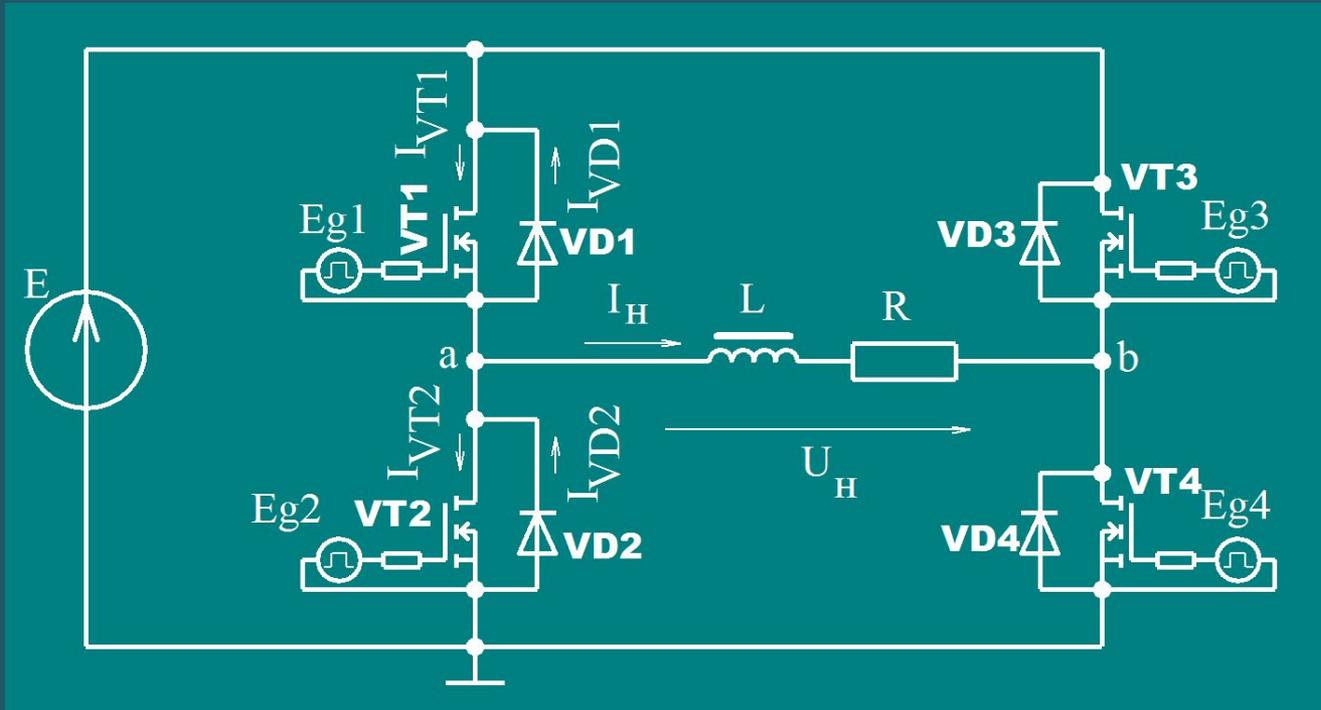
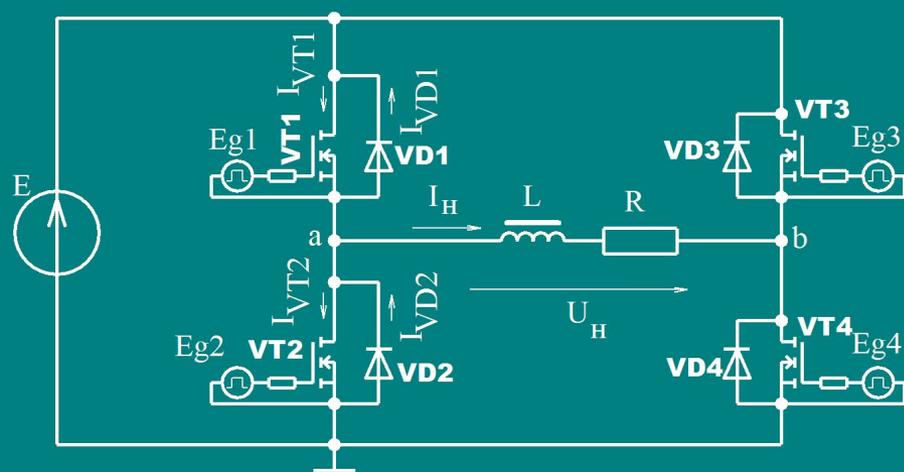


# **Автономный инвертор напряжения с синусоидальным выходным напряжением**

# Принципиальная схема АИН

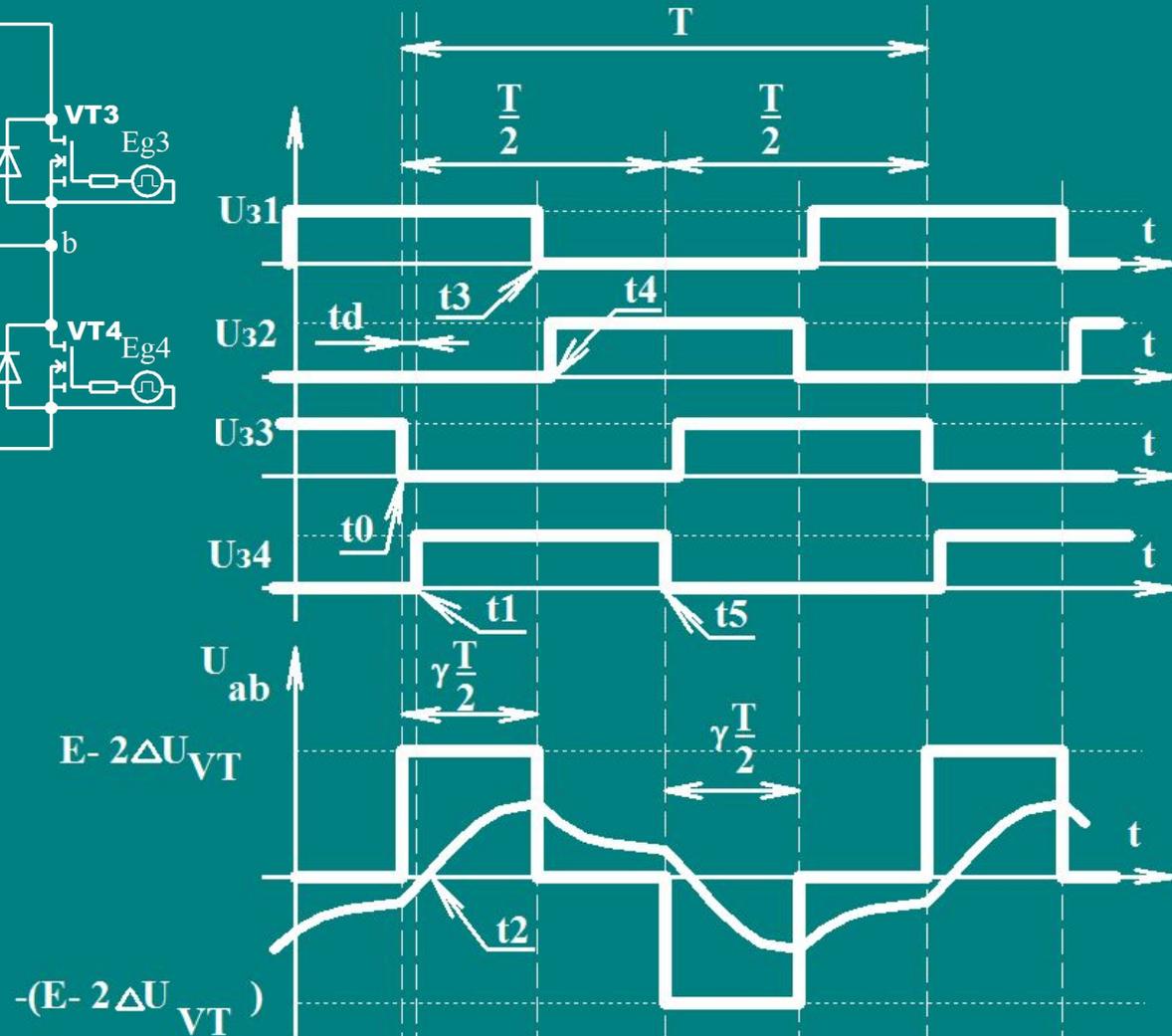


# Принципиальная схема АИН



$$U_{31} \approx Eg1, U_{32} \approx Eg2,$$

$$U_{33} \approx Eg3, U_{34} \approx Eg4$$



# Напряжение нагрузки

$$n = 2 \cdot k + 1, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

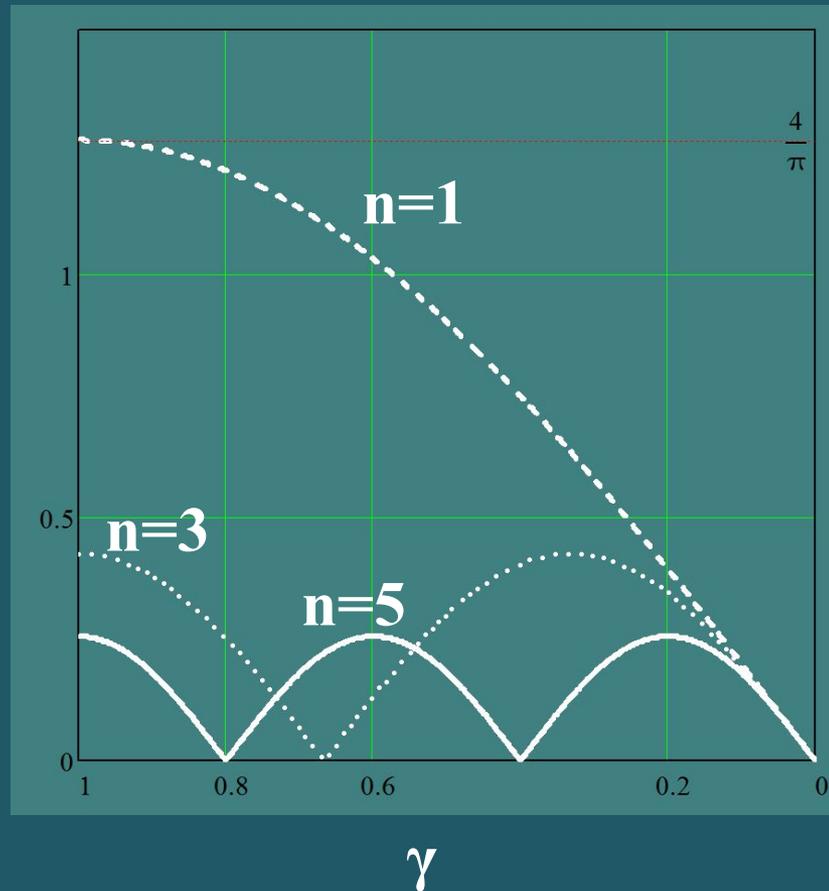
$$u_{ab}(t) = \frac{4 \cdot E}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^k \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot n \cdot \gamma\right)}{n} \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t)$$

# Гармонический состав

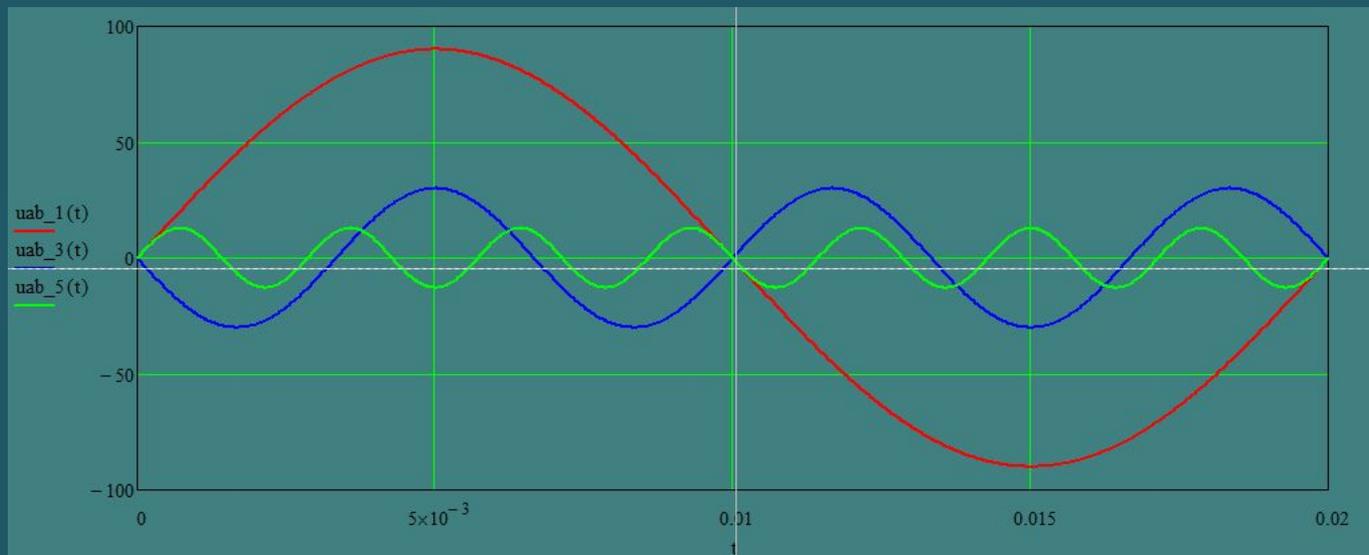
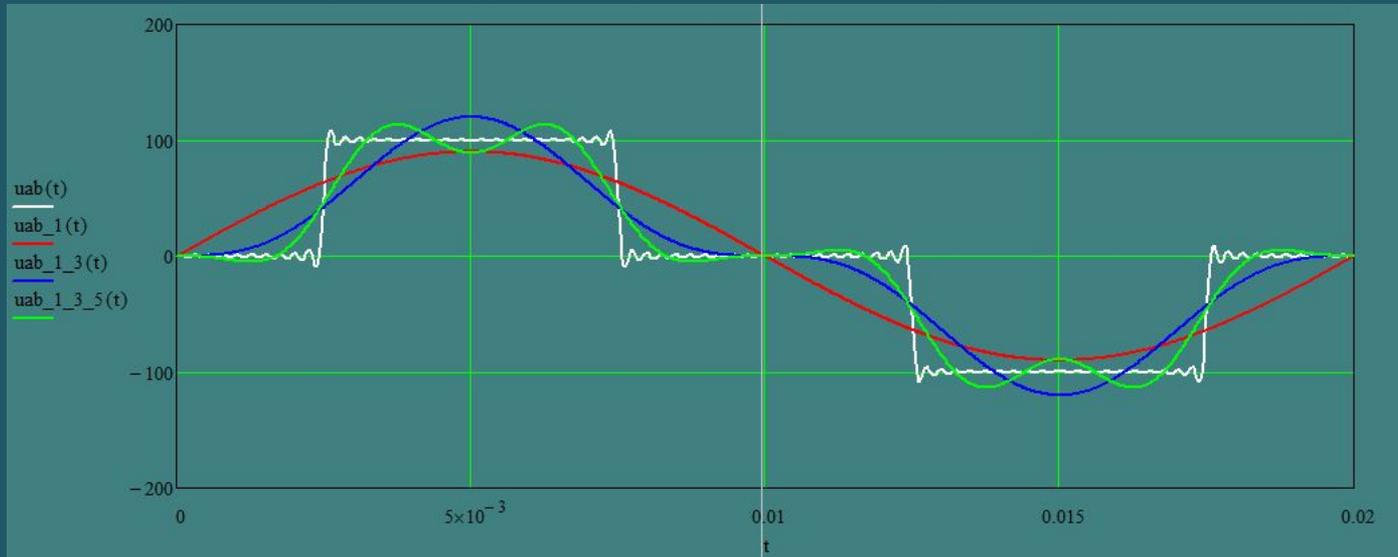
## напряжения

$$u_{ab}(t) = \frac{4 \cdot E}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^k \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot n \cdot \gamma\right)}{n} \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t)$$

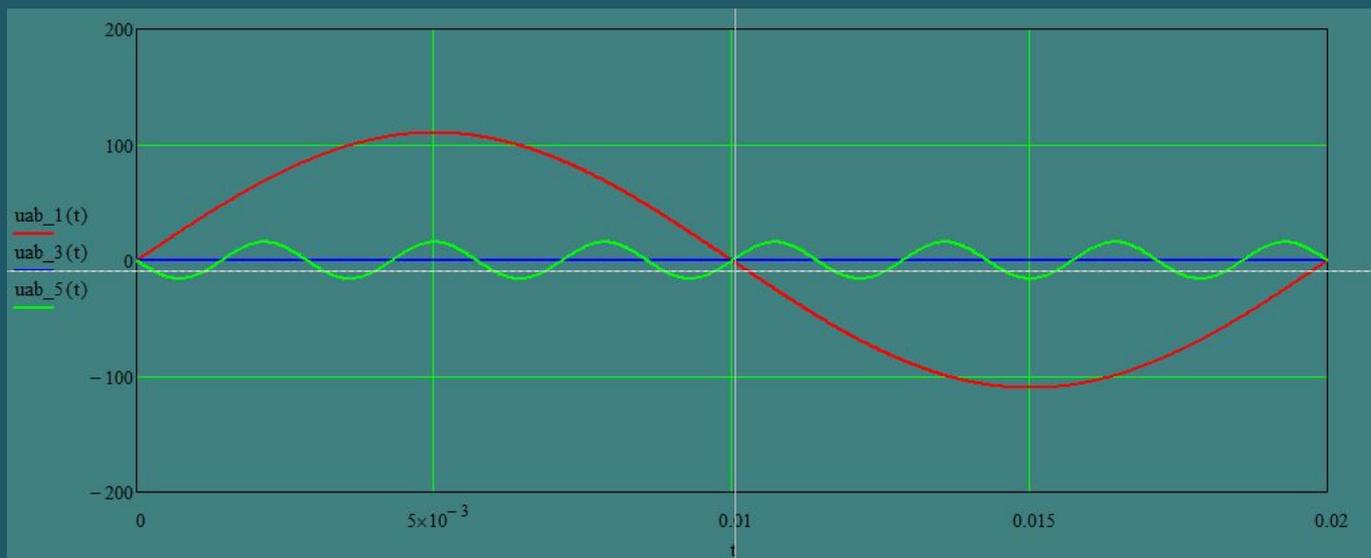
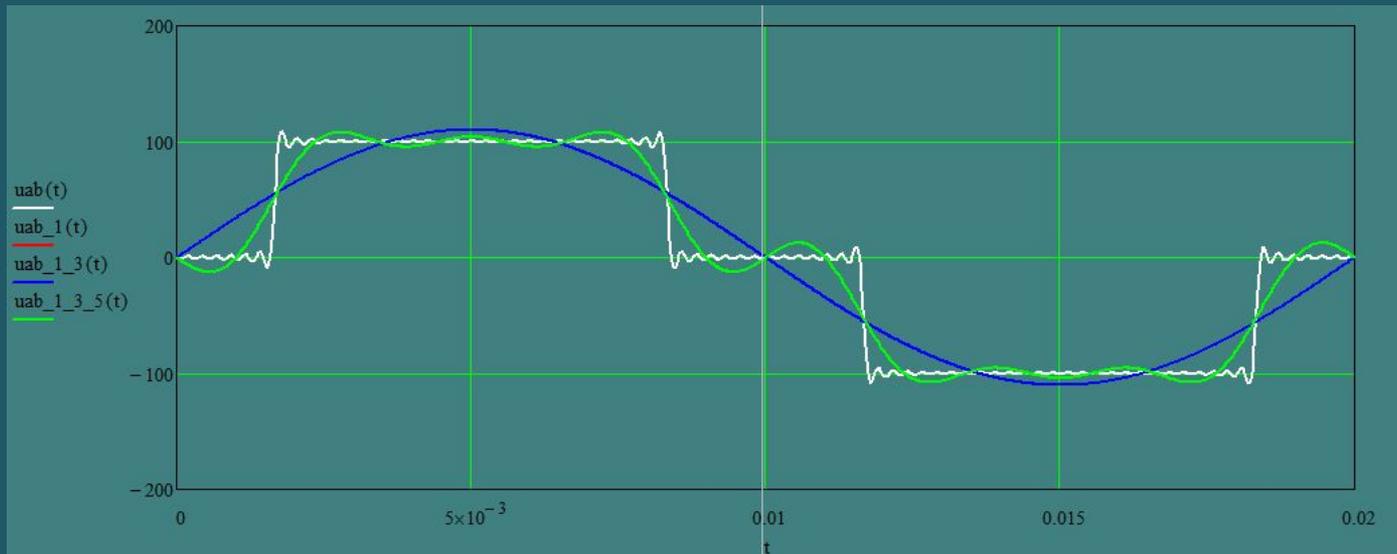
$$\frac{U_{H(n)m}}{E}$$



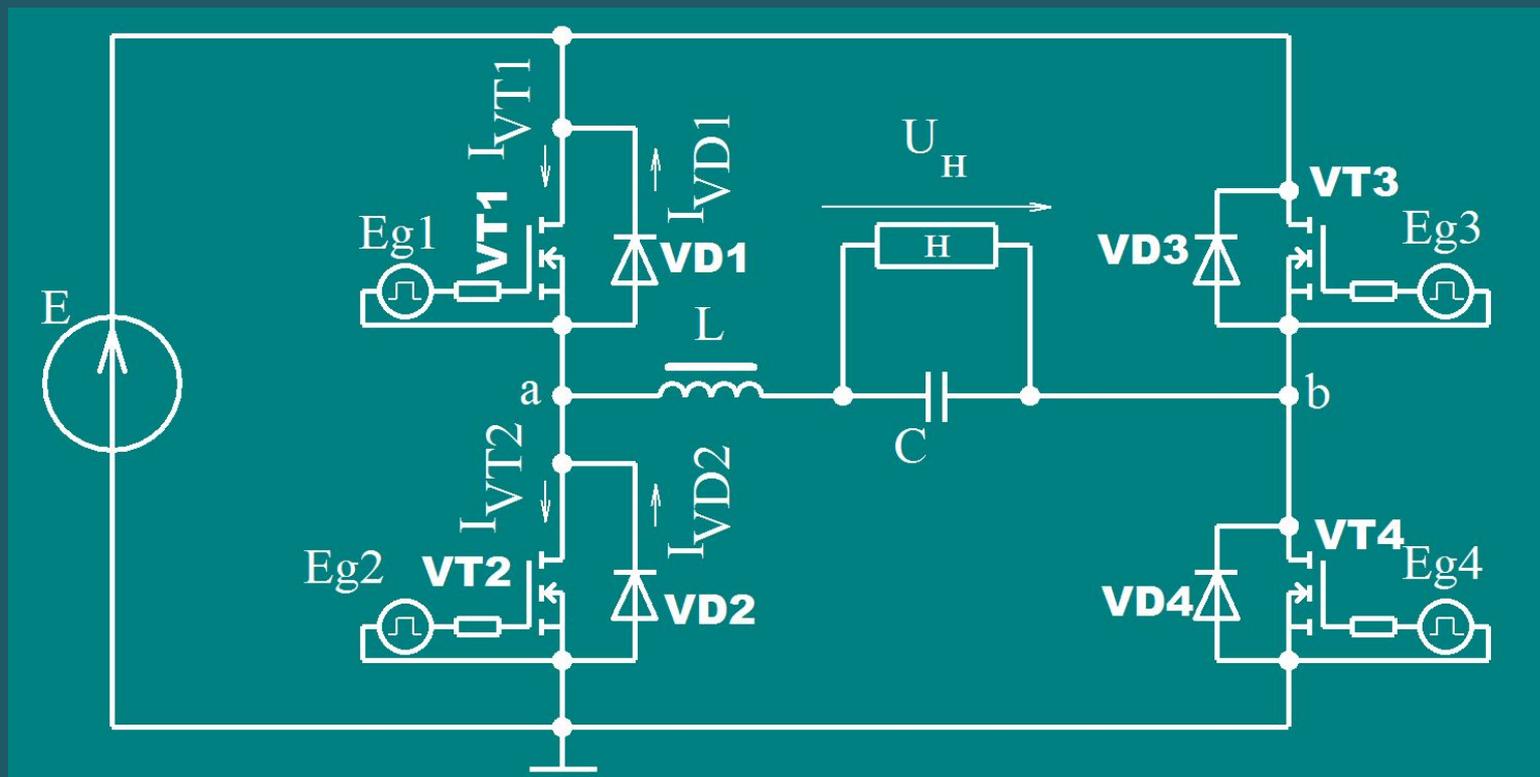
# Напряжение нагрузки: $\gamma=1/2$



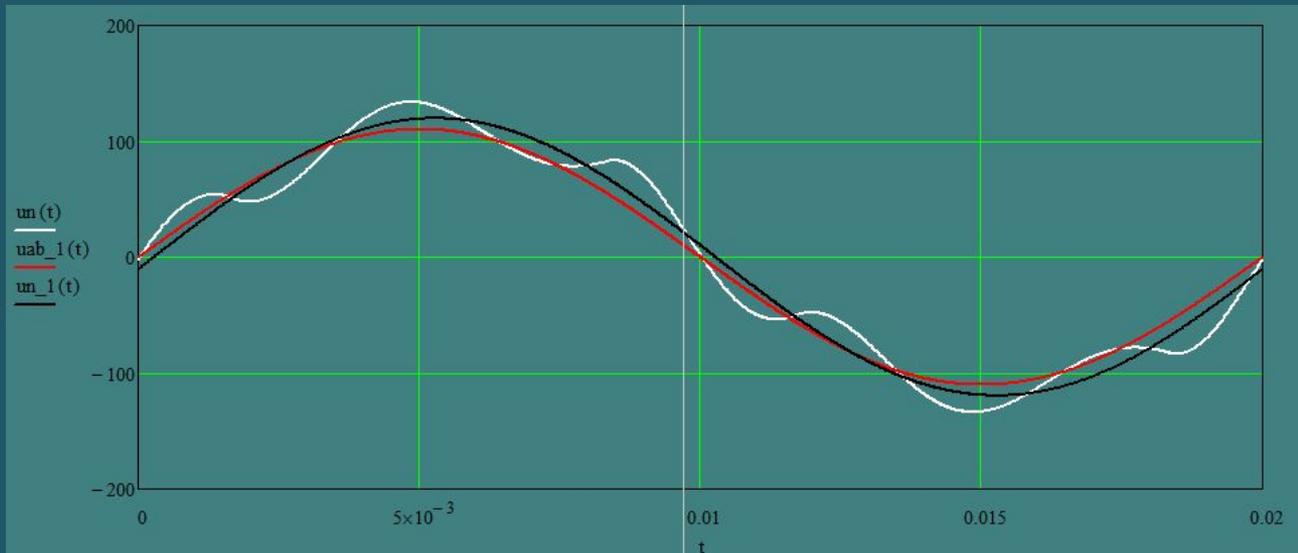
# Напряжение нагрузки: $\gamma=2/3$



# Принципиальная схема АИН с выходным фильтром



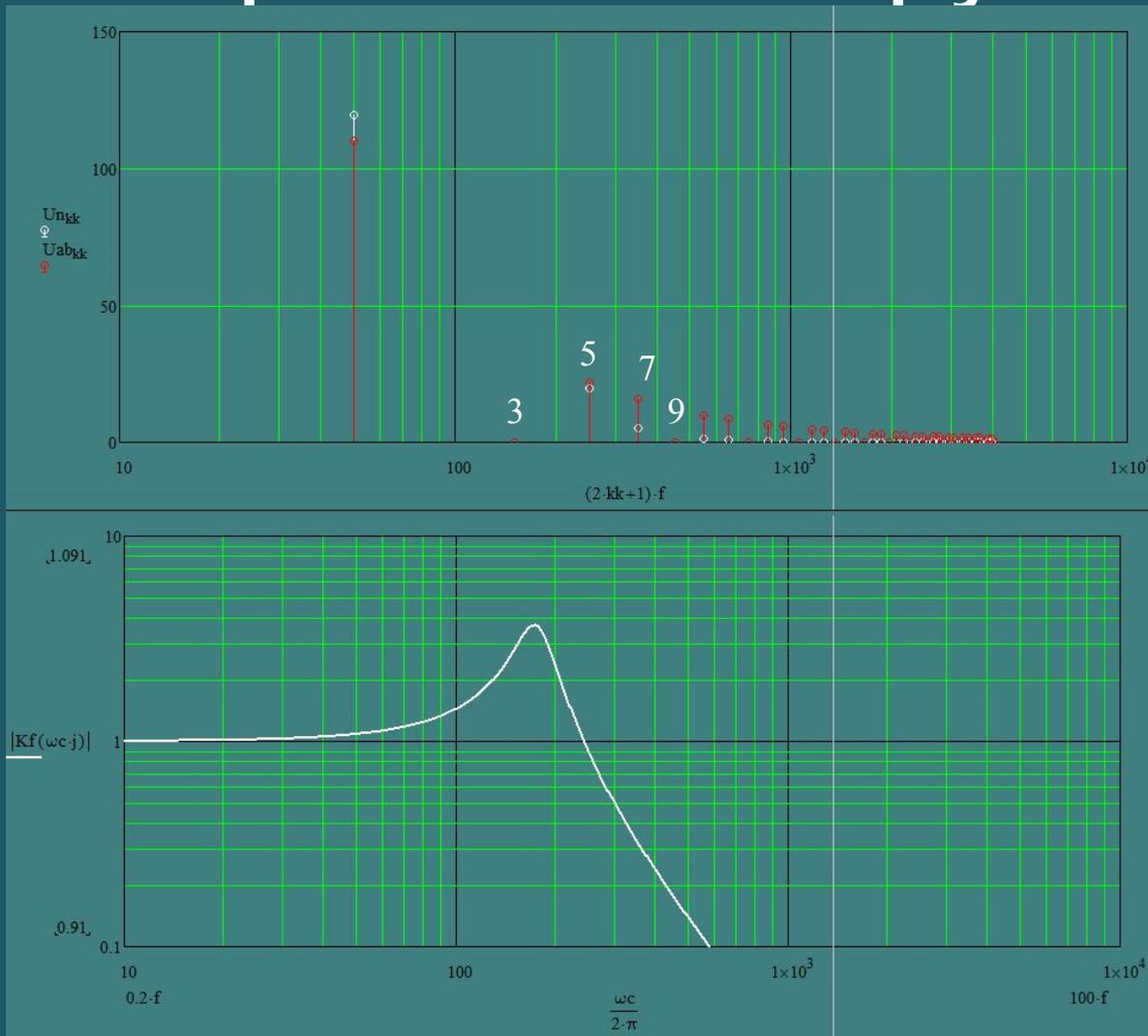
# Напряжение нагрузки



$K_{\Gamma} = 17,2\%$

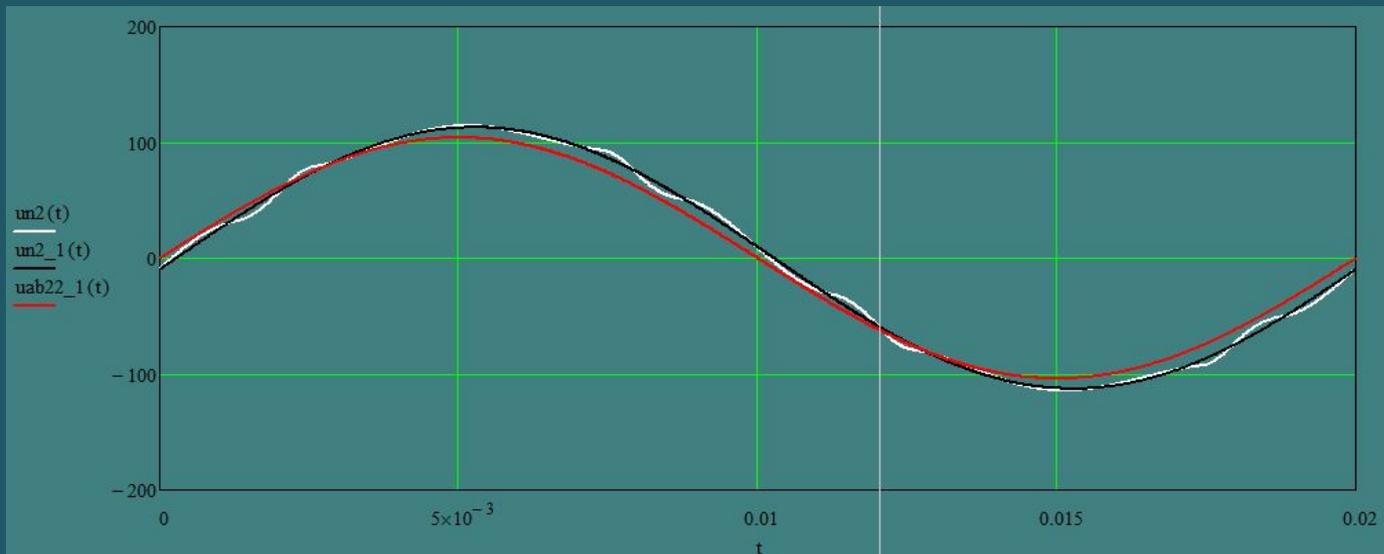
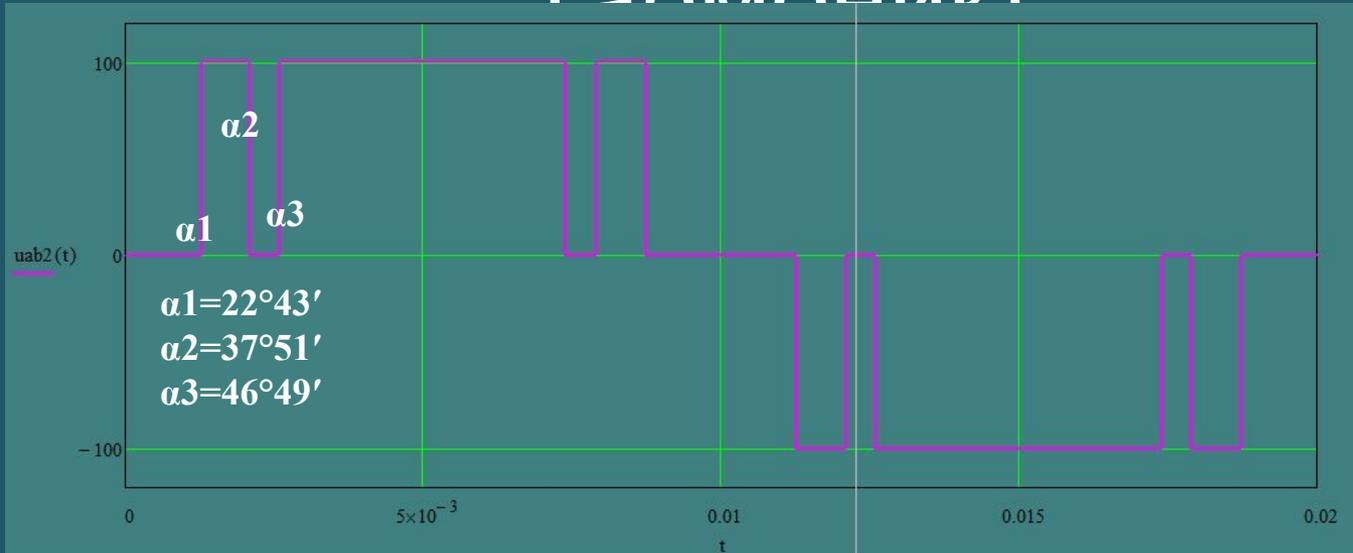
$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} U_{H(n)}^2}}{U_{H(1)}}$$

# Напряжение нагрузки



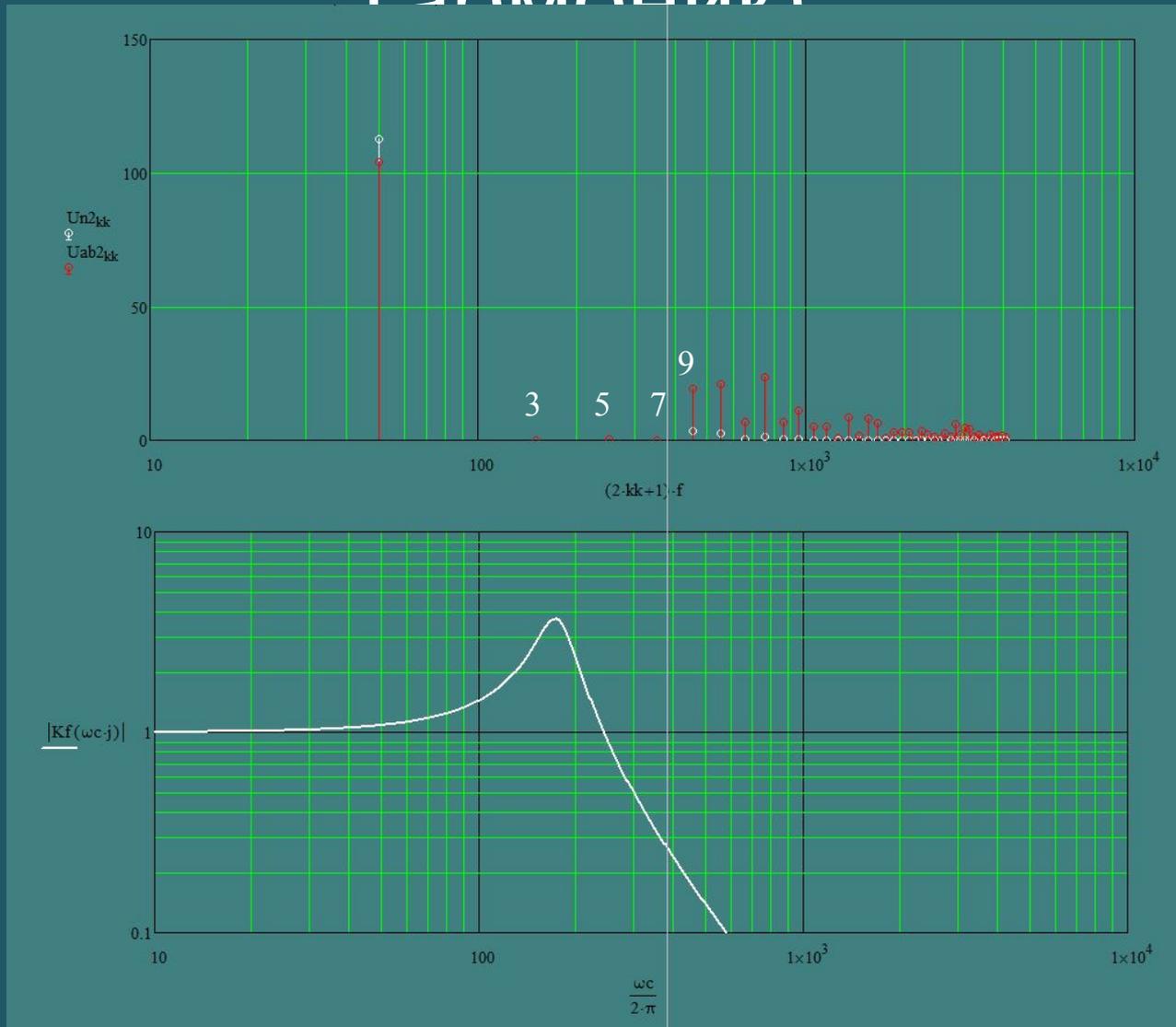
$$K\phi(j \cdot \omega) = K\phi(p) = \frac{1}{p^2 \cdot L \cdot C + p \cdot \frac{L}{R_H} + 1}$$

# КОДО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ (селективное исключение гармоник)

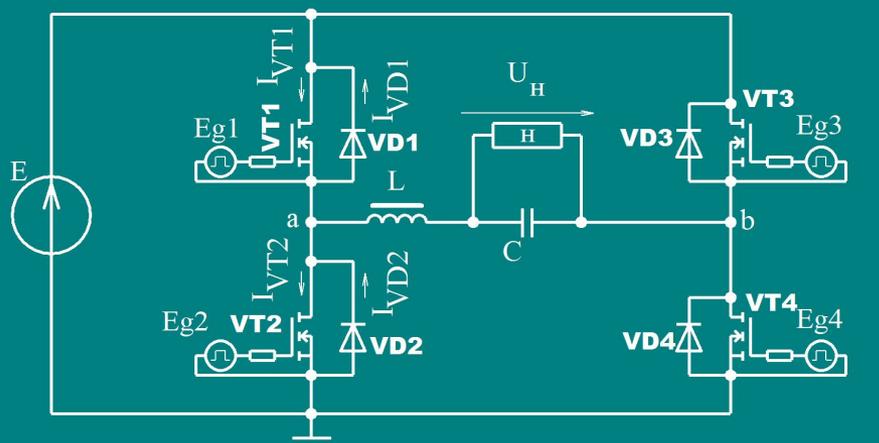


$K_r = 4\%$

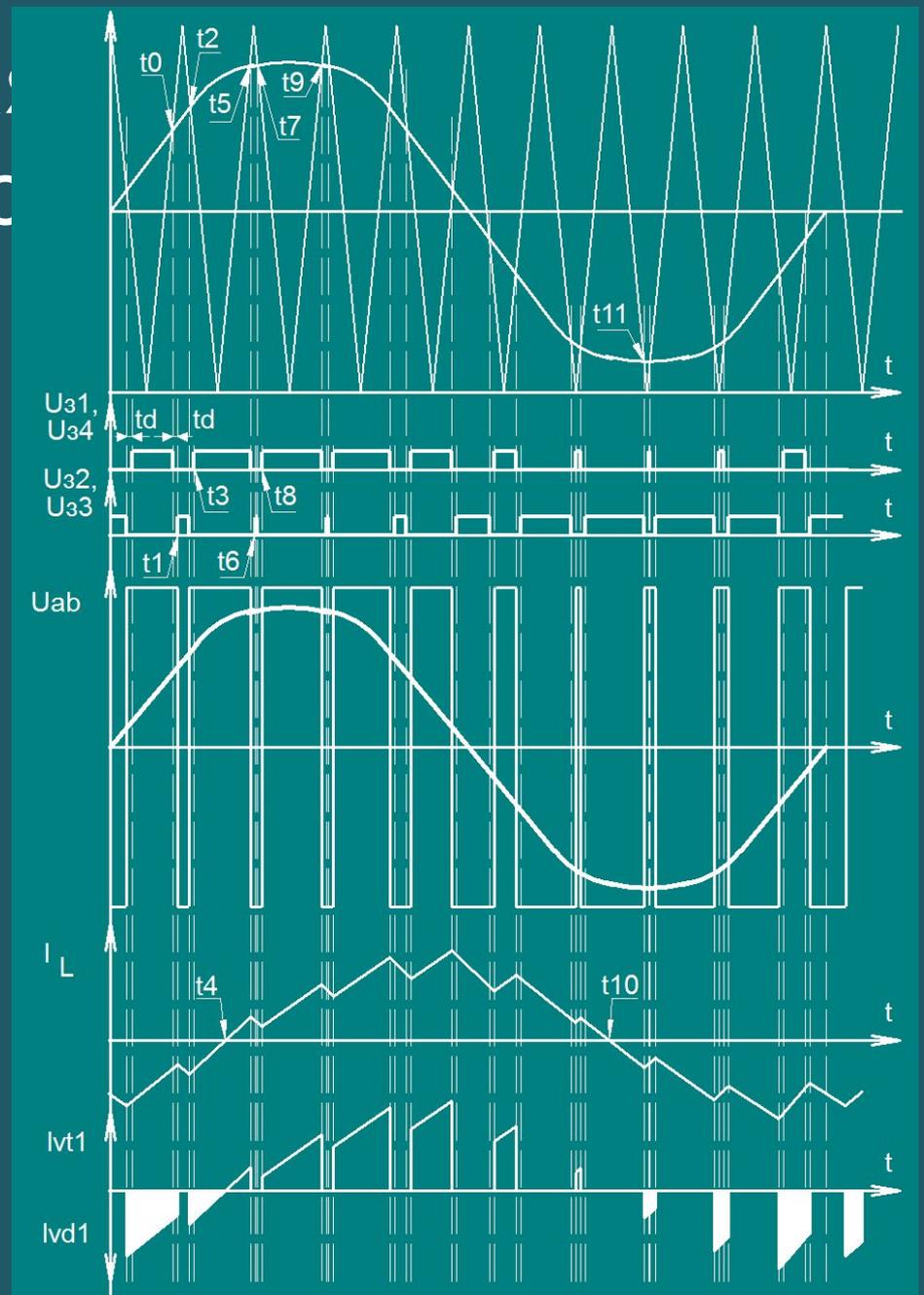
# КОДО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ (селективное исключение гармоник)



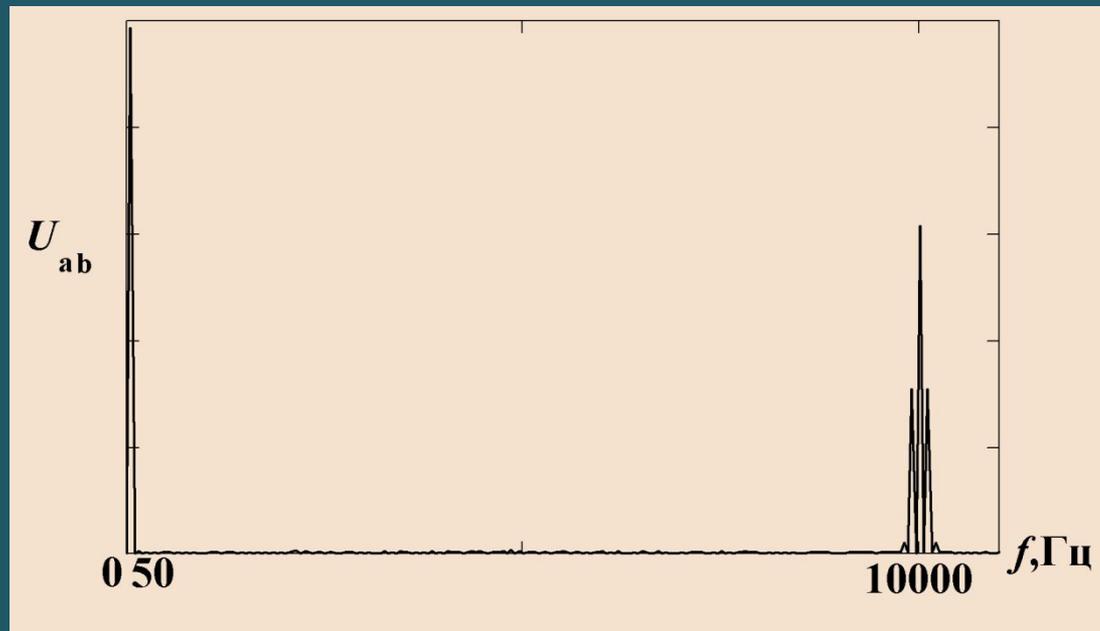
# Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) по синусоидальному закону



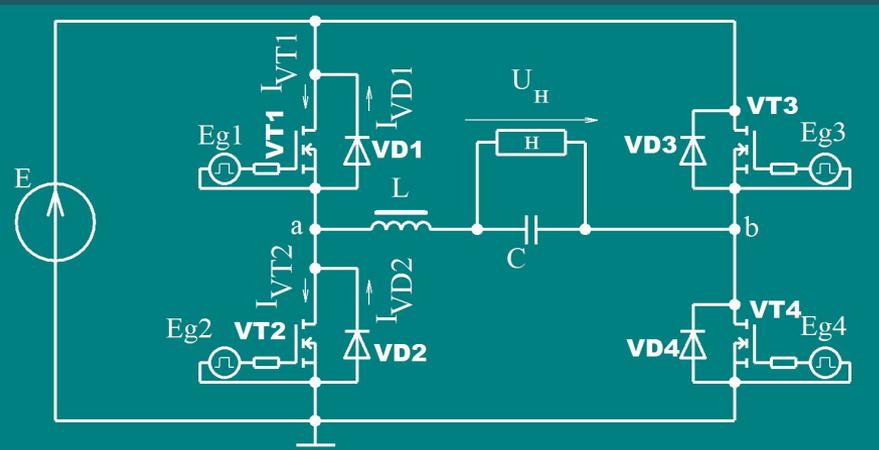
Показана многократная равномерная  
двухполярная двухсторонняя ШИМ



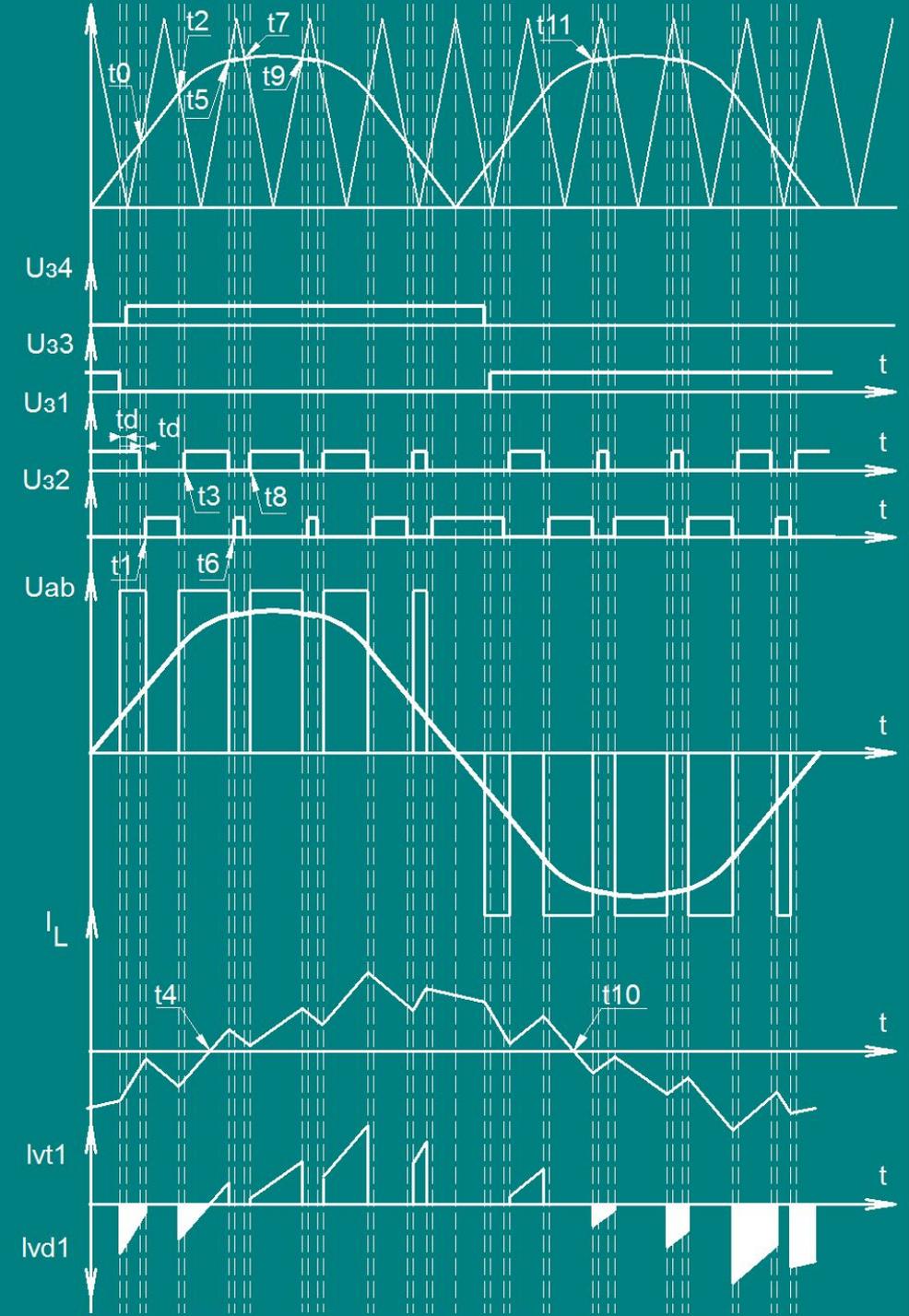
# Широтно-импульсная модуляция по синусоидальному закону: спектр выходного напряжения



# ШИМ по синусоидальному закону



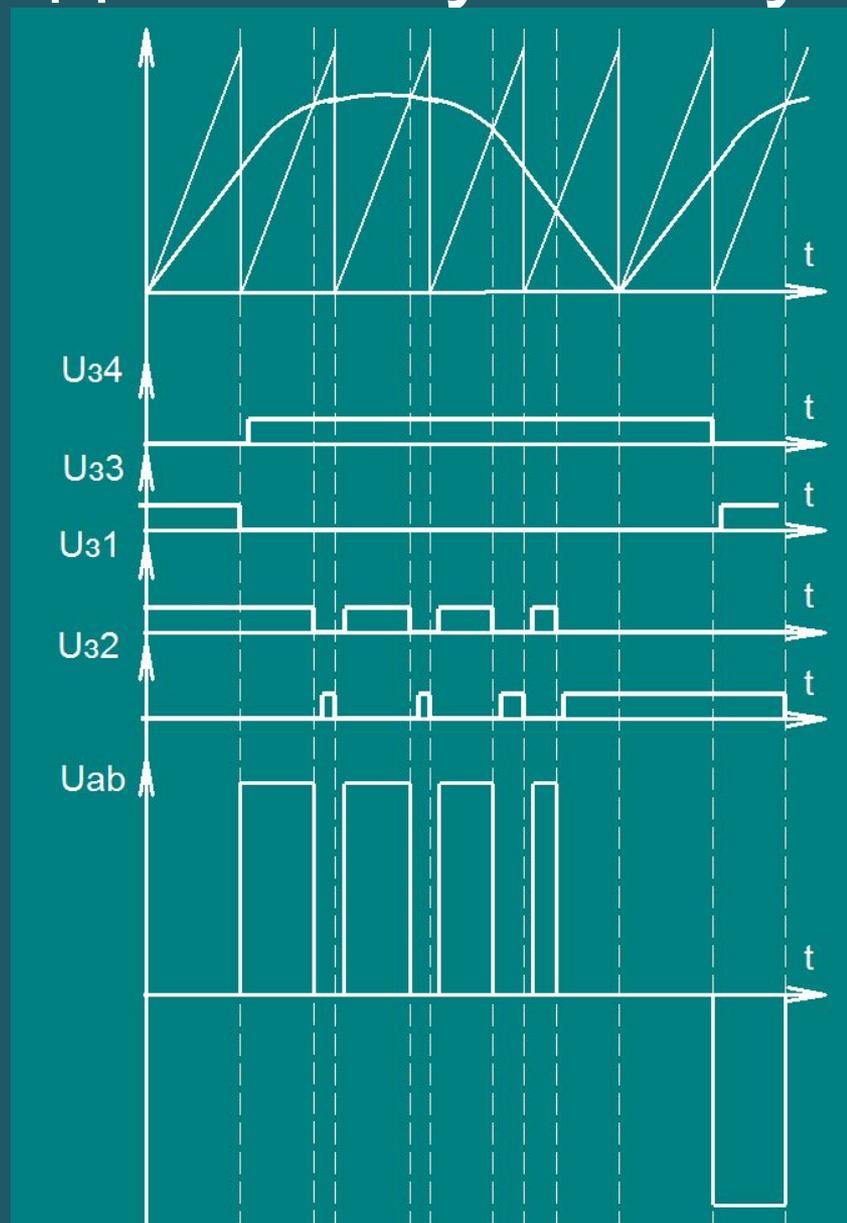
Показана многократная равномерная однополярная двухсторонняя ШИМ



# ШИМ по синусоидальному закону

Множественная равномерная  
однополярная односторонняя  
ШИМ с модуляцией по спаду:

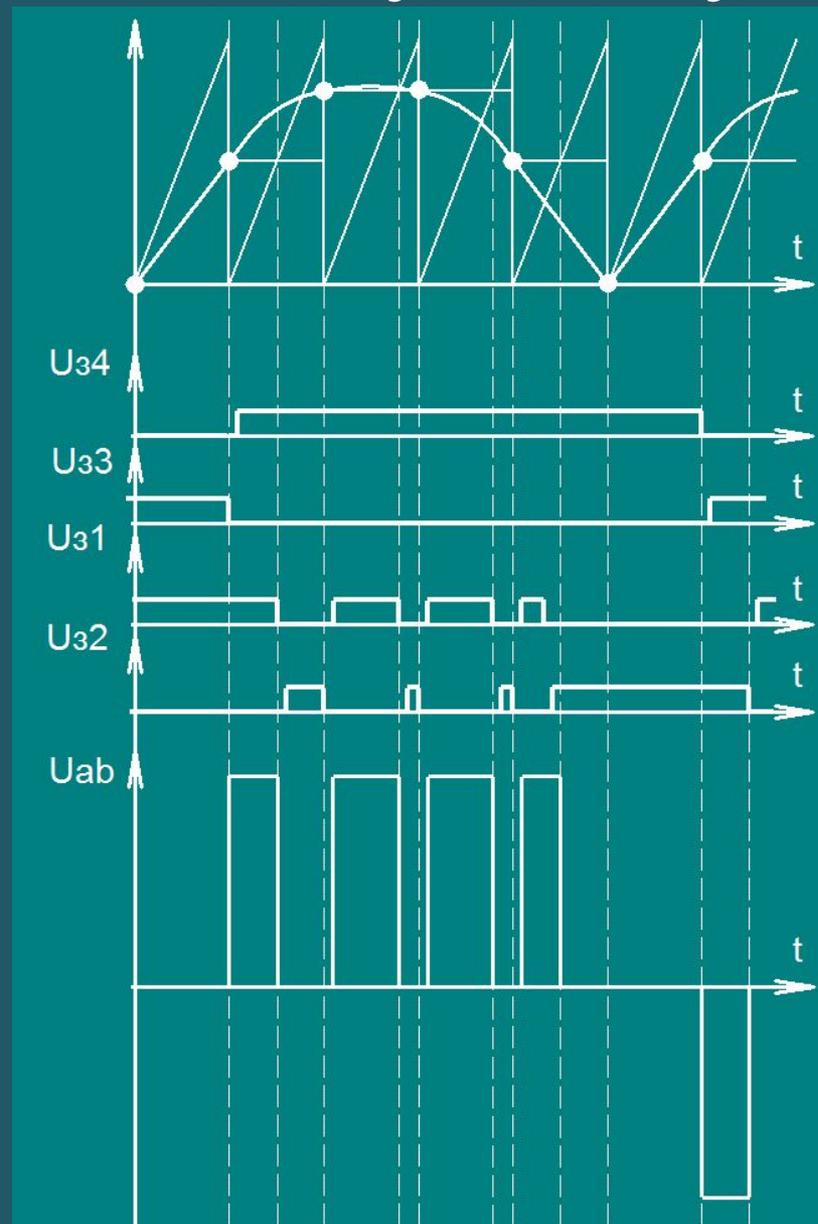
Такую модуляцию называют  
модуляцией II рода – с опорным  
сигналом сравнивается  
модулирующий сигнал, взятый в  
момент самого сравнения



# ШИМ по синусоидальному закону

Многokратная равномерная  
однополярная односторонняя  
ШИМ с модуляцией по спаду:

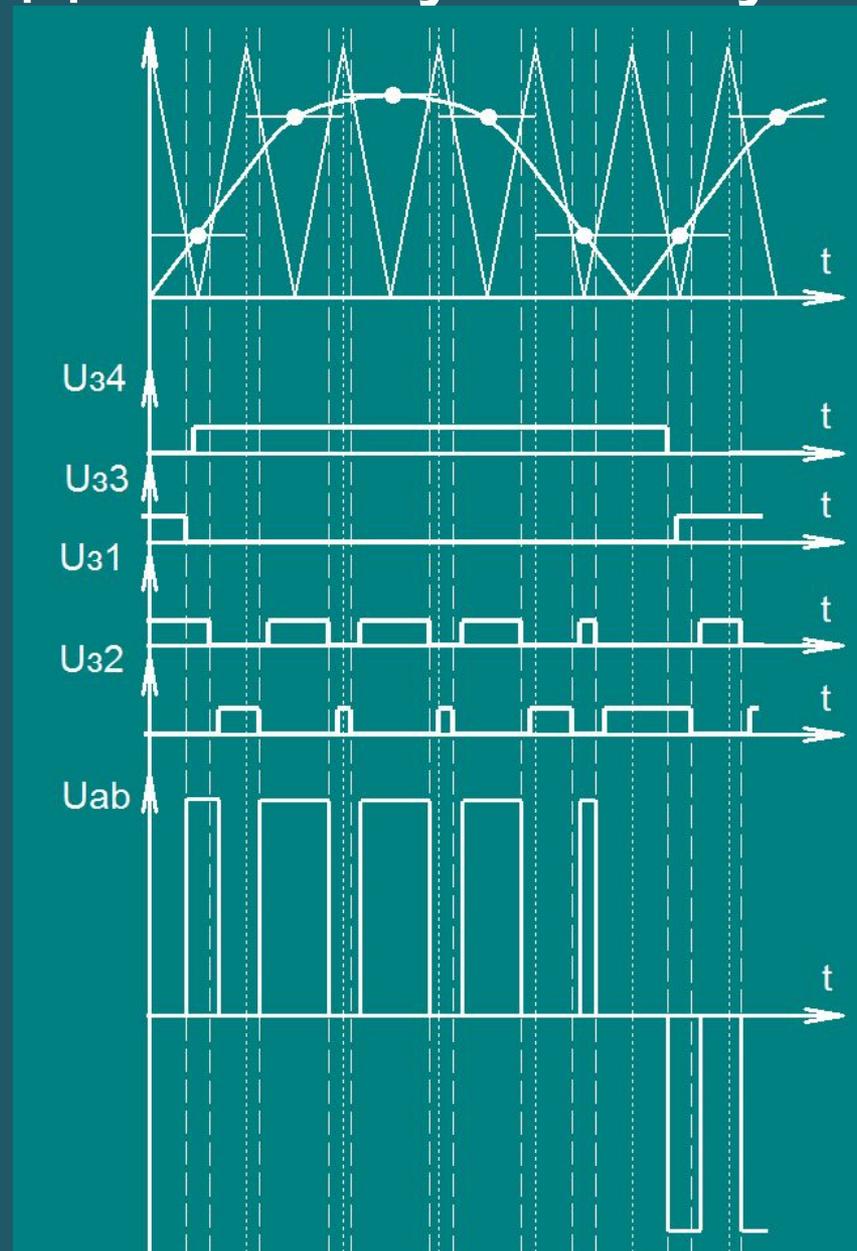
Такую модуляцию называют  
модуляцией I рода – с опорным  
сигналом сравнивается  
модулирующий сигнал, взятый в  
известный момент периода  
(здесь - в начале периода)



# ШИМ по синусоидальному закону

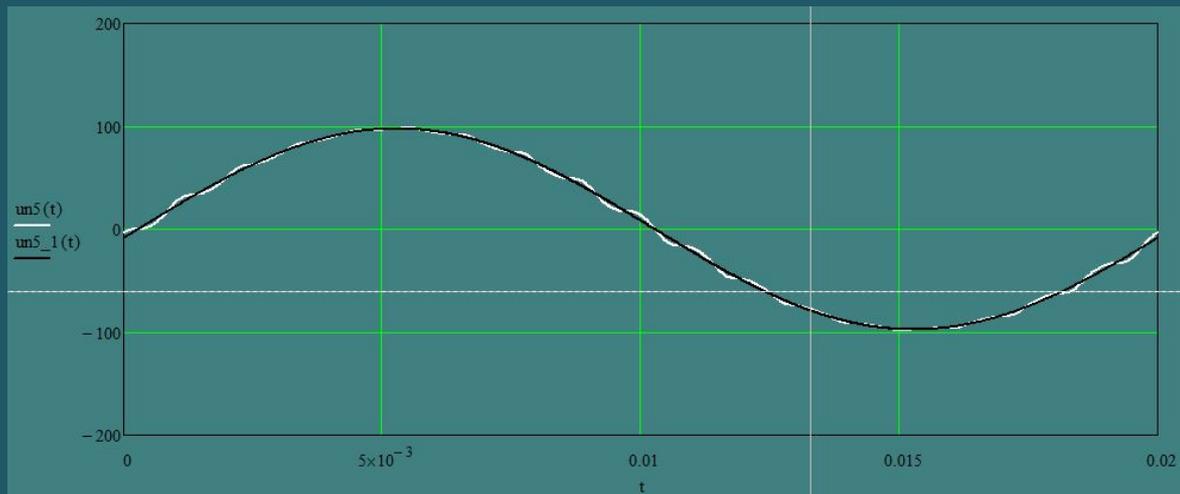
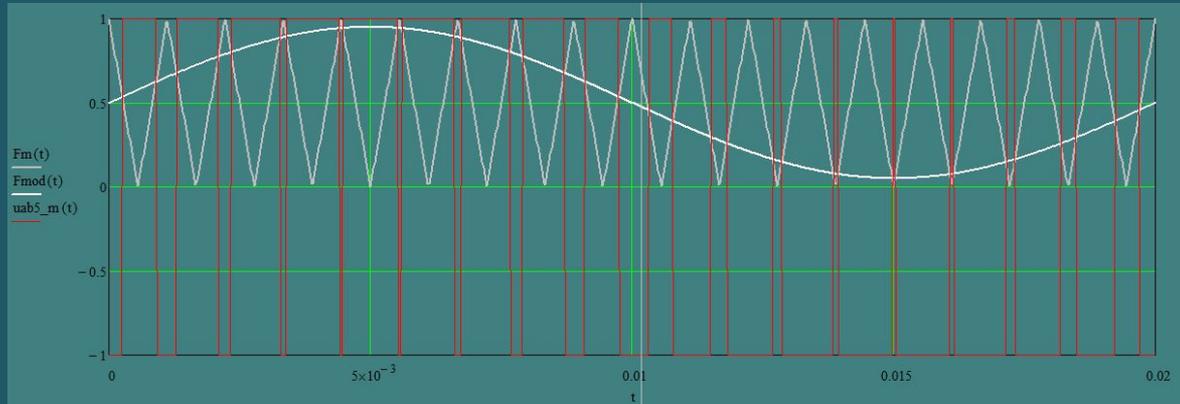
Многokратная равномерная  
однополярная двухсторонняя  
ШИМ:

Это модуляция I рода – с опорным  
сигналом сравнивается  
модулирующий сигнал, взятый в  
известный момент периода  
(здесь – в середине периода)



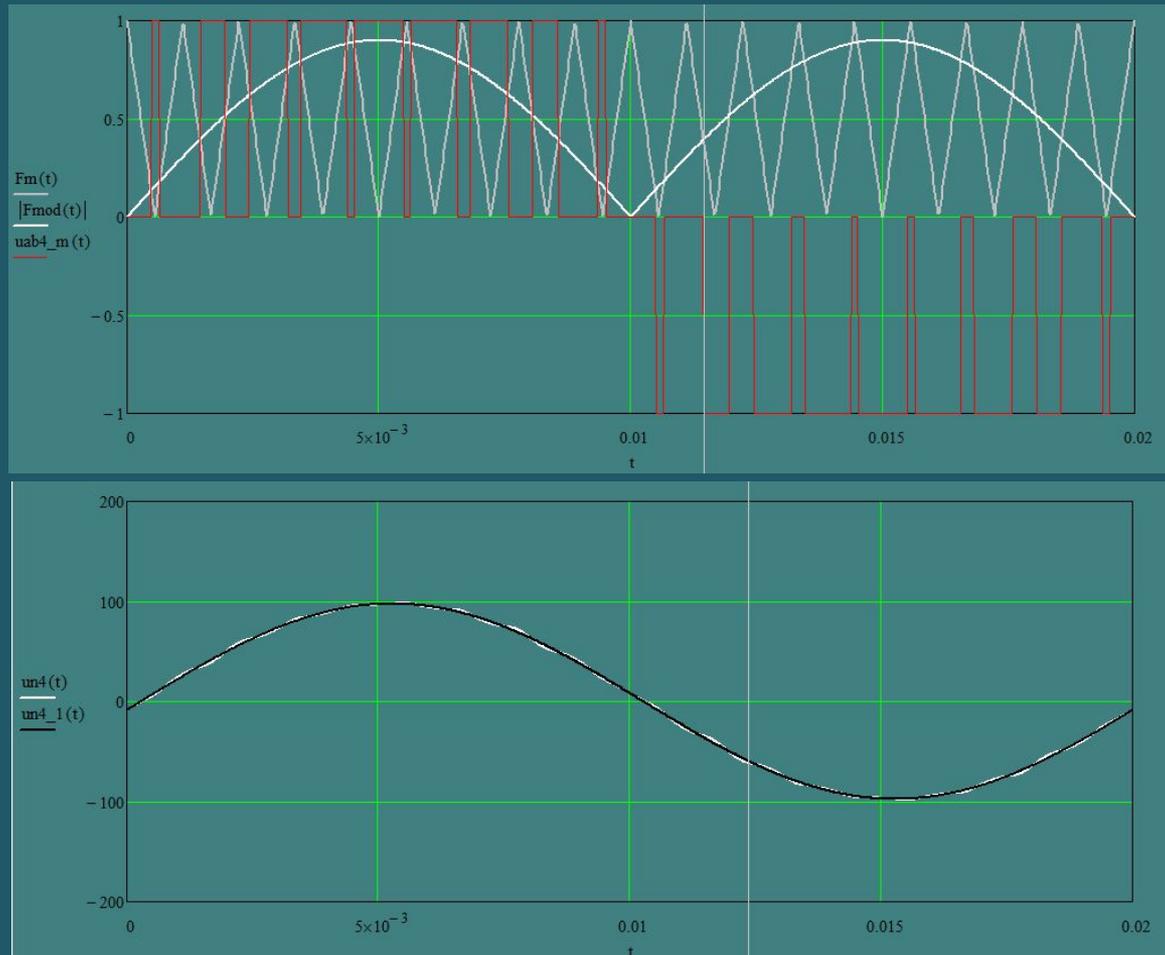
# ШИМ по синусoidalьному закону: сравнение

Двухполярная двухсторонняя ШИМ:



# ШИМ по синусoidalьному закону: сравнение

Однополярная двухсторонняя ШИМ:



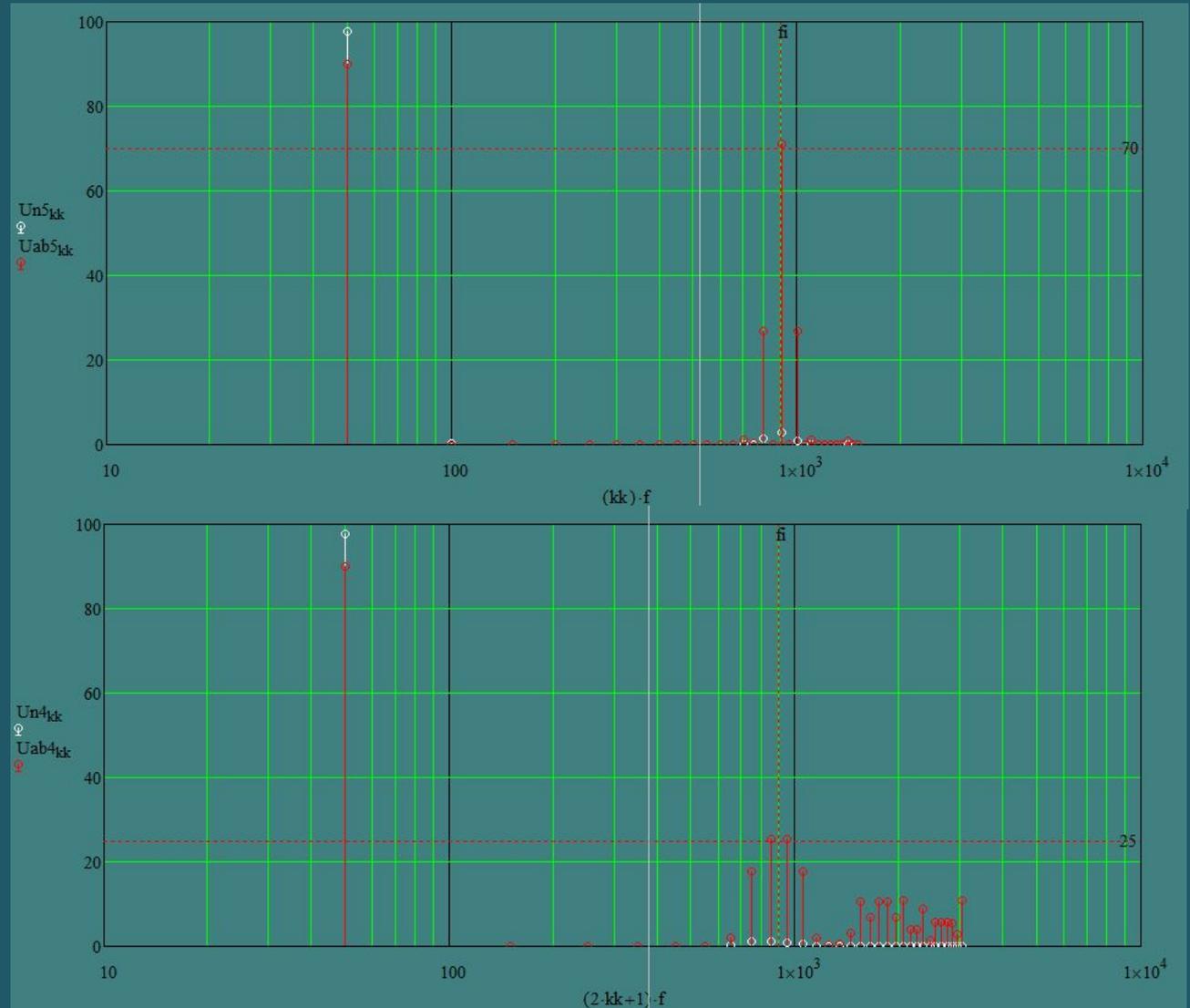
# ШИМ по синусоидальному закону: сравнение

Двухполярная  
двухсторонняя  
ШИМ:

$K_{\Gamma}=3,3\%$

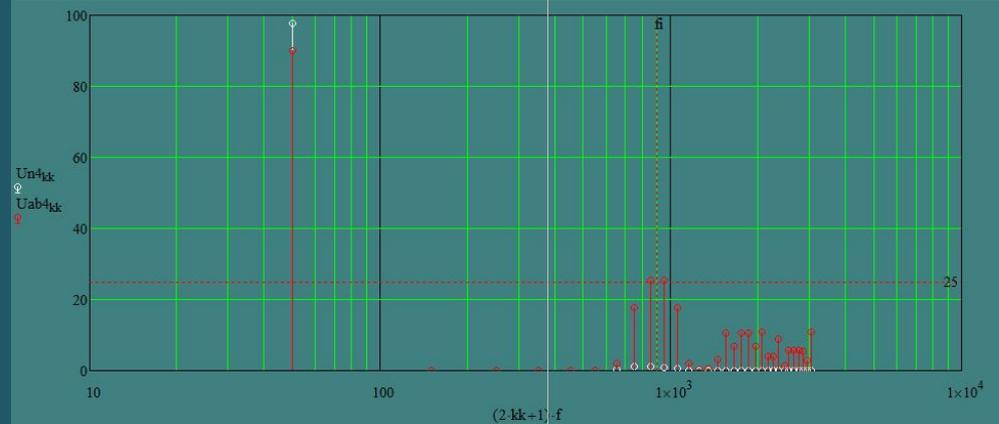
Однополярная  
двухсторонняя  
ШИМ:

$K_{\Gamma}=1,9\%$



# Расчет фильтра

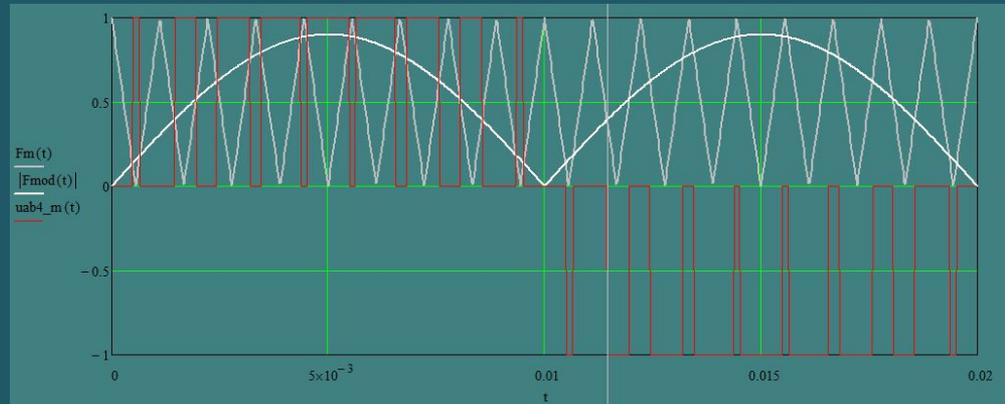
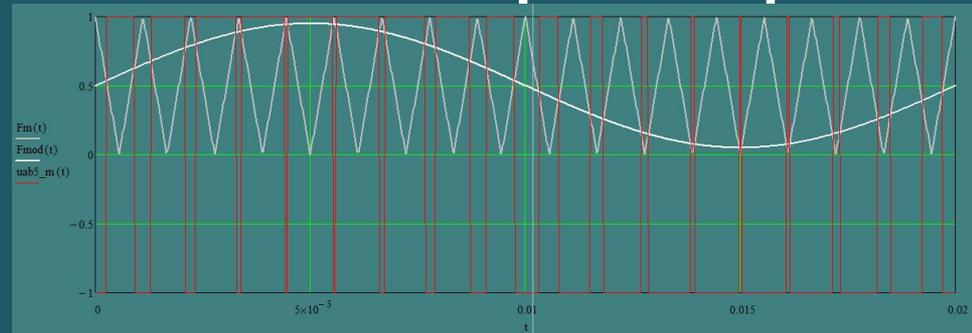
Однополярная  
двухсторонняя  
ШИМ,  $i=9$



$$|K\Phi(j \cdot \omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 \cdot L \cdot C)^2 + \left(\omega \cdot \frac{L}{R_H}\right)^2}} \approx \frac{1}{\omega^2 \cdot L \cdot C}$$



# Расчет фильтра



Модулирующий сигнал для двухполярной ШИМ:

$$Fm(t) = \frac{1}{2} + \frac{\gamma_m}{2} \cdot \sin(\omega_m \cdot t)$$

Модулирующий сигнал для однополярной ШИМ:

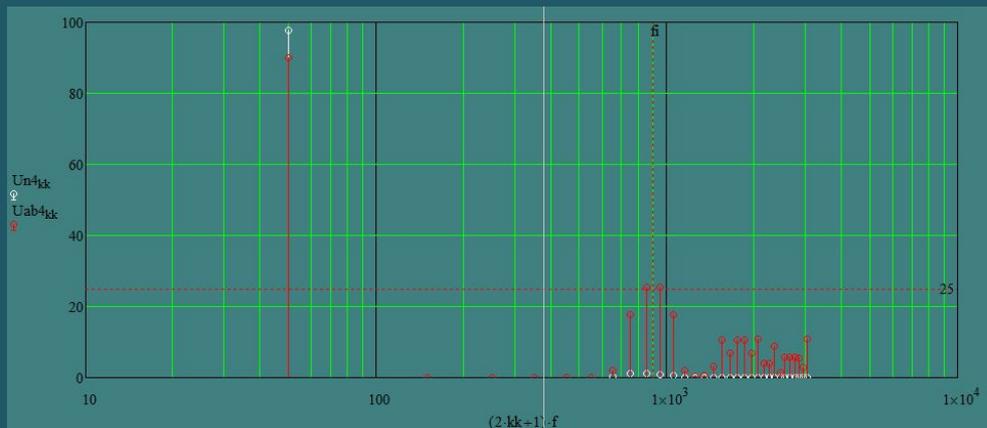
$$Fm(t) = |\gamma_m \cdot \sin(\omega_m \cdot t)|$$

Амплитуда первой гармоника  $U_{ab}$  :

$$U_{ab(1)} \approx \gamma_m \cdot E$$

# Расчет фильтра

Однополярная  
двухсторонняя  
ШИМ,  $i=9$



Номер низшей из высших гармоник, которая имеет значительную амплитуду:

Для однополярной ШИМ:

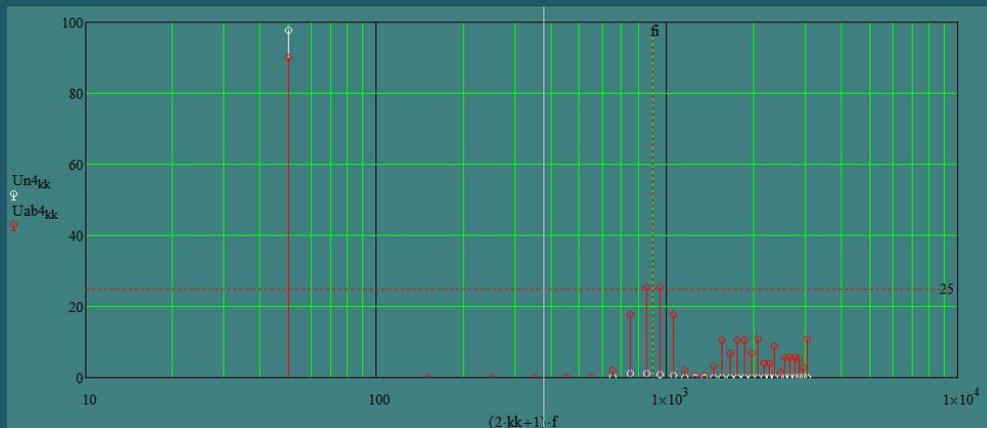
$$n_{min} = 2 \cdot i - 1$$
$$f_{min} = (2 \cdot i - 1) \cdot f_m$$

Вторая составляющая:

$$n_{min2} = 2 \cdot i + 1$$
$$f_{min2} = (2 \cdot i + 1) \cdot f_m$$

# Расчет фильтра

Однополярная  
двухсторонняя  
ШИМ,  $i=9$



Если  $f_i \gg f_m$  (т.е.  $i$  достаточно большое), то разница между  $f_{min}$ ,  $f_i$  и  $f_{min2}$  очень невелика и можно считать, что

$$|K\Phi(j \cdot 2\pi \cdot f_{min})| \approx |K\Phi(j \cdot 2\pi \cdot f_{min})| \approx$$

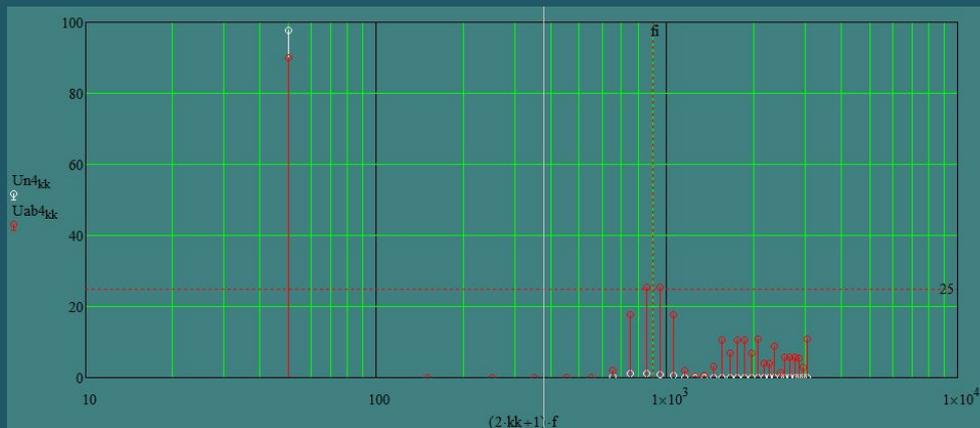
$$\approx \frac{1}{(2\pi \cdot f_i)^2 \cdot L \cdot C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 2 \cdot i \cdot f_m)^2 \cdot L \cdot C} = \left(\frac{\omega_{рез}}{2 \cdot i \cdot \omega_m}\right)^2 = S_{\Phi}^{-1}$$

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

# Расчет фильтра

Однополярная  
двухсторонняя  
ШИМ,  $i=9$

Примем, что  $u_m \approx 1$



$$\begin{aligned}
 K_{\Gamma} &\approx \frac{\sqrt{|K\Phi(j \cdot i \cdot \omega_m)|^2 \cdot [U_{ab(2 \cdot i - 1)}^2 + U_{ab(2 \cdot i + 1)}^2]}}{U_{ab(1)} \cdot |K\Phi(j \cdot \omega_m)|} = \\
 &= |K\Phi(j \cdot i \cdot \omega_m)| \cdot \frac{\sqrt{[U_{ab(2 \cdot i - 1)}^2 + U_{ab(2 \cdot i + 1)}^2]}}{U_{ab(1)} \cdot |K\Phi(j \cdot \omega_m)|} \approx \\
 &\approx \sqrt{[0,25^2 + 0,25^2]} = 0,35 \cdot \left(\frac{\omega_{\text{рез}}}{2 \cdot i \cdot \omega_m}\right)^2
 \end{aligned}$$

$$|K\Phi(j \cdot \omega_m)| \approx 1$$

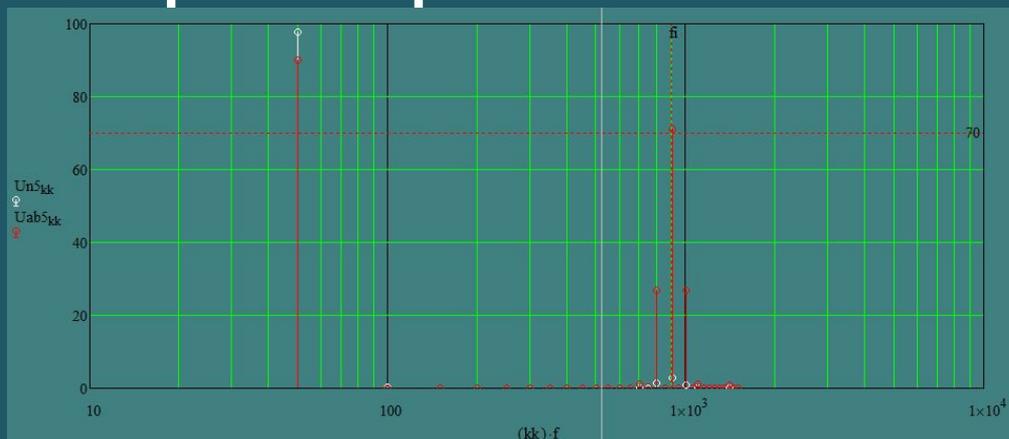
Точнее:

$$K_{\Gamma} = 0,4 \cdot \left(\frac{\omega_{\text{рез}}}{2 \cdot i \cdot \omega_m}\right)^2$$

# Расчет фильтра

Двухполярная  
двухсторонняя  
ШИМ,  $i=9$

Примем, что  $\gamma_m \approx 1$



Для двухполярной ШИМ:

$$n_{min} = 2 \cdot i - 2$$
$$f_{min} = (2 \cdot i - 2) \cdot f_m$$

Вторая составляющая (максимальная):

$$n_{min2} = 2 \cdot i$$
$$f_{min2} = 2 \cdot i \cdot f_m$$

Третья составляющая:

$$n_{min3} = 2 \cdot i + 2$$
$$f_{min3} = (2 \cdot i + 2) \cdot f_m$$

$$K_{\Gamma} \approx 0,77 \cdot \left( \frac{\omega_{рез}}{2 \cdot i \cdot \omega_m} \right)^2$$

# Расчет фильтра

Эти расчеты проведены при  $\gamma_m \approx 1$ . При Уменьшении  $\gamma_m$   $U_{ab(1)}$  пропорционально уменьшается, следовательно, Кг увеличивается примерно обратнопропорционально  $\gamma_m$ .

Оценка эквивалентной амплитуды высокочастотной составляющей тока для двухполярной ШИМ:

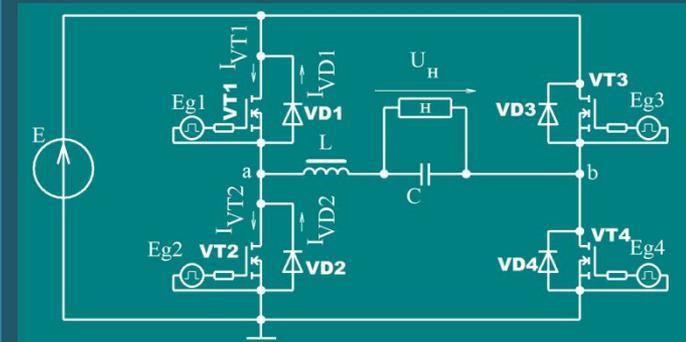
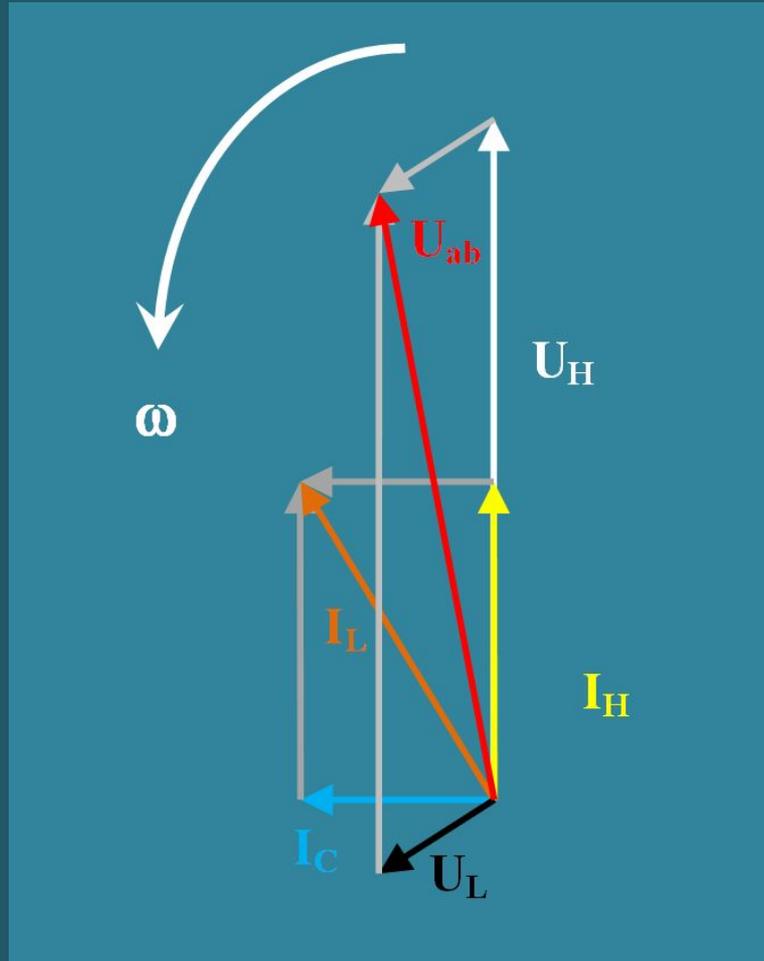
$$I_{ВЧ} \approx \frac{0,77 \cdot E}{2 \cdot i \cdot \omega_m \cdot L}$$

Оценка эквивалентной амплитуды высокочастотной составляющей тока для однополярной ШИМ:

$$I_{ВЧ} \approx \frac{0,4 \cdot E}{2 \cdot i \cdot \omega_m \cdot L}$$

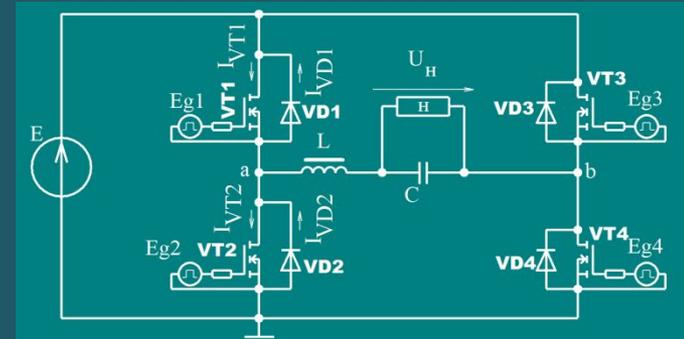
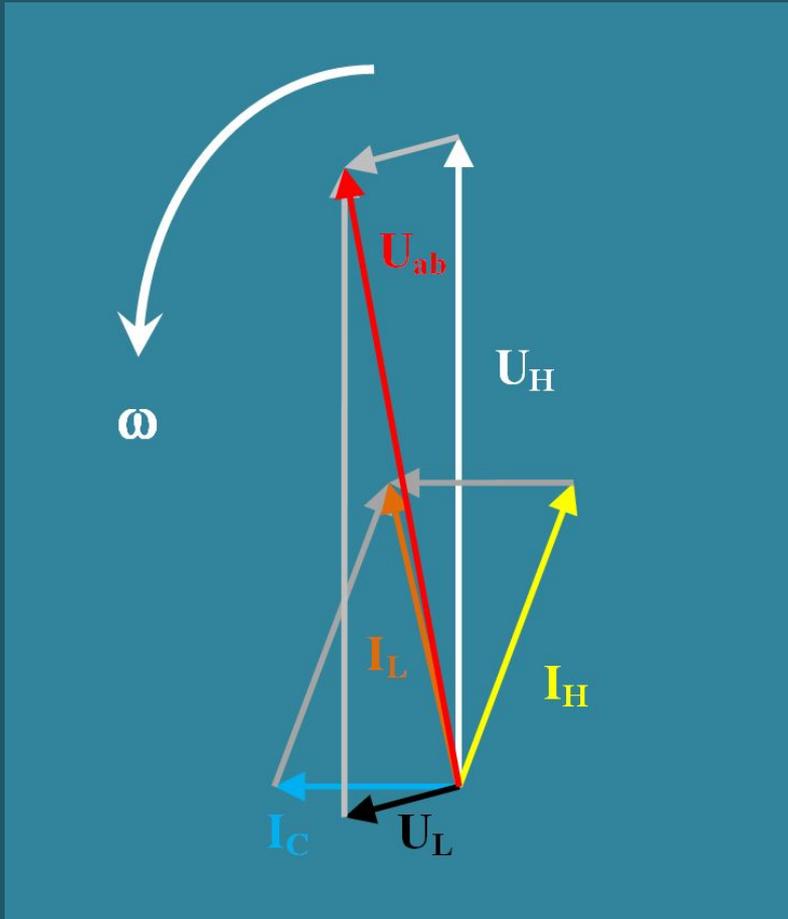
# Первые гармоники – векторные диаграммы

Чисто активная нагрузка:



# Первые гармоники – векторные диаграммы

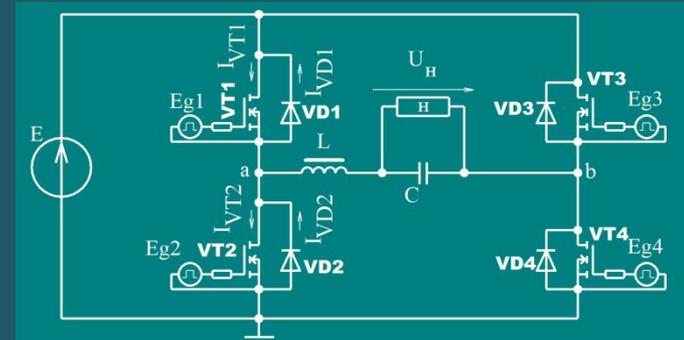
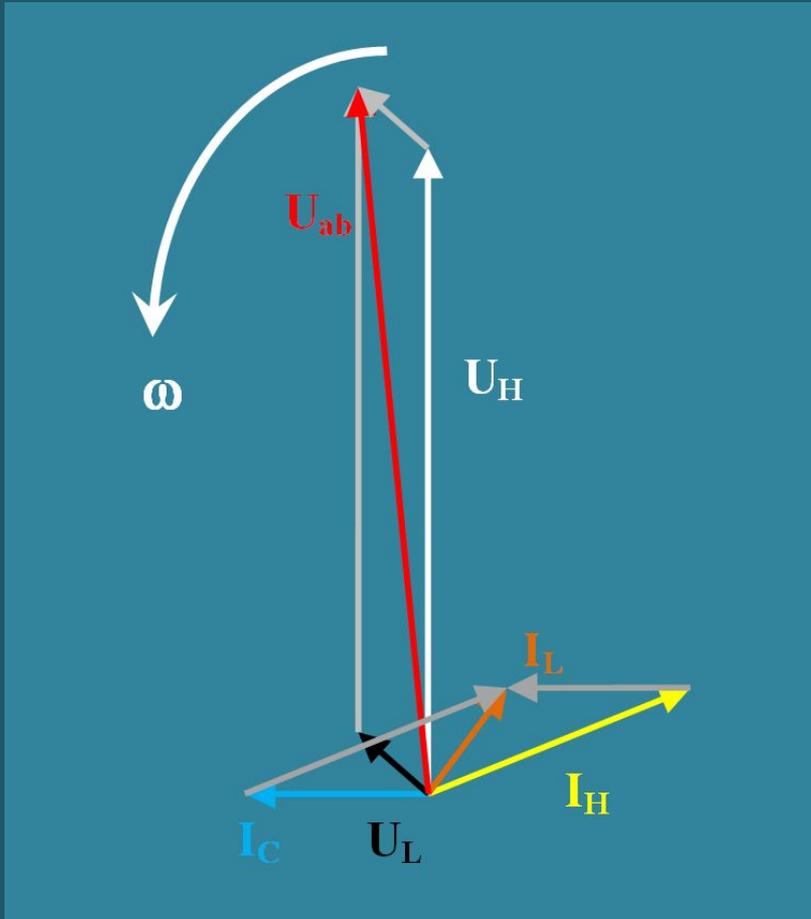
Нагрузка с реактивной составляющей индуктивного характера:



$$K\phi(j \cdot \omega) = K\phi(p) = \frac{1}{p^2 \cdot L \cdot C + p \cdot \frac{L}{Z_H(p)} + 1}$$

# Первые гармоники – векторные диаграммы

Нагрузка с большой реактивной составляющей индуктивного характера:



$$K\phi(j \cdot \omega) = K\phi(p) = \frac{1}{p^2 \cdot L \cdot C + p \cdot \frac{L}{Z_H(p)} + 1}$$