H$$

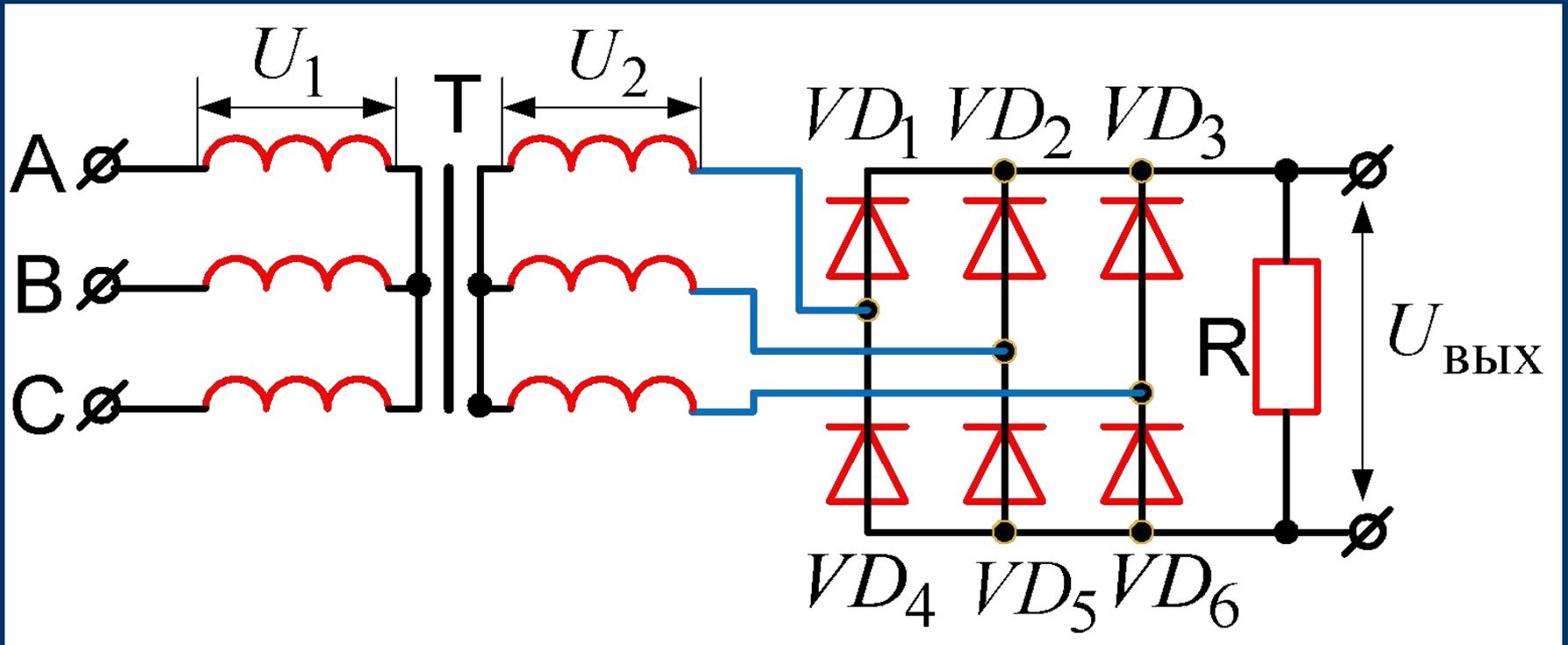
$$\begin{aligned}
 U_{\text{среднее}} &= \frac{1}{T_{\text{H}}} \cdot \int_{\frac{T_{\text{H}}}{4}}^{\frac{5}{4}T_{\text{H}}} (U_{\text{m}} - U_{\text{vd}}) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot T_{\text{H}}} \cdot t\right) \cdot dt = \\
 &= \frac{-(U_{\text{m}} - U_{\text{vd}})}{T_{\text{H}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot T_{\text{H}}}} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot T_{\text{H}}} \cdot t\right) \Bigg|_{\frac{T_{\text{H}}}{4}}^{\frac{5}{4}T_{\text{H}}} =
 \end{aligned}$$

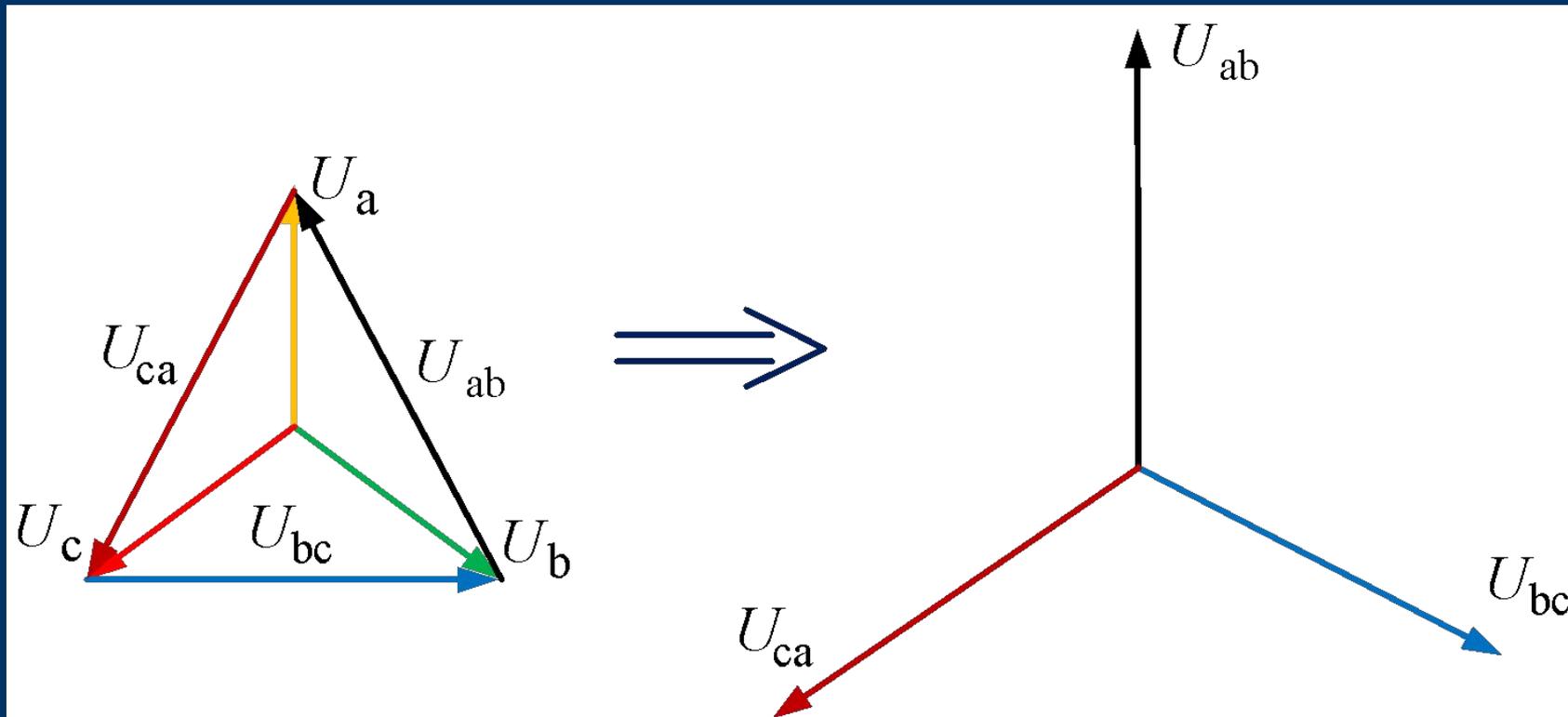
$$= \frac{-3 \cdot (U_m - U_{vd})}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot T_H} \cdot \frac{5}{4} T_H\right) - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot T_H} \cdot \frac{T_H}{4}\right) \right) =$$

$$\begin{aligned} &= \frac{-3 \cdot (U_m - U_{vd})}{2 \cdot \pi} \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \\ &= \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot (U_m - U_{vd})}{2 \cdot \pi} \approx 0,83 \cdot (U_m - U_{vd}) \end{aligned}$$

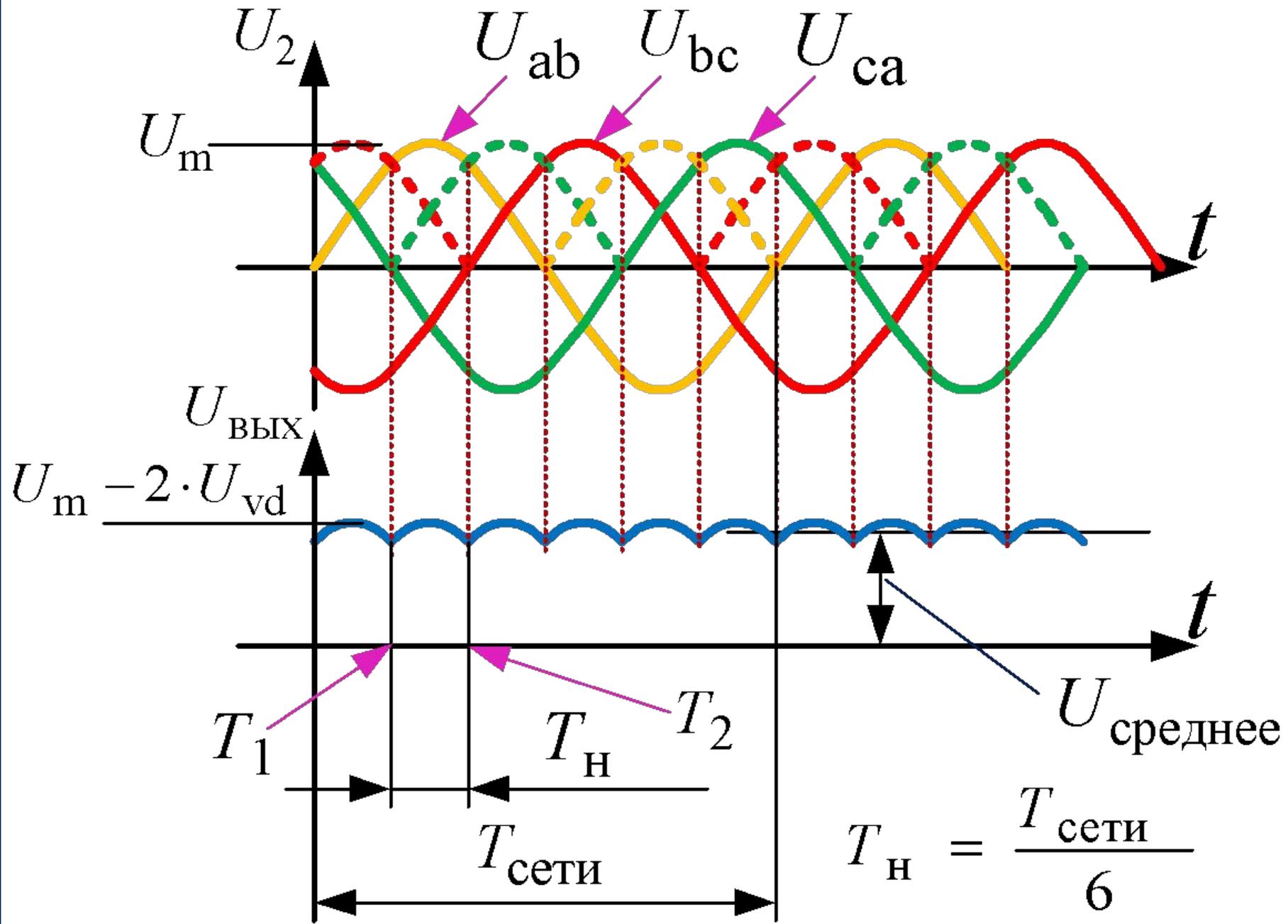
Трёхфазный мостовой выпрямитель

Трёхфазный мостовой выпрямитель





[Анимация](#)



[Анимация](#)

Вывод формулы среднего значения напряжения на нагрузке

$$U_{\text{среднее}} = \frac{1}{T_{\text{H}}} \cdot \int_{T_1}^{T_2} U_{\text{ВЫХ}}(t) \cdot dt =$$
$$= \frac{1}{T_{\text{H}}} \cdot \int_{T_1}^{T_2} (U_{\text{m}} - 2U_{\text{vd}}) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{сети}} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{сети}}} = \frac{2 \cdot \pi}{6 \cdot T_{\text{H}}} = \frac{\pi}{3 \cdot T_{\text{H}}}$$

Тригонометрическое уравнение для расчёта T_1

$$U_{ab}(T_1) = -U_{bc}(T_1)$$

$$U_m \cdot \sin(\omega \cdot T_1) = -U_m \cdot \sin(\omega \cdot T_1 - 120^\circ)$$

$$\sin(\omega \cdot T_1) = -\sin(\omega \cdot T_1 - 120^\circ)$$

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

$$\begin{aligned}\sin(\omega \cdot T_1) &= -(\sin(\omega \cdot T_1) \cdot \cos(120^\circ) - \cos(\omega \cdot T_1) \cdot \sin(120^\circ)) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \sin(\omega \cdot T_1) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos(\omega \cdot T_1)\end{aligned}$$



$$\frac{1}{2} \cdot \sin(\omega \cdot T_1) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos(\omega \cdot T_1)$$



$$\frac{\sin(\omega \cdot T_1)}{\cos(\omega \cdot T_1)} = \operatorname{tg}(\omega \cdot T_1) = \sqrt{3}$$



$$\omega \cdot T_1 = \operatorname{arctg}(\sqrt{3}) = \frac{\pi}{3}$$



$$T_1 = \frac{\pi}{3 \cdot \omega} = \frac{\pi}{3 \cdot \frac{\pi}{3 \cdot T_H}} = T_H$$



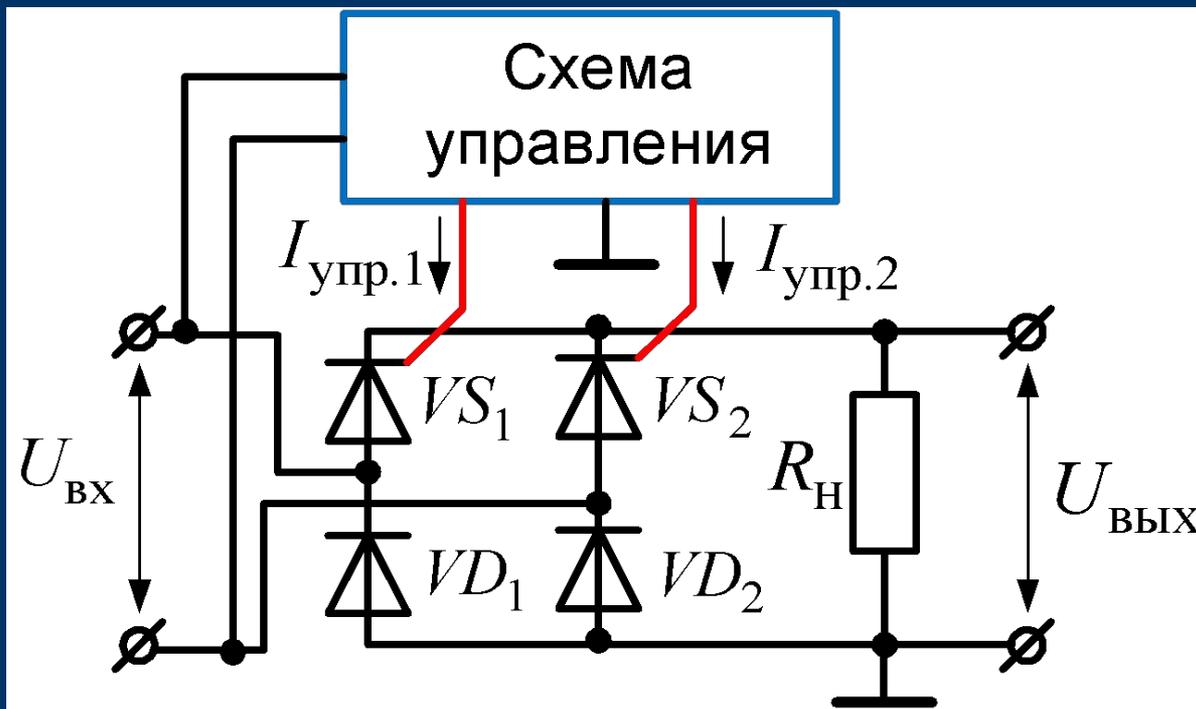
$$T_2 = T_1 + T_H = T_H + T_H = 2 \cdot T_H$$

$$\begin{aligned}
U_{\text{среднее}} &= \frac{1}{T_{\text{H}}} \cdot \int_{T_{\text{H}}}^{2T_{\text{H}}} (U_{\text{m}} - 2U_{\text{vd}}) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3 \cdot T_{\text{H}}} \cdot t\right) \cdot dt = \\
&= \frac{-(U_{\text{m}} - 2U_{\text{vd}})}{T_{\text{H}} \cdot \frac{\pi}{3 \cdot T_{\text{H}}}} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3 \cdot T_{\text{H}}} \cdot t\right) \Big|_{T_{\text{H}}}^{2T_{\text{H}}} = \\
&= \frac{-3 \cdot (U_{\text{m}} - 2U_{\text{vd}})}{\pi} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi}{3 \cdot T_{\text{H}}} \cdot 2 \cdot T_{\text{H}}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{3 \cdot T_{\text{H}}} \cdot T_{\text{H}}\right) \right) =
\end{aligned}$$

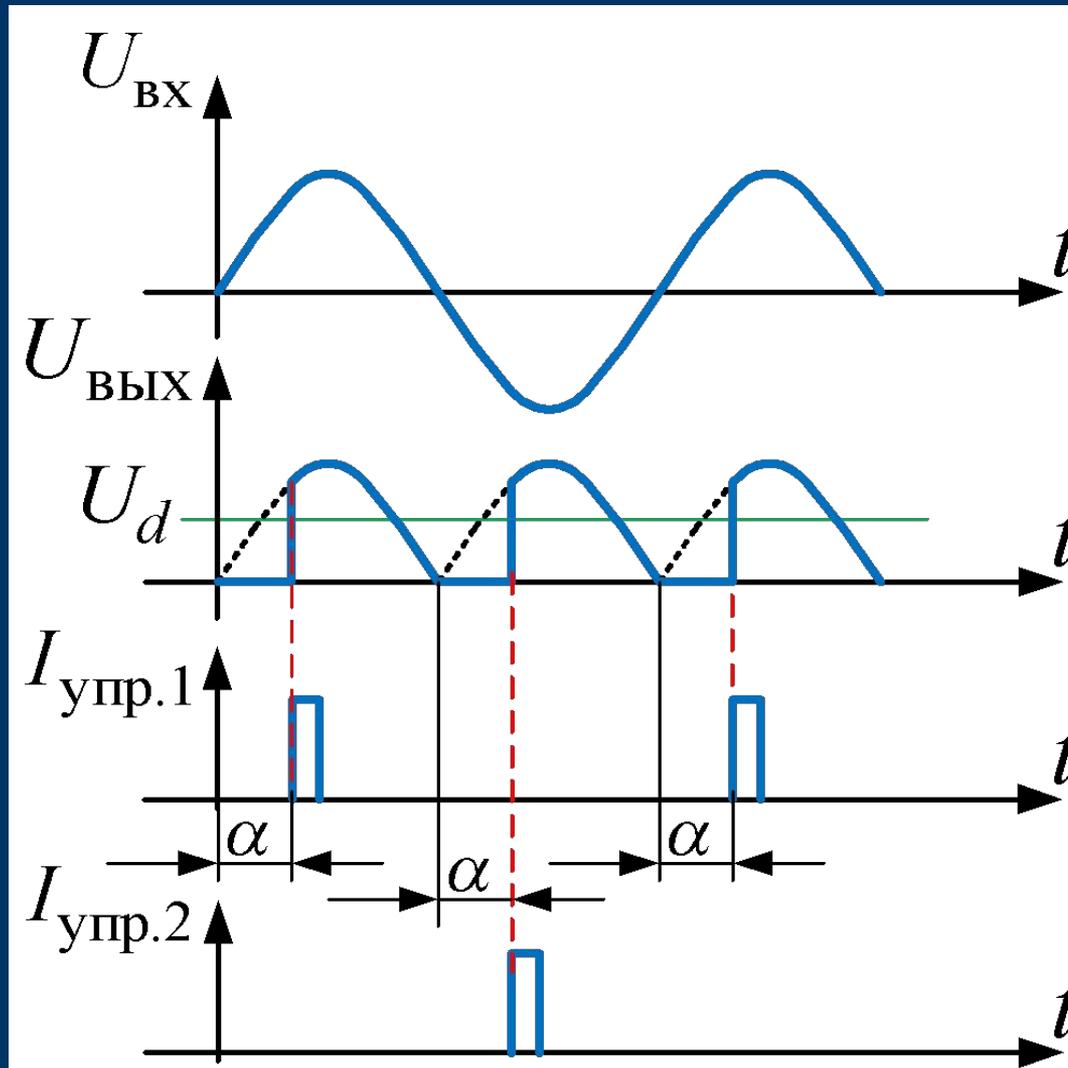
$$\begin{aligned} & \frac{-3 \cdot (U_m - 2U_{vd})}{\pi} \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{3}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \right) = \\ & = \frac{-3 \cdot (U_m - 2U_{vd})}{\pi} \cdot \left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right) = \\ & = \frac{3 \cdot (U_m - 2U_{vd})}{\pi} \approx 0,96 \cdot (U_m - 2U_{vd}) \end{aligned}$$

Управляемые выпрямители

Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель



Осциллограммы работы управляемого выпрямителя



$$\alpha = \frac{t_{\alpha} \cdot 2 \cdot \pi}{T_{\text{H}}}$$



$$t_{\alpha} = \frac{\alpha \cdot T_{\text{H}}}{2 \cdot \pi}$$

Вывод формулы среднего значения напряжения на нагрузке

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{1}{T_H} \cdot \int_{t_\alpha}^{T_H} U_{\text{ВЫХ}}(t) \cdot dt = \\ &= \frac{1}{T_H} \cdot \int_{t_\alpha}^{T_H} (U_m - 2 \cdot U_{\text{vd}}) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_{\text{среднее}} &= \frac{-(U_m - 2 \cdot U_{\text{vd}})}{T_H \cdot \omega} \cdot \cos(\omega \cdot t) \Bigg|_{\frac{\alpha \cdot T_H}{2 \cdot \pi}}^{T_H} = \\
 &= \frac{-(U_m - 2 \cdot U_{\text{vd}})}{T_H \cdot \frac{\pi}{T_H}} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi}{T_H} \cdot T_H\right) - \cos\left(\frac{\pi}{T_H} \cdot \frac{\alpha \cdot T_H}{2 \cdot \pi}\right) \right) =
 \end{aligned}$$

$$U_{\text{среднее}} = \frac{(U_m - 2 \cdot U_{\text{vd}})}{\pi} \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right)$$