



**Моделирование циклоконвертора на базе  
фазорегулирующего трансформатора с  
круговым преобразованием.**

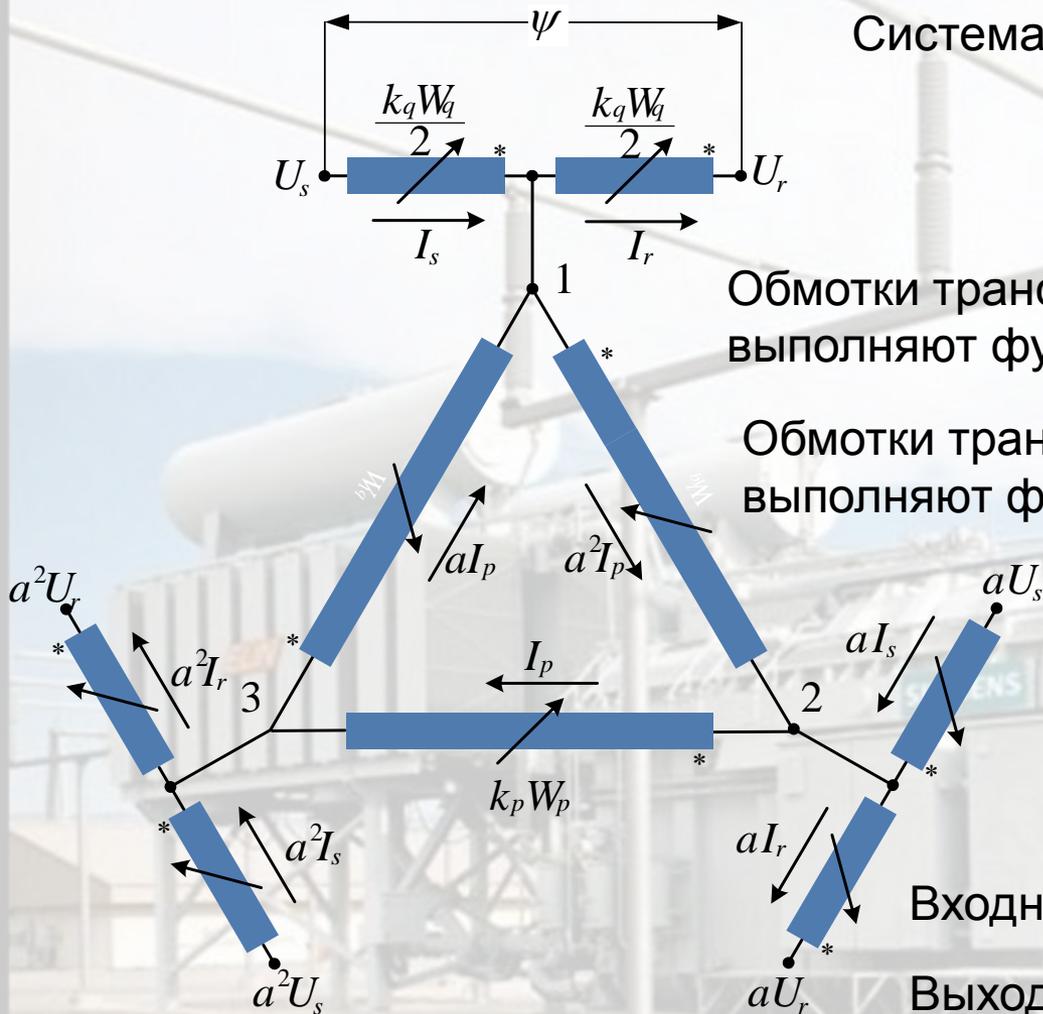
**Лаборатория  
электроэнергетического  
оборудования и силовой  
электроники**

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСТРОЙСТВА

Трехфазная система питающих напряжений:

$$U_s, aU_s, a^2U_s$$

Система выходных напряжений:  $U_r, aU_r, a^2U_r$



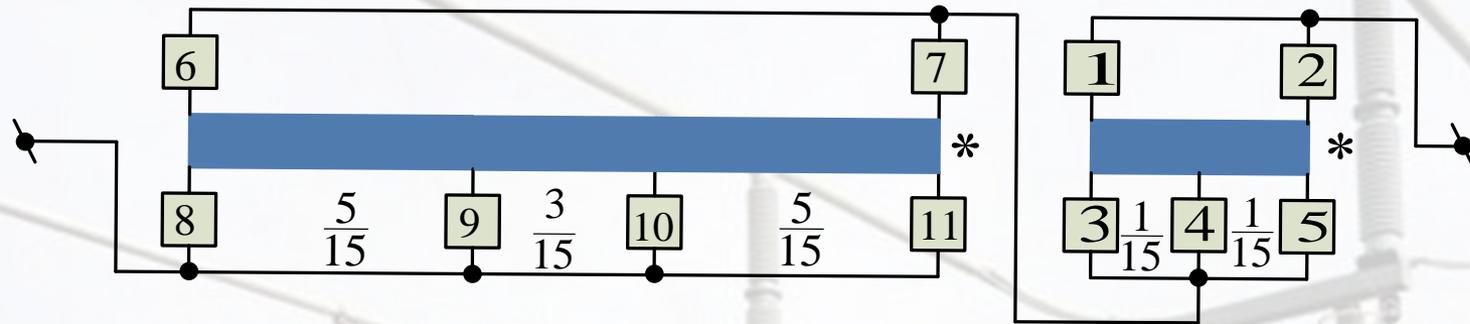
Обмотки трансформатора, отмеченные индексом  $q$  выполняют функции продольного регулирования.

Обмотки трансформатора, отмеченные индексом  $p$  выполняют функции поперечного регулирования.

Входными токами являются:  $I_s, aI_s, a^2I_s$

Выходными токами являются:  $I_r, aI_r, a^2I_r$

# РАБОЧАЯ ОБМОТКА



Переключение секций рабочих обмоток обеспечивает ступенчатое изменение угла фазового сдвига напряжения на выходе по отношению к приложенному напряжению в пределах от 0 до 360 градусов.

Состояние каждой обмотки характеризуется коэффициентами,  $k_q$  и  $k_p$  которые определяют количество задействованных секций в каждый момент времени при регулировании.

Плавность регулирования зависит от количества секций рабочей обмотки (для рассматриваемого устройства принято  $m=15$ ). При этом схема исполнения рабочей обмотки позволяет получить 30 ступеней переключения с учетом реверсирования.

# Комплексный коэффициент преобразования

С учетом изложенного, уравнение ампер-витков фазорегулирующего трансформатора имеют вид:

$$I_s \frac{k_q W_q}{2} + I_r \frac{k_q W_q}{2} = I_p k_p W_p$$

Откуда:

$$I_p = \frac{1}{2} \cdot \frac{k_q}{k_p} \cdot \frac{W_q}{W_p} (I_s + I_r)$$

с другой стороны для узла 1 схемы устройства можно записать:

$$I_s + a I_p = I_r + a^2 I_p \quad \text{или} \quad I_p = j \cdot \frac{I_s - I_r}{\sqrt{3}}$$

Принимая условие:

$$\frac{W_q}{W_p} = \frac{2}{\sqrt{3}}$$

получаем:

$$I_r = \frac{j - \frac{k_q}{k_p}}{j + \frac{k_q}{k_p}} \cdot I_s = \dot{K} I_s$$

$$\dot{K} = \frac{j - \frac{k_q}{k_p}}{j + \frac{k_q}{k_p}}$$

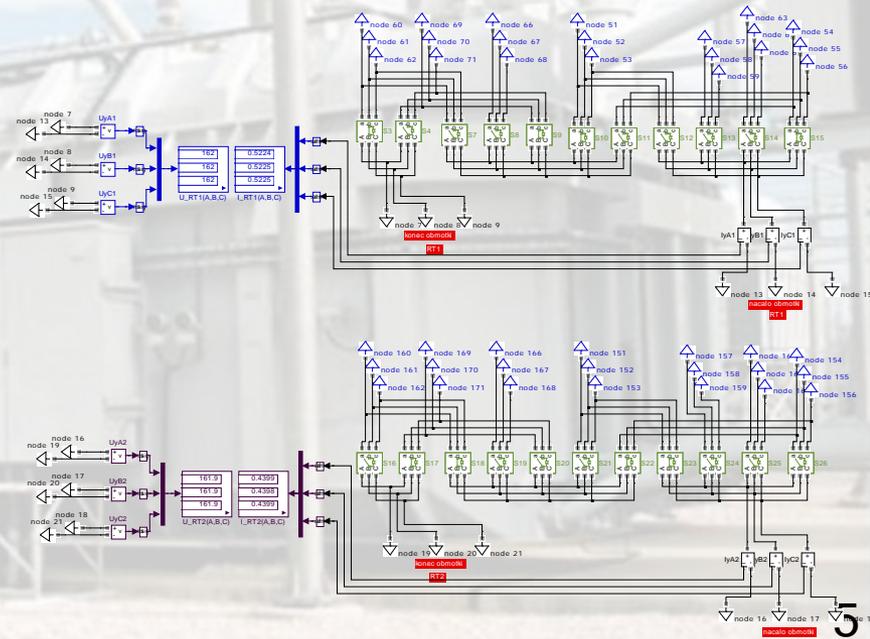
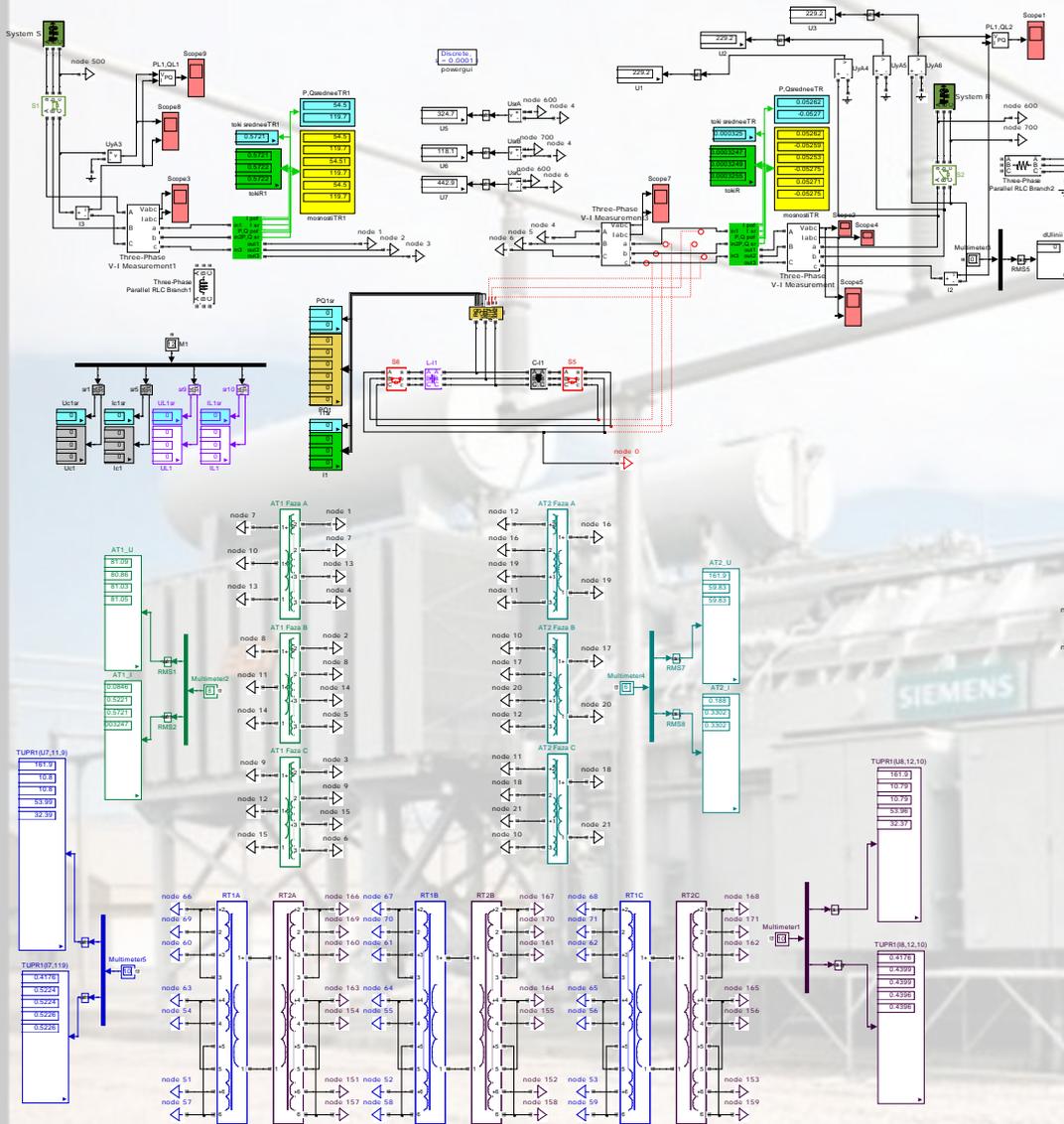
- комплексный коэффициент преобразования циклоконвертора по фазе (представляет собой окружность).

# Симулирование модели циклоконвертора

Модель построена на фазное напряжение 230В и номинальный ток 24А:

Модель содержит следующие блоки:

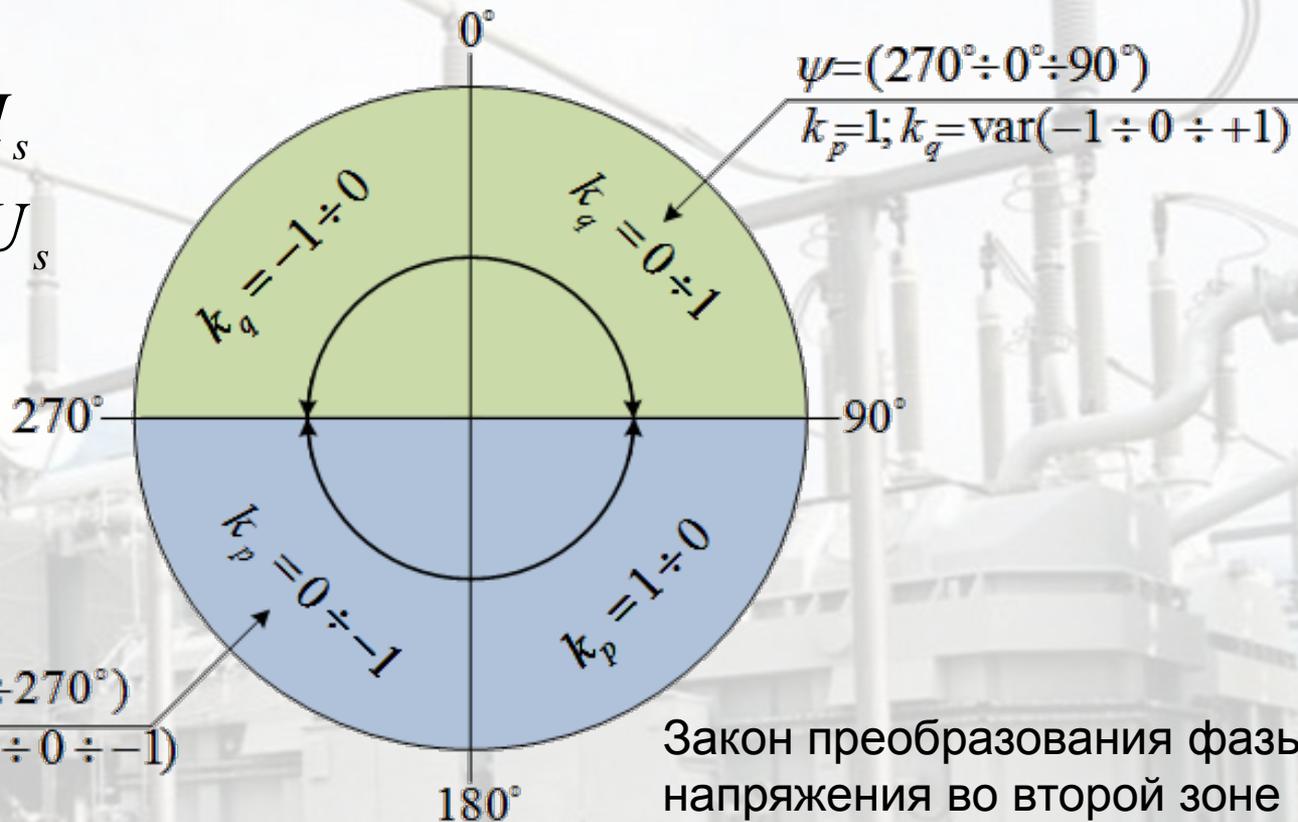
- Передающая и приемная энергосистемы,
- Трансформаторный блок,
- Блоки измерения и анализа параметров режима элементов устройства,
- Блоки коммутации с системой управления.



# Стратегия управления

Вся область регулирования фазы от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  разделена на  $n = 60$  ступеней. Закон преобразования фазы тока и напряжения в первой зоне управления

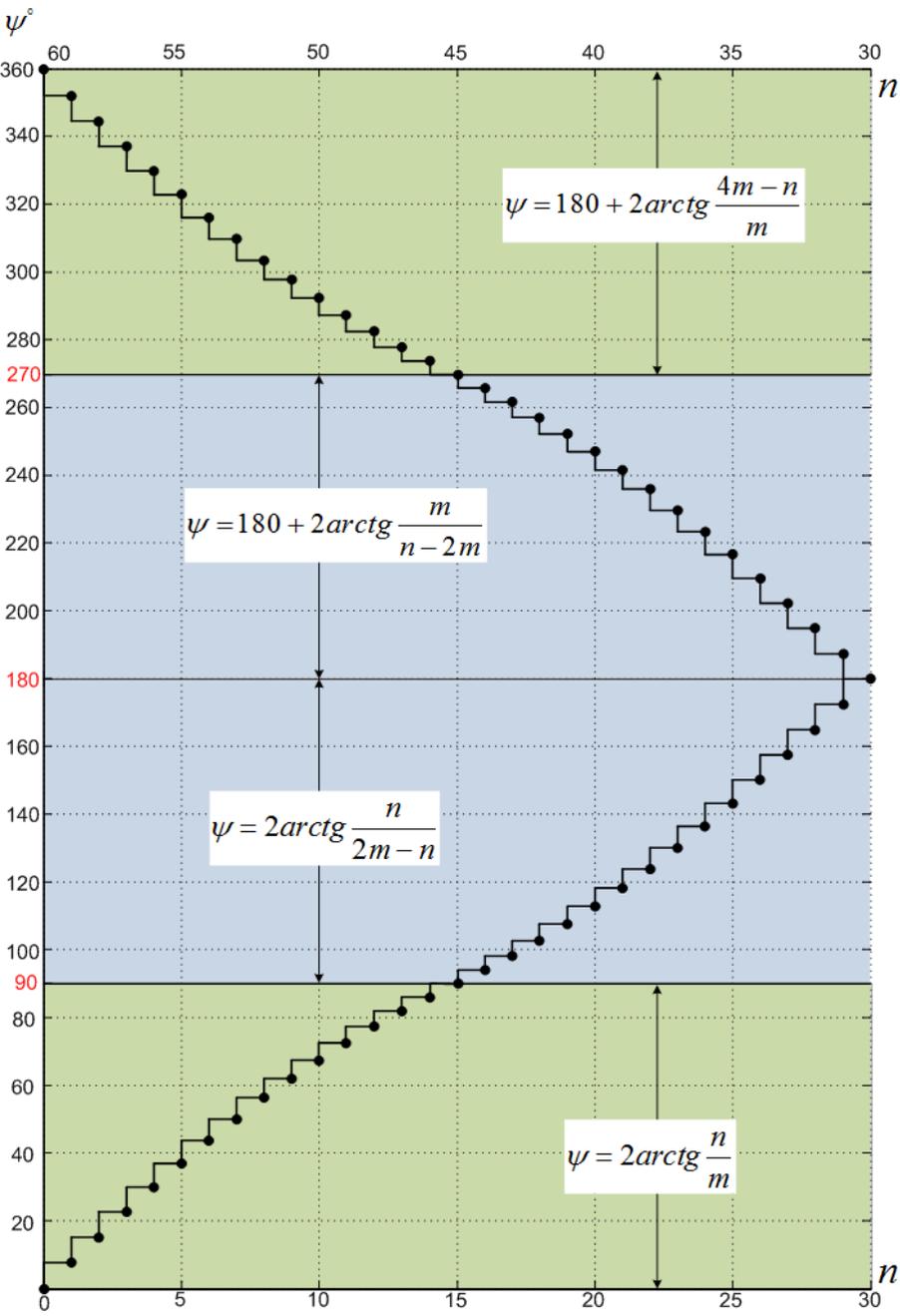
$$\left. \begin{matrix} I_r \\ U_r \end{matrix} \right\} = \frac{k_p + j}{k_p - j} \cdot \left. \begin{matrix} I_s \\ U_s \end{matrix} \right\}$$



Закон преобразования фазы тока и напряжения во второй зоне управления

$$\left. \begin{matrix} I_r \\ U_r \end{matrix} \right\} = \frac{1 + jk_q}{1 - jk_q} \cdot \left. \begin{matrix} I_s \\ U_s \end{matrix} \right\}$$

# Закон управления

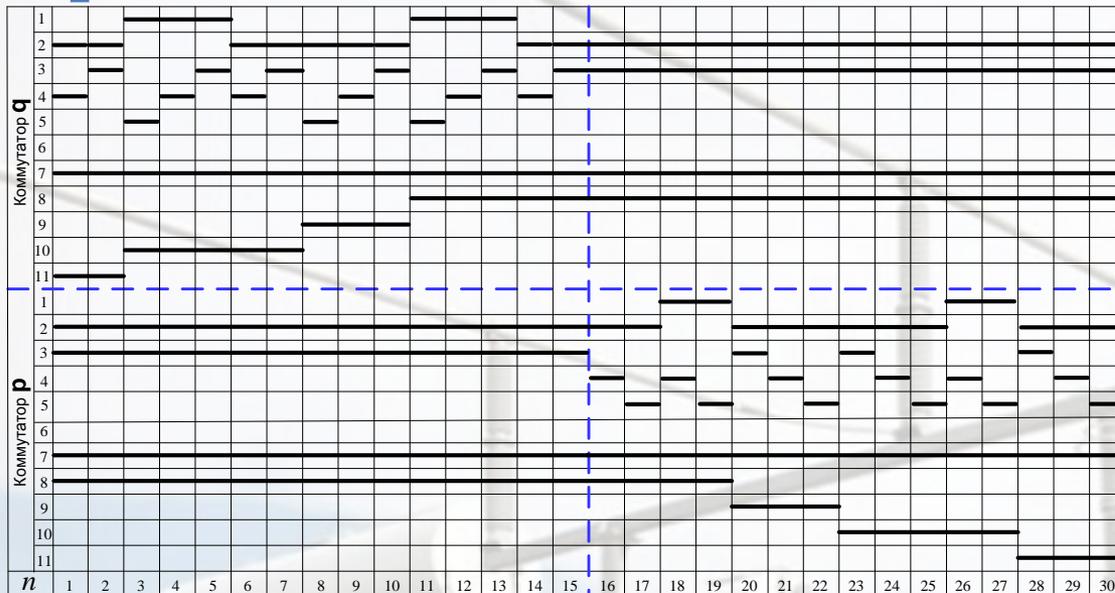


Управление режимом циклоконвертора осложняется тем фактом, что равномерное секционирование рабочих обмоток, вытекающее из технических требований к регулятору, приводит к неравномерному приращению угла фазового сдвига между входным и выходным напряжениями устройства на одну ступень (количество ступеней равно 60).

Эта особенность обусловлена нелинейностью изменения угла фазового сдвига от номера ступени (см.рис.)

Возникающие при этом искажения токов могут быть достаточно эффективно ослаблены с помощью применения технологии IPC (Interphase Power Controller).

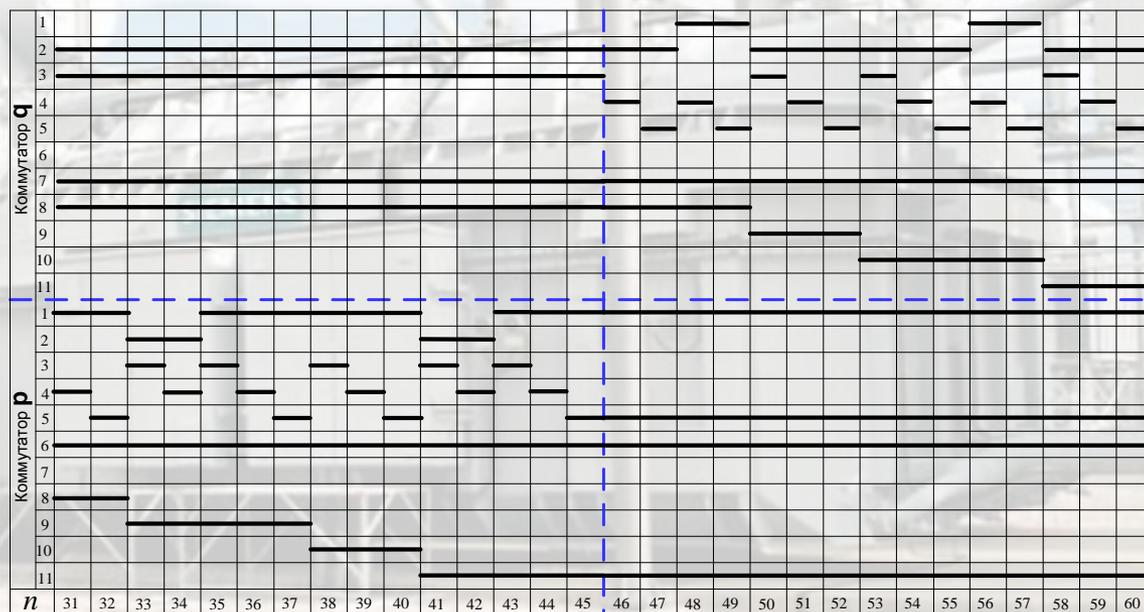
# Диаграммы закона управления



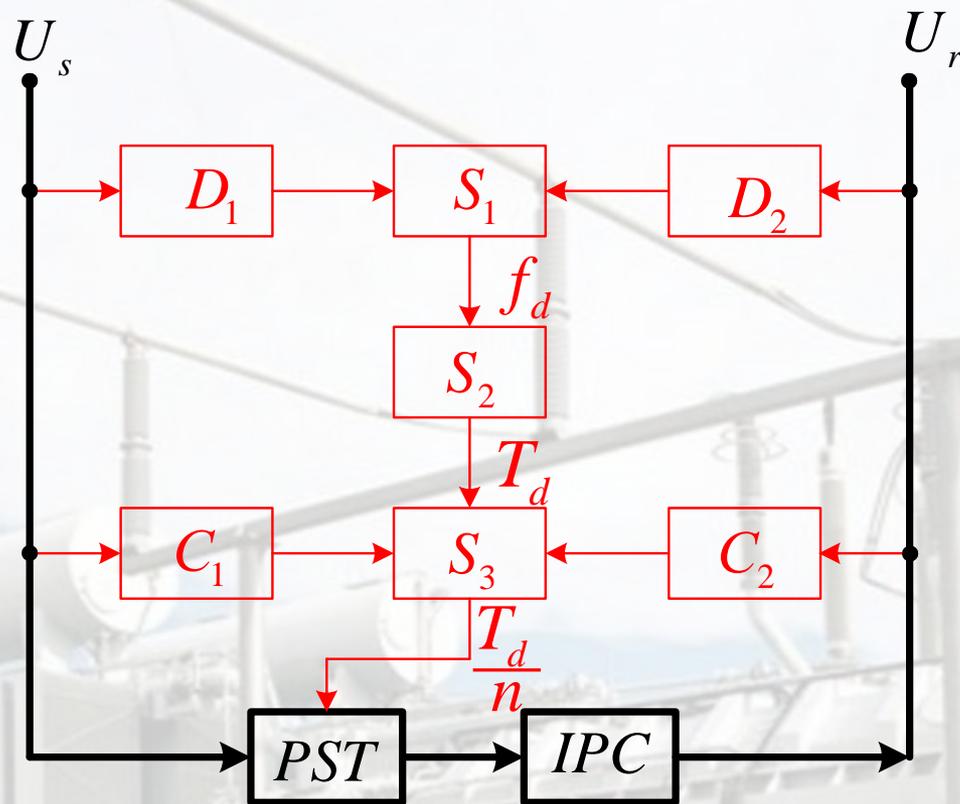
При работе на любой ступени угла во включенном состоянии находятся только 4 ключа коммутаторов ответвлений регулировочных обмоток  $q$  и  $p$ .

Диаграмма переключений при  $n = 1 \div 30$

Диаграмма переключений при  $n = 31 \div 60$

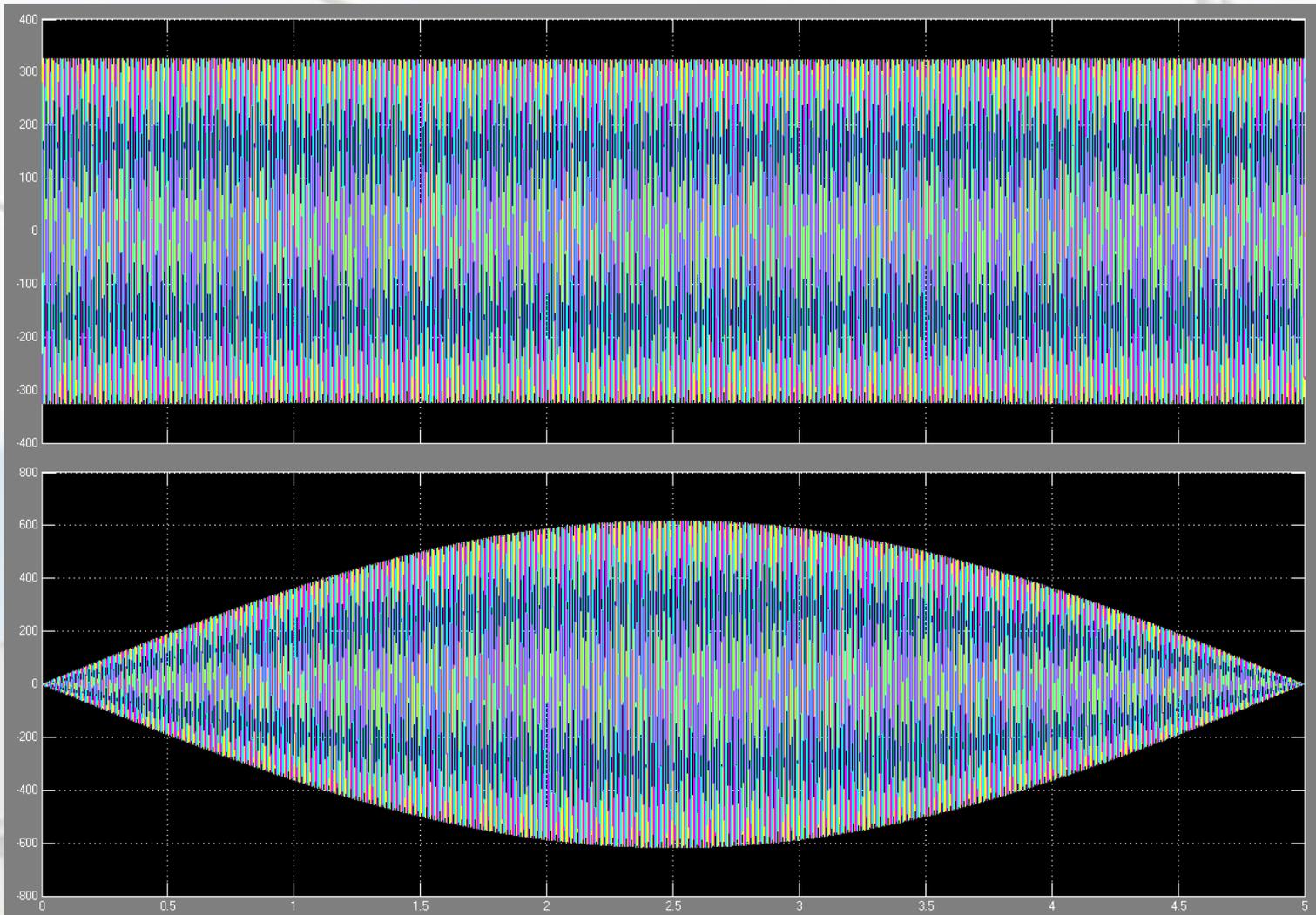


# Устройство управления режимом преобразования



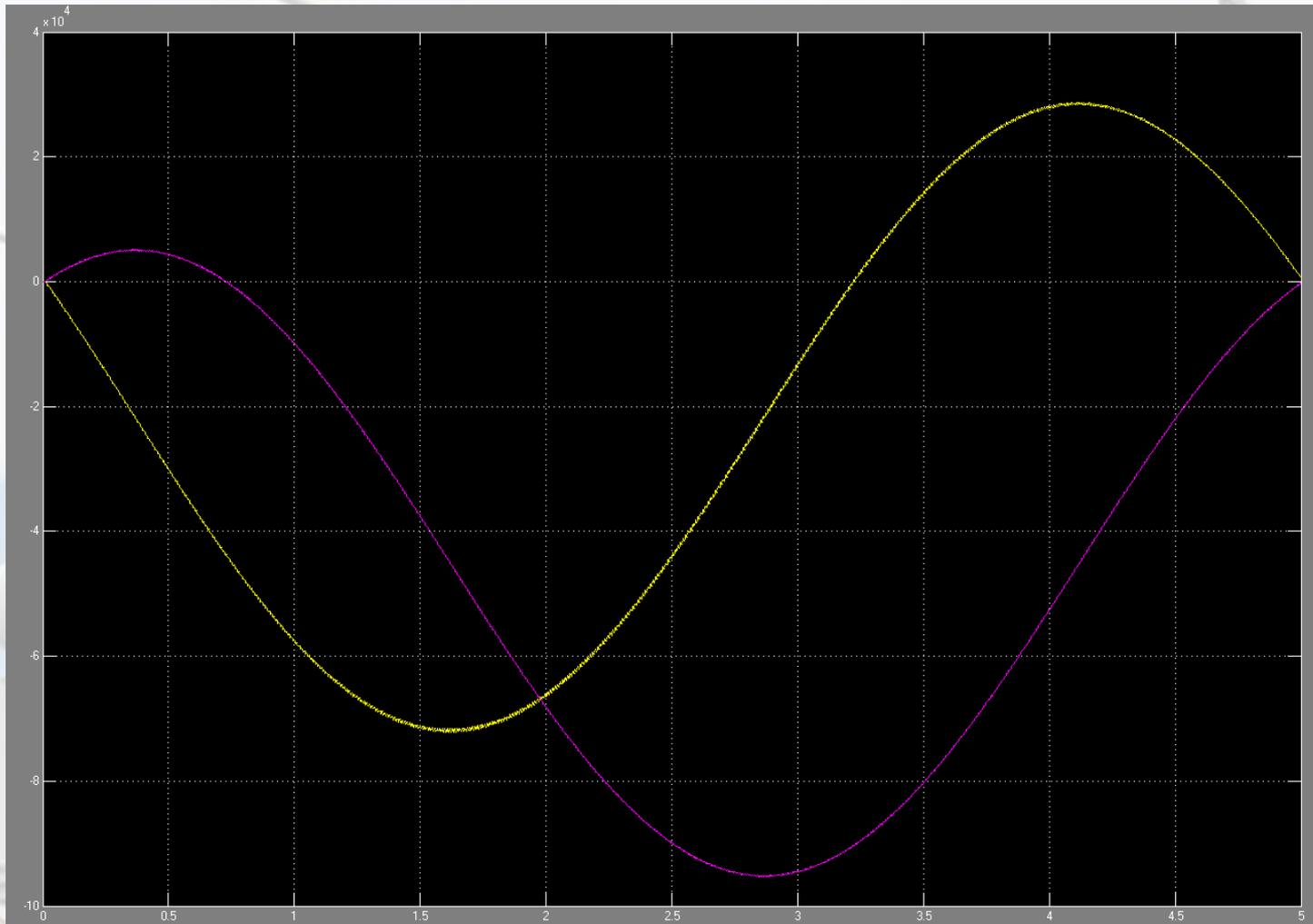
$D_1, D_2$  – детекторы перехода через ноль,  
 $S_1$  – измерение разности частот  $f_d$ ,  
 $S_2$  – вычисление периода частоты скольжения  
 $S_3$  – определение интервалов коммутации  $\frac{T_d}{n}$ ,  
 $C_1, C_2$  – контроллеры переключения ступеней.

# Результаты моделирования 50-50,2Гц



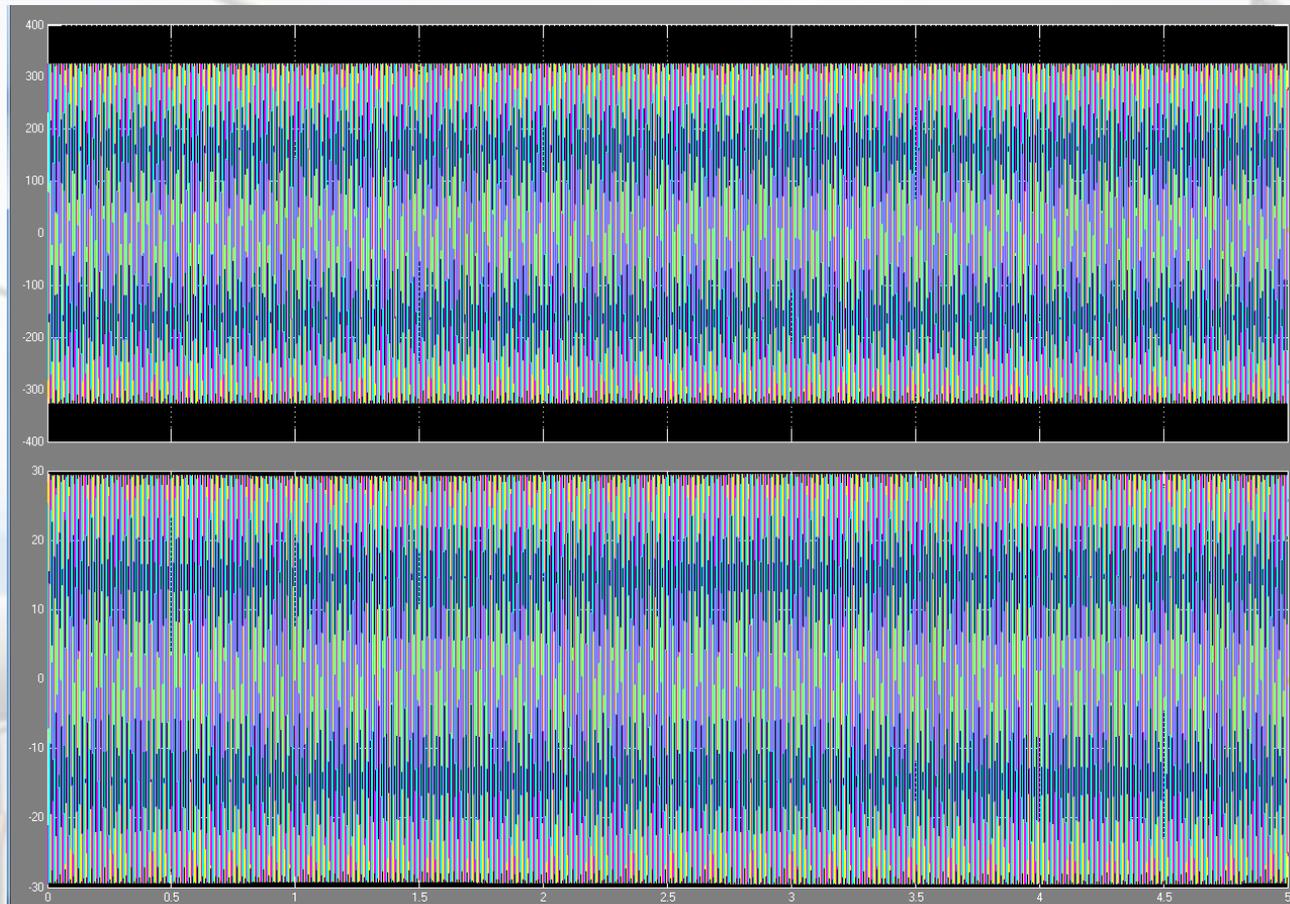
Свободные колебания напряжения и тока, имеющие место при включении на параллельную работу двух энергосистем с частотами 50 и 50,2Гц и отсутствии какого-либо управления (максимальный ток более 600А при фазовом сдвиге 180 град.

# Результаты моделирования 50-50,2Гц



Осциллограммы мощностей на шинах приемной системы при заданных условиях моделирования. Колебания обменной мощности происходят с частотой скольжения. Максимальные броски активной и реактивной мощности достигают соответственно:  $7 \cdot 10^4 \text{ Вт}$  и  $9,5 \cdot 10^4 \text{ Вар}$

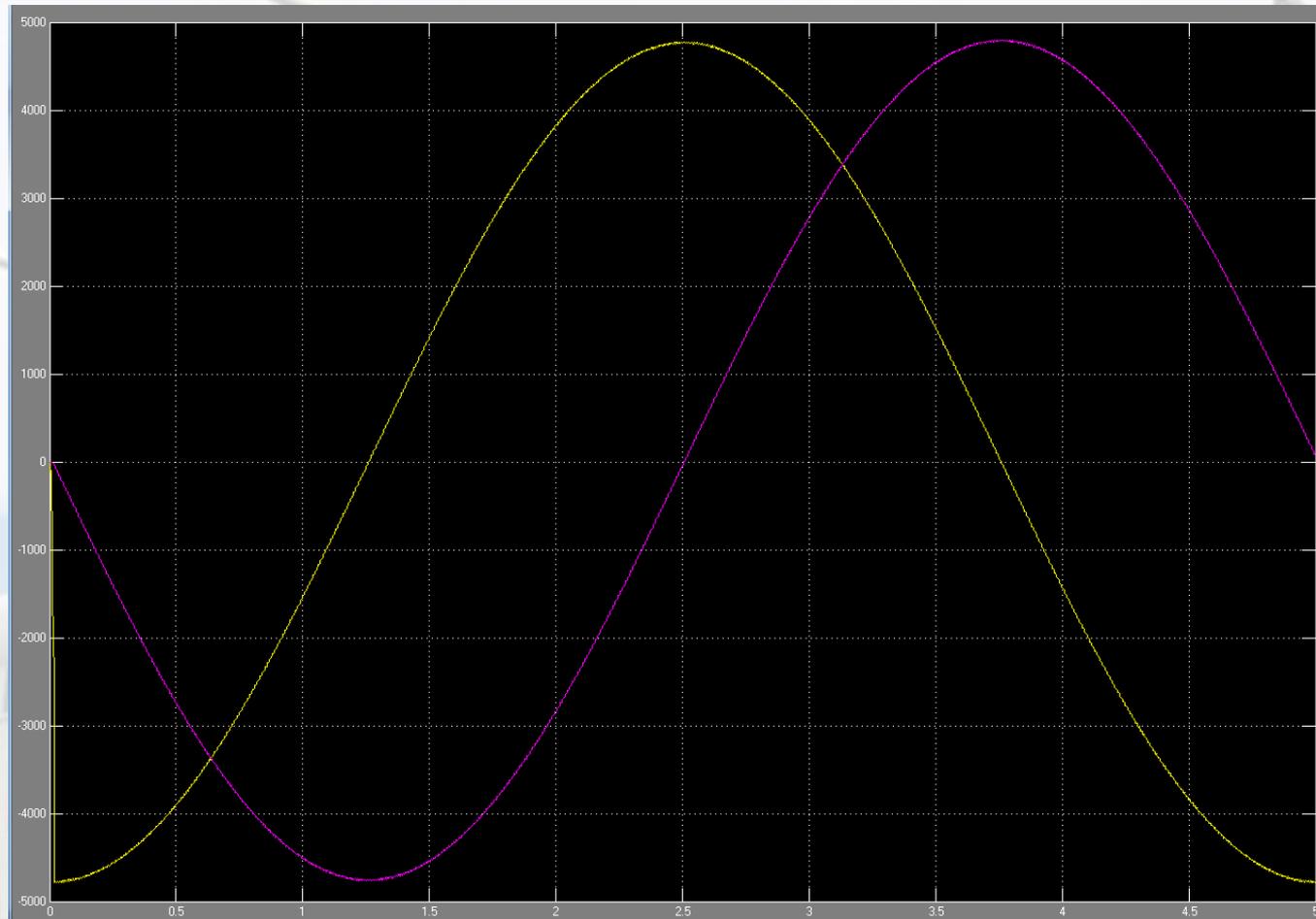
# Результаты моделирования 50-50,2Гц



Использование простейшей схемы IPC предложенной Карлом Штеймцом.

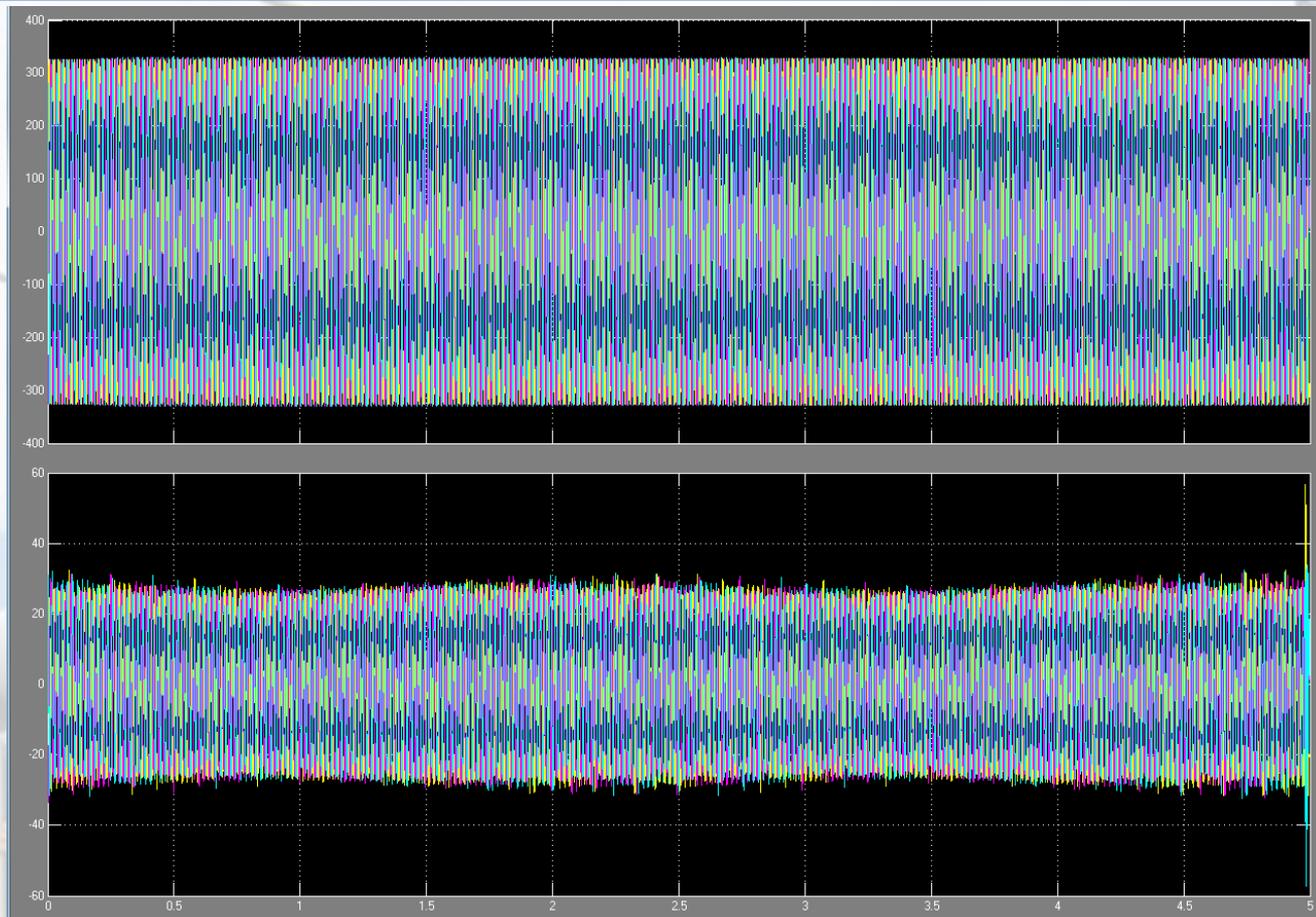
Расчетный ток IPC выбран равным номинальному току фазорегулирующего трансформатора. Как видно из рассмотрения осциллограмм, применение IPC приводит к ограничению обменных токов до номинального значения (30А в амплитуде).

# Результаты моделирования 50-50,2Гц



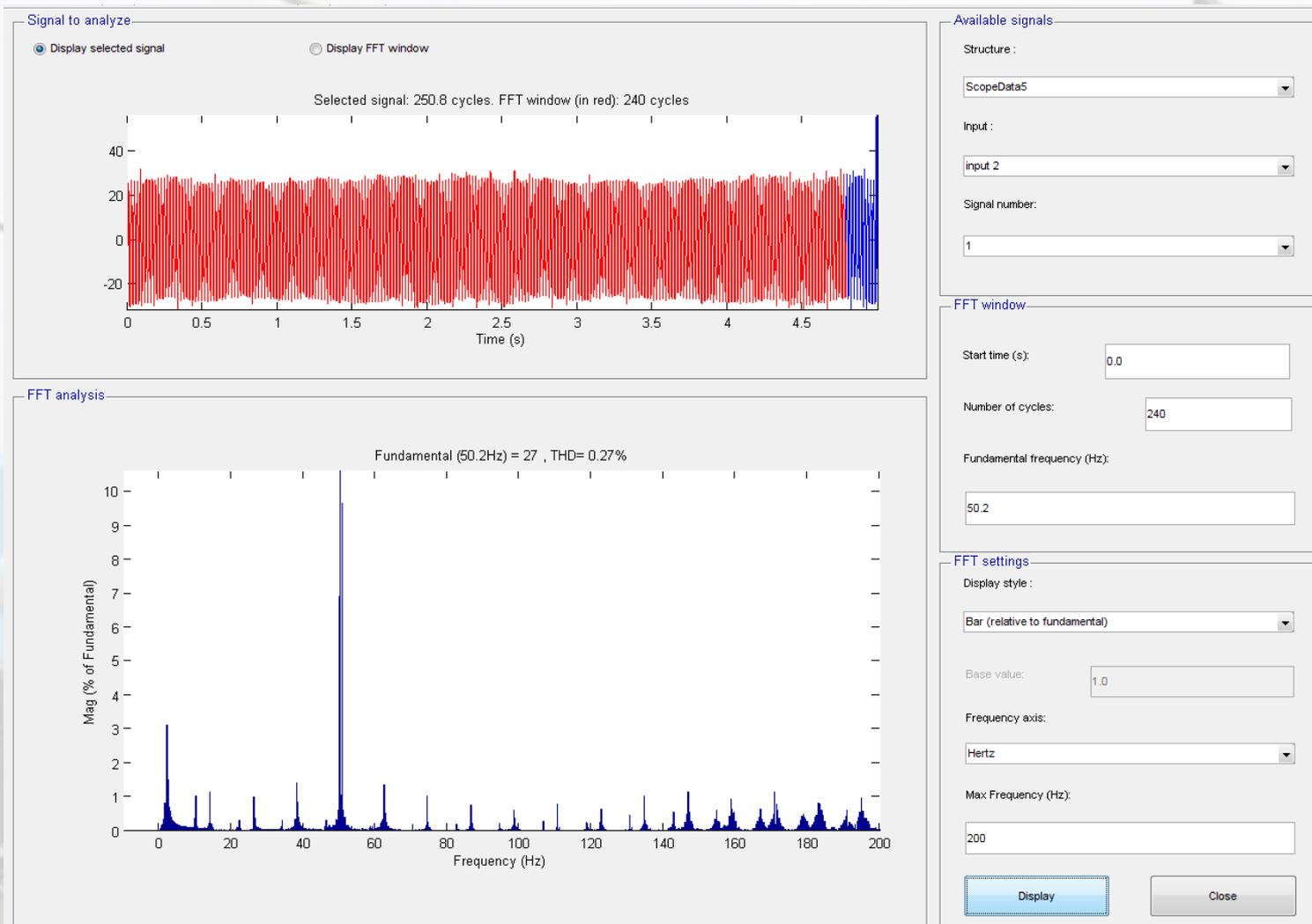
Осциллограммы мощностей, анализ которых показывает симметричность значений относительно временной оси. Максимальные значения обменной мощности составляют 4800Вт, что существенно ниже варианта без применения ИРС.

# Результаты моделирования 50-50,2Гц



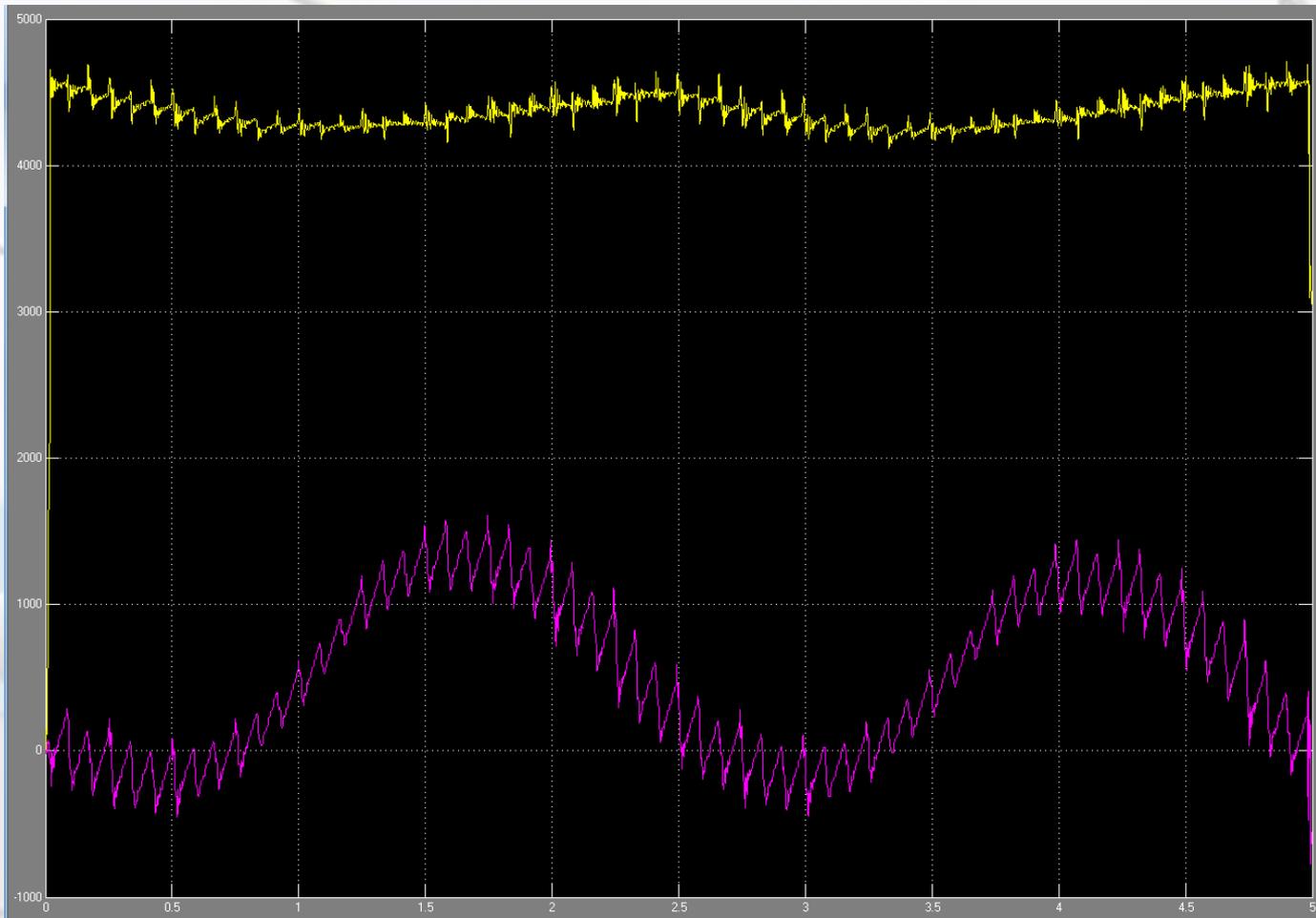
Осциллограммы тока и напряжения при управлении режимом обмена мощностью в соответствии с принятой стратегией управлени и включением ИРС. Видно, что обмен мощностью обеспечивается при номинальных значениях параметров режима. Незначительная модуляция токов нагрузки обусловлена нелинейностью зависимости угла фазового сдвига в зависимости от номера ступени.

# Результаты моделирования 50-50,2Гц



Коэффициент нелинейного искажения токов нагрузки (THD) составляет 0,27% что существенно ниже предельно допустимого по ПТЭ уровня в 2%.

# Результаты моделирования



Характер изменения передаваемой мощности в условиях принудительного управления. Степень колебательности по активной мощности составляет около 5%, что говорит о достаточно высокой стабильности при различной частоте на передающей и приемной системах.

# Анализ THD по току (стандарт IEEE 519)

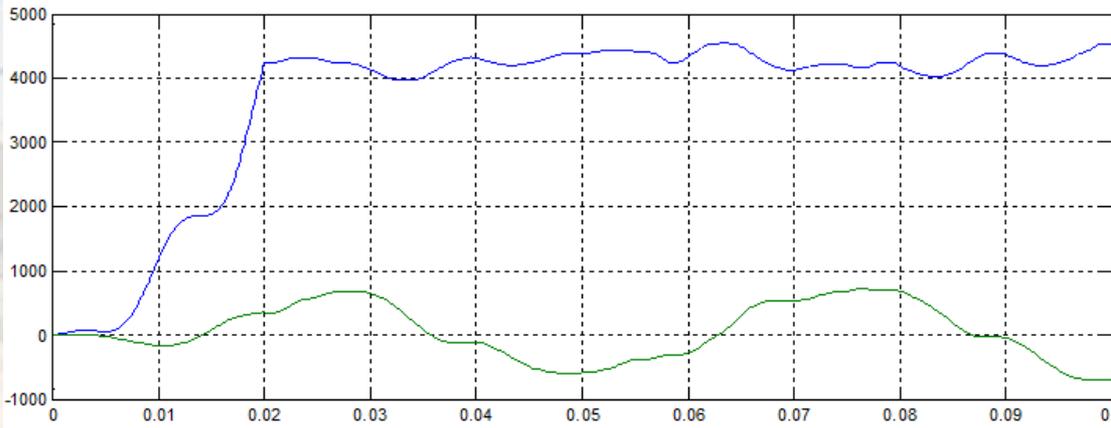
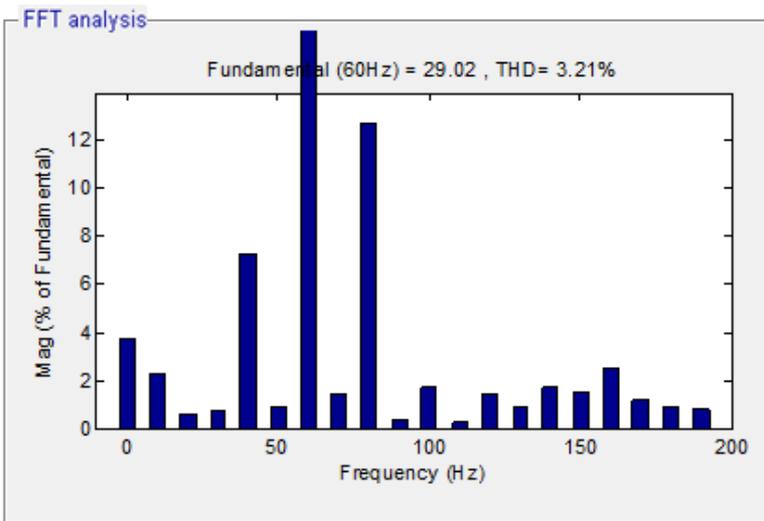
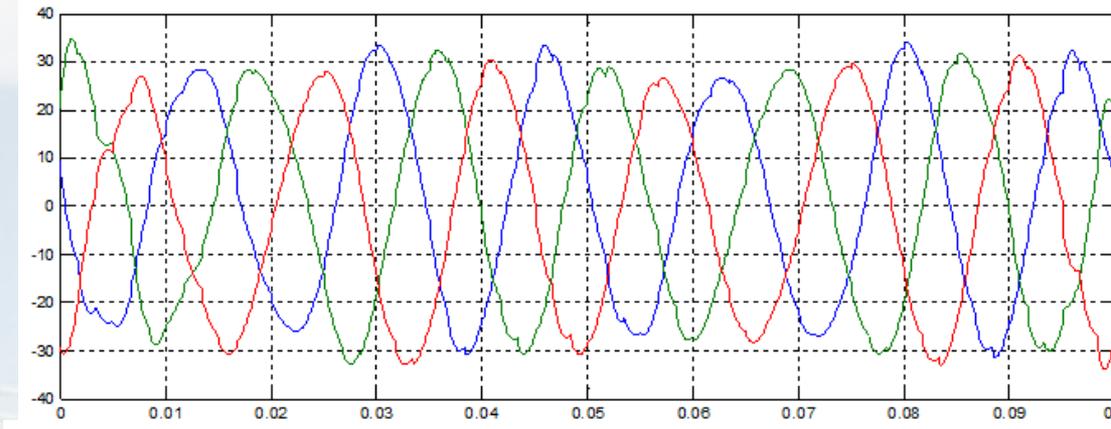
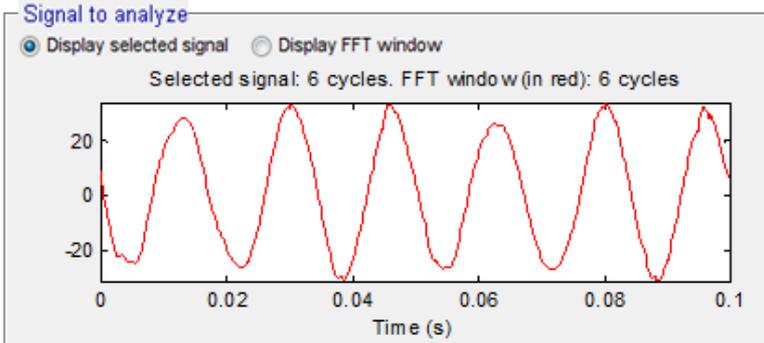
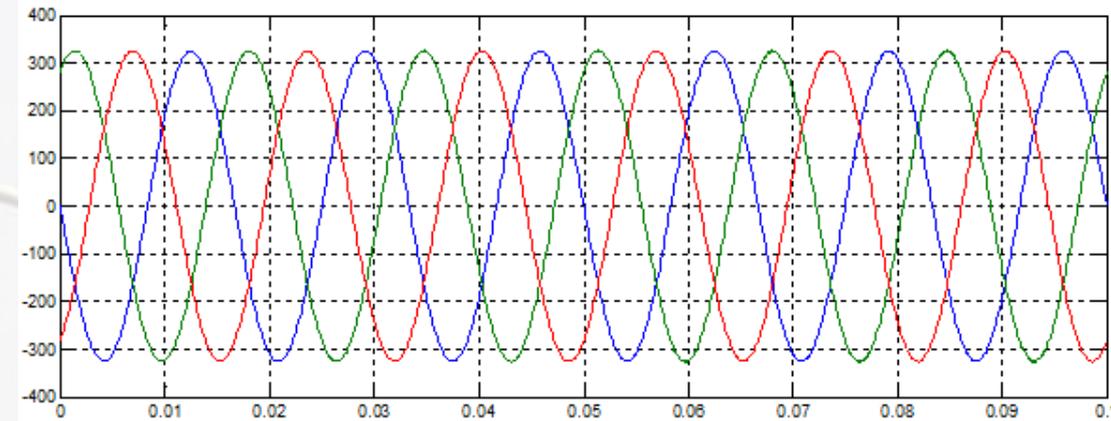
## Требования стандарта IEEE 519

$I_{sc}/I_L$	Номера нечетных гармоник					Максимальный общий уровень, %
	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

## THD при согласовании на различных частотах

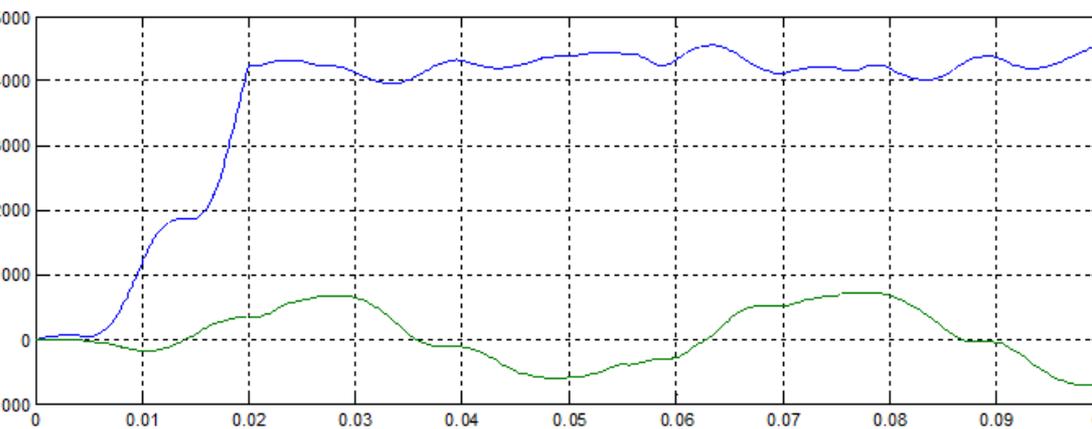
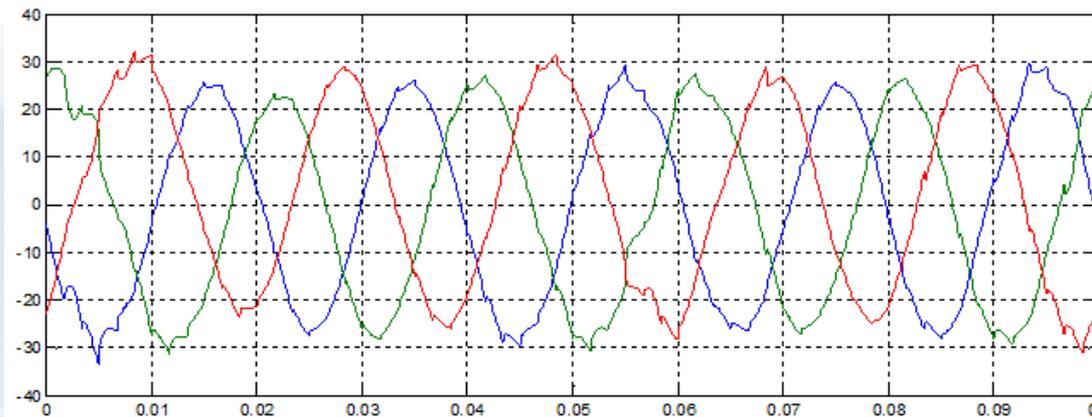
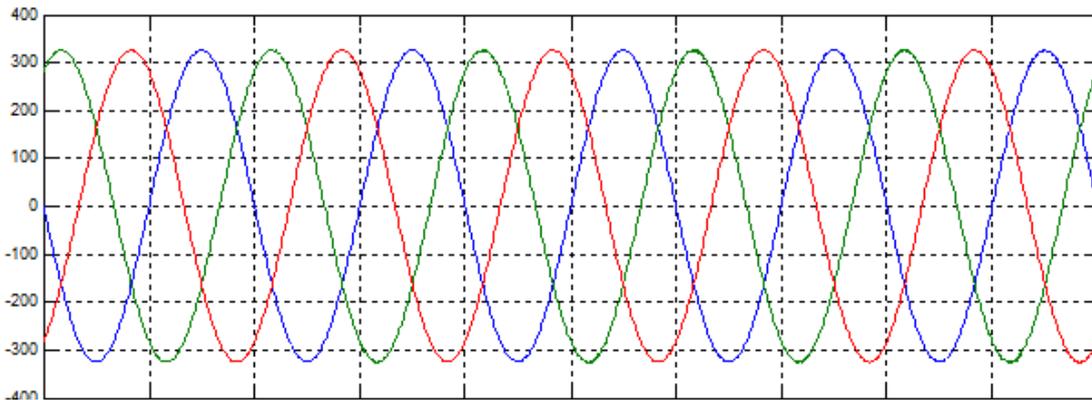
Частота передающей системы, Гц	Частота приемной системы, Гц	Длительность ступени, с	Длительность расчета на 360°, с	THD тока на приемной системе, %
50(60)	49(59)	0,01666	1	1,32(5,11)
50(60)	49,1(59,1)	0,01852	1,111	1,07(0,47)
50(60)	49,2(59,2)	0,02083	1,25	11,2(0,86)
50(60)	49,3(59,3)	0,0238	1,428	0,63(0,72)
50(60)	49,4(59,4)	0,0277	1,666	0,96(0,73)
50(60)	49,5(59,5)	0,0333	2	0,36(2,74)
50(60)	49,6(59,6)	0,0416	2,5	0,4(1,59)
50(60)	49,7(59,7)	0,0555	3,333	0,46(0,21)
50(60)	49,8(59,8)	0,0833	5	0,14(1,07)
50(60)	49,9(59,9)	0,1666	10	0,09(0,38)

# Результаты моделирования 50-60Гц



Мгновенные значения параметров режима и THD при передаче мощности из системы с частотой 50Гц в систему с частотой 60Гц без мер сглаживания

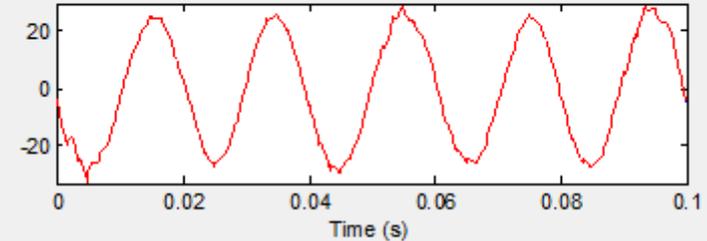
# Результаты моделирования 60-50Гц



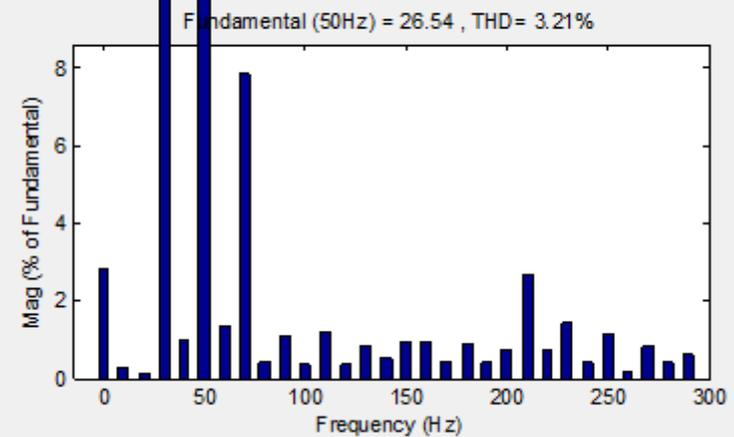
Signal to analyze

Display selected signal  Display FFT window

Selected signal: 5 cycles. FFT window (in red): 5 cycles



FFT analysis



Мгновенные значения параметров режима и THD при передаче мощности из системы с частотой 60Гц в систему с частотой 50Гц без мер сглаживания



**Mulțumesc pentru atenție!**