

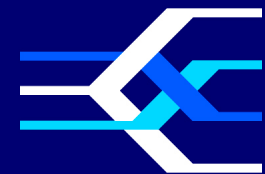
Технологии управления режимами работы распределительных сетей с несимметричными нагрузками для снижения потерь и улучшения показателей качества электрической энергии

Асташев Михаил Георгиевич

Д.т.н., доцент, заведующий кафедрой промышленной электроники
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

2023 / 5–6 июля

Москва / Конгресс-центр ЦМТ



VIII Международная
научно-техническая конференция

«Развитие и повышение надежности
распределительных электрических сетей»

ОРГАНИЗАТОРЫ



Задачи управления режимами работы распределительных сетей с несимметричными нагрузками

Причины возникновения несимметричных режимов работы сети:

- Изменение во времени напряжений в узлах распределительной сети;
- Неравномерное распределение нагрузок по фазам распределительной сети

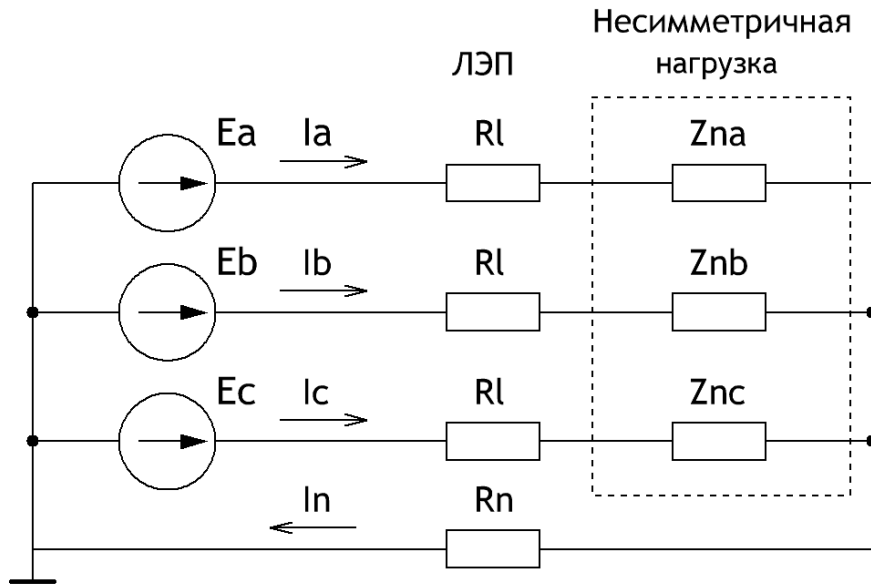
Цели устранения несимметричных режимов работы сети:

- Уменьшение потерь в линиях электропередачи распределительной сети;
- Обеспечение нормированных показателей качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ 32144-2013;
- Увеличение пропускной способности распределительной сети;
- Повышение надежности работы электротехнического оборудования

Используемые технологии:

Применение технологий поперечного регулирования режимов работы распределительных сетей, обеспечивающих симметрирование режимов при подключении любой несимметричной нагрузки и ее изменении во времени

Представление несимметричных режимов работы 3-х фазных сетей



Четырехпроводная линия электропередачи с несимметричной нагрузкой

Показатели качества электроэнергии

$$\Delta U_{-}\% = \frac{U_{\text{НОМ}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{НОМ}}} 100 \quad \Delta U_{+}\% = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} 100$$

Норма отклонения напряжения: **10%**

$$K_{2U}\% = \frac{U_2}{U_1} 100 \quad K_{0U}\% = \frac{U_0}{U_1} 100$$

Норма коэффициентов несимметрии: **2%**

Метод симметричных составляющих:

Симметричные составляющие токов сети:

$$i_1 = \frac{1}{3} (i_a + a i_b + a^2 i_c)$$

$$i_2 = \frac{1}{3} (i_a + a^2 i_b + a i_c)$$

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) = \frac{I_n}{3}$$

При симметричной нагрузке:

$$i_0 = 0$$

Энергетическое представление режимов работы 3-фазных сетей:

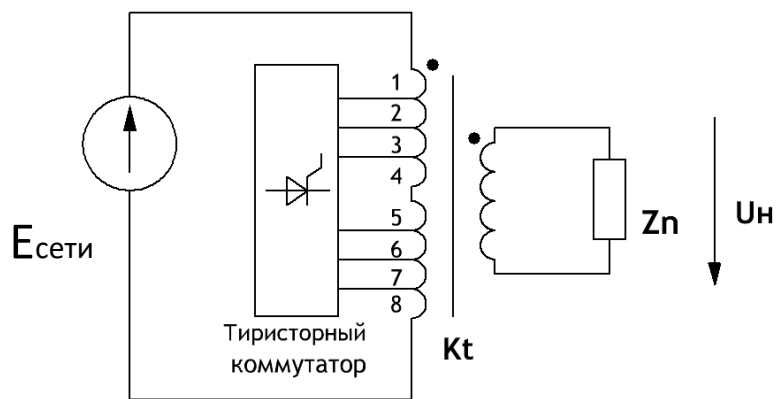
Полная мощность трехфазной сети:

$$\sum_{i=1}^3 \tilde{S}_i = 3 |E_a| \bar{I}_1$$

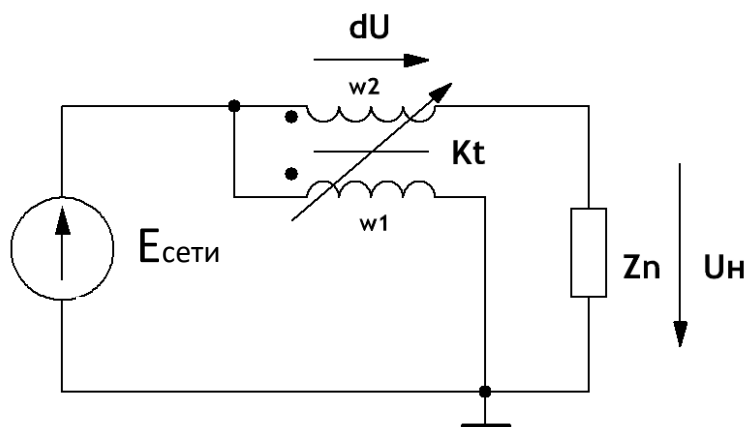
Потери энергии в сети:

$$\sum P_{\text{потерь}} = 3(R_l + 3R_n) |i_0|^2 + 3R_l |i_2|^2 + 3R_l |i_1|^2$$

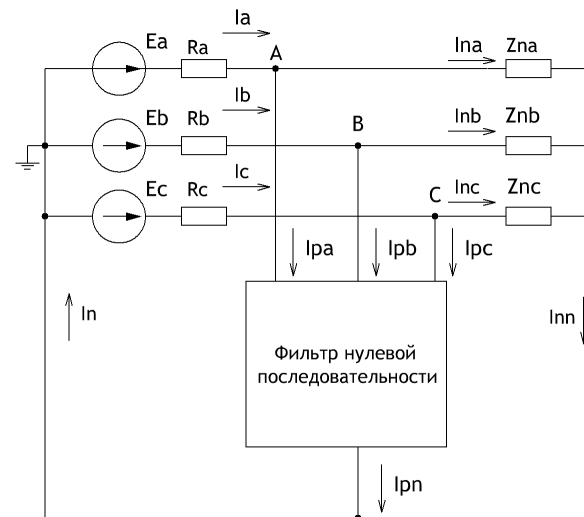
Технологии и устройства управления режимами работы линий электропередачи



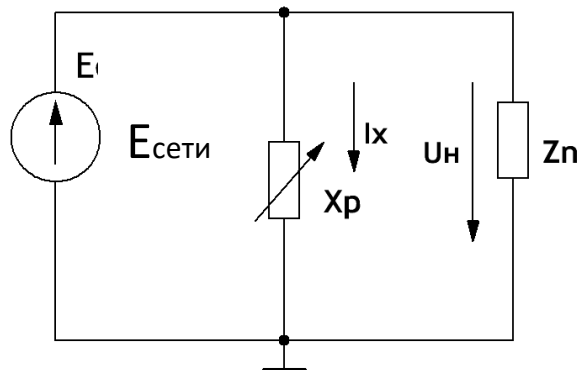
Раздельное управление напряжением в фазах ЛЭП – ПУРНТ



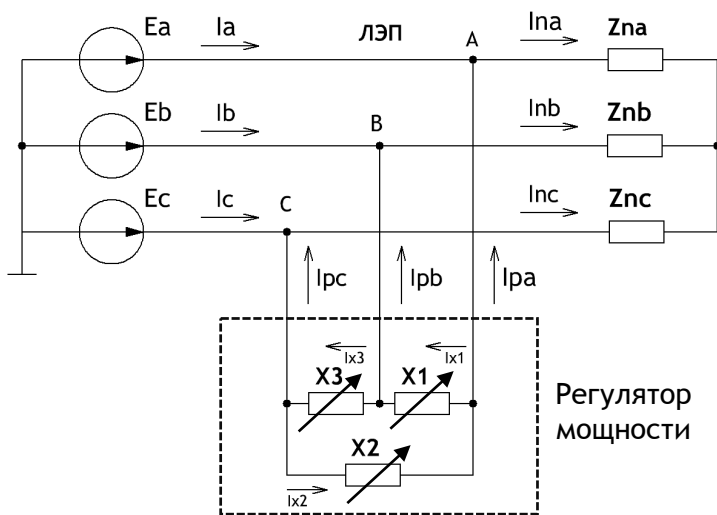
Раздельное управление напряжением в фазах ЛЭП – бустеры



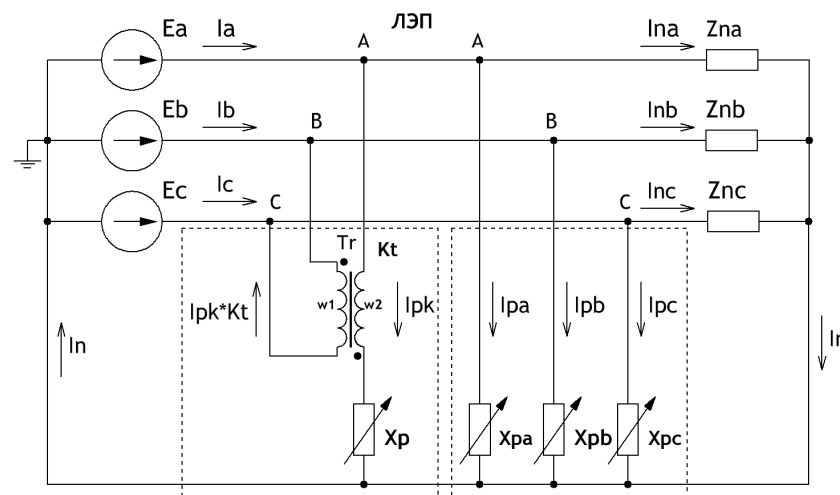
Компенсация токов нулевой последовательности - балансеры



Управление реактивной мощностью – компенсаторы реактивной мощности

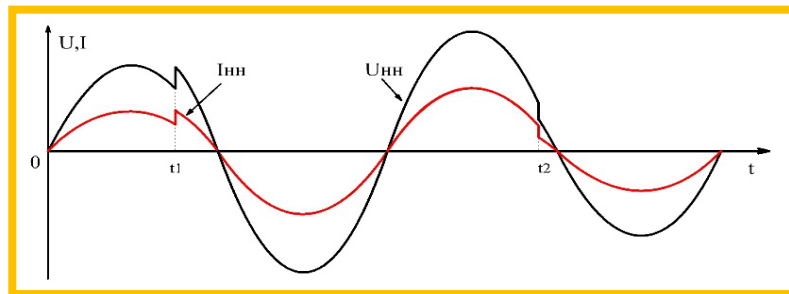
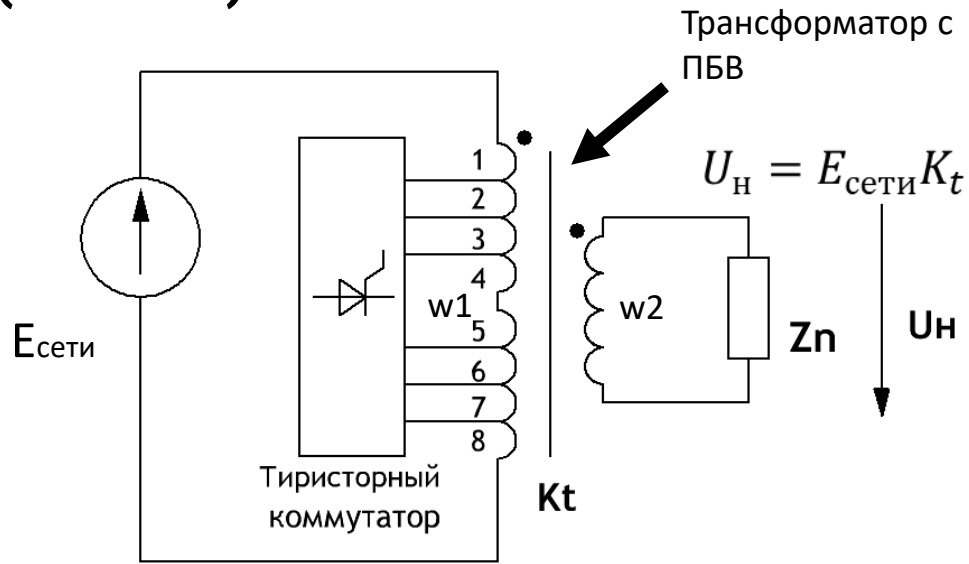


Обмен мощностями между фазами ЛЭП – регуляторы мощности



Симметрирование режимов работы с компенсацией реактивной мощности ЛЭП – универсальные регуляторы мощности

Полупроводниковые устройства регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой (ПУРНТ)



Момент времени t_1 – увеличение напряжения;
Момент времени t_2 – уменьшение напряжения

Регулирование тока и напряжения на стороне НН $U_{\text{н}}$ ПУРНТ



Опытные образцы ПУРНТ

Основные узлы ПУРНТ:

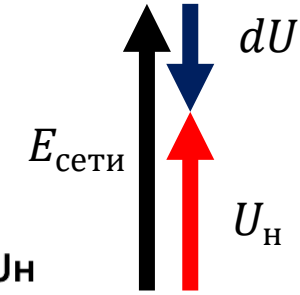
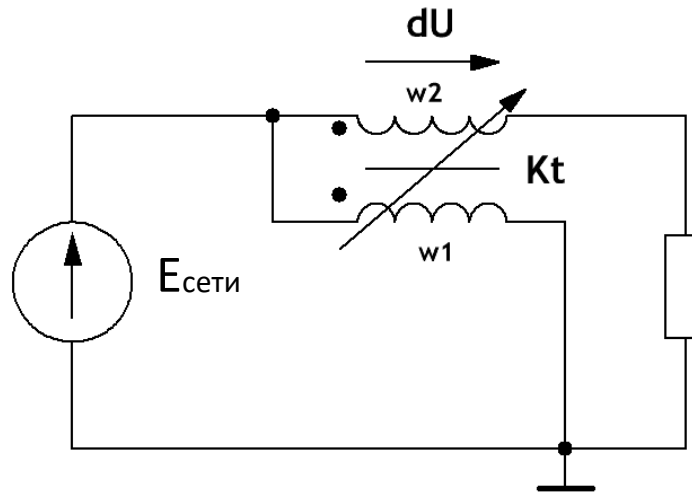
- Центральный модуль СУ; модуль обмена данными с АСУ ТП.
- Локальные модули СУ фаз А, В, С; тиристорный коммутатор; комплект датчиков тока и напряжения.
- Вводы 10 кВ.

Особенности ПУРНТ:

- Реализация различных алгоритмов управления напряжением.
- Отечественная компонентная база;
- Реализация дистанционного управления с МЭК 61850

Бустеры

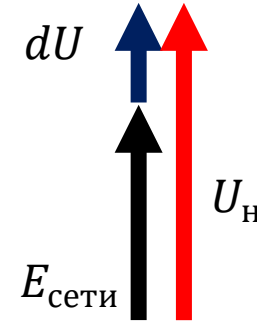
Принцип регулирования напряжения на нагрузке



Согласное включение трансформатора

$$U_H = E_{\text{сети}} \pm dU$$

$$dU = E_{\text{сети}} K_t$$

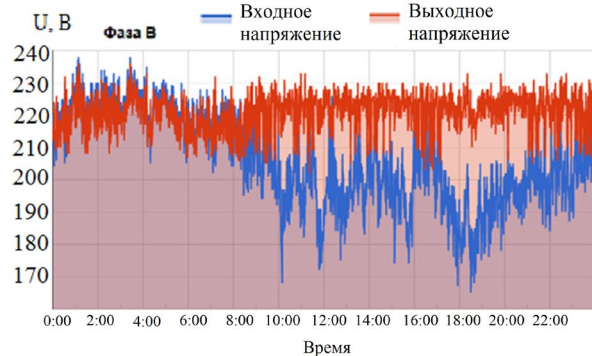


Встречное включение трансформатора

Подключение бустера к фазе распределительной сети



а)



б)

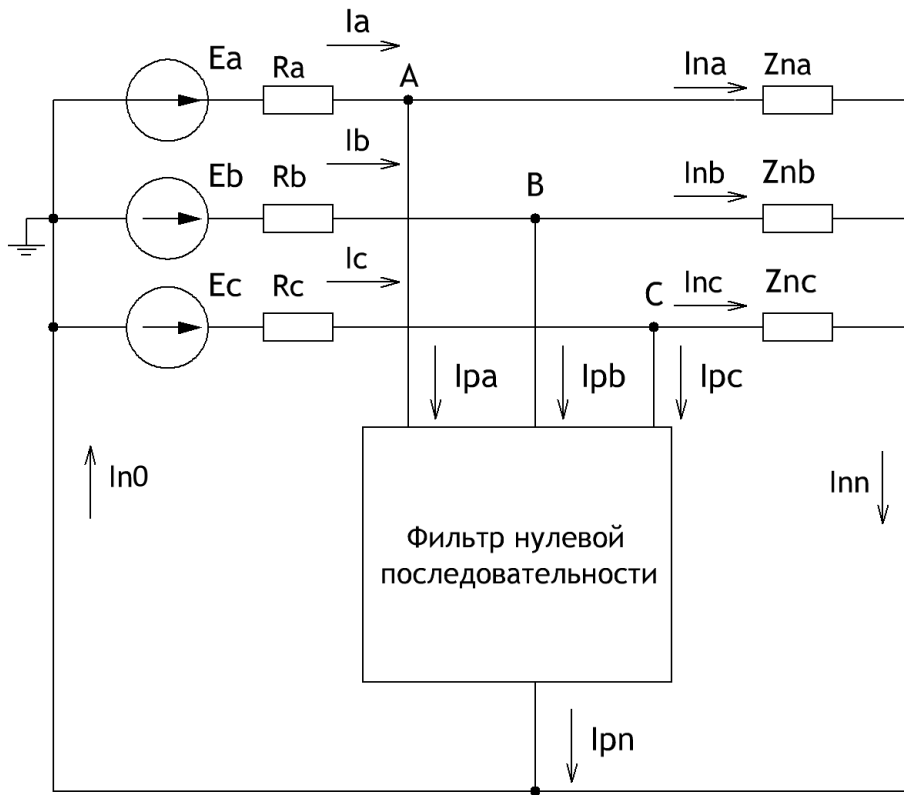
ТТРН-Б-50/0,4-3 в месте установки (а), работа системы дистанционного мониторинга (б)



Опытно-промышленные образцы Бустеров 50-100 кВт

Параметры трехфазного бустера 50 кВт	
Входное напряжение	220/380 В, 50 Гц
Установленная мощность	22,5 кВт
Фазный ток нагрузки	75 А
Диапазон регулирования напряжения	+40% E_сети
Количество ступеней регулирования	6
Быстродействие	10 мс
Дистанционный мониторинг и управление	RS-485, GSM

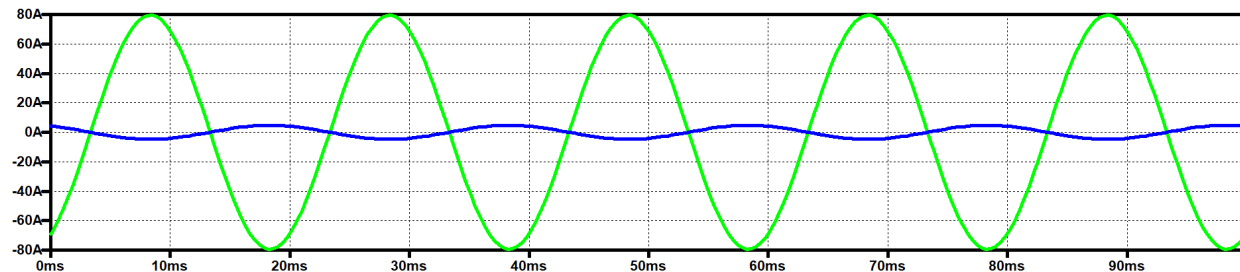
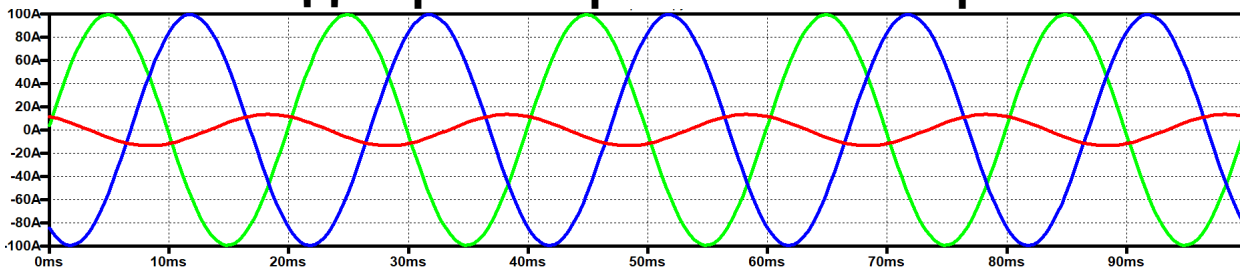
Балансеры



Промышленный образец балансера 22 кВА

Параметры балансера 22 кВА	
Частота питающей сети	50/60 Гц
Защита от перегрева	Встроенная защита от перегрузки
Длительный ток регулирования при 40°C	50 А (3x17А)
Максимальный ток регулирования при 40°C	100 А (3x33А) (10 мин.)
Напряжение сети	440 В
Сеть	3-ф 4-х проводная TN / TT
Размеры	886 x 454 x 323 mm (В, Ш, Г)
Масса [кг]	125
Степень защиты корпуса	IP55

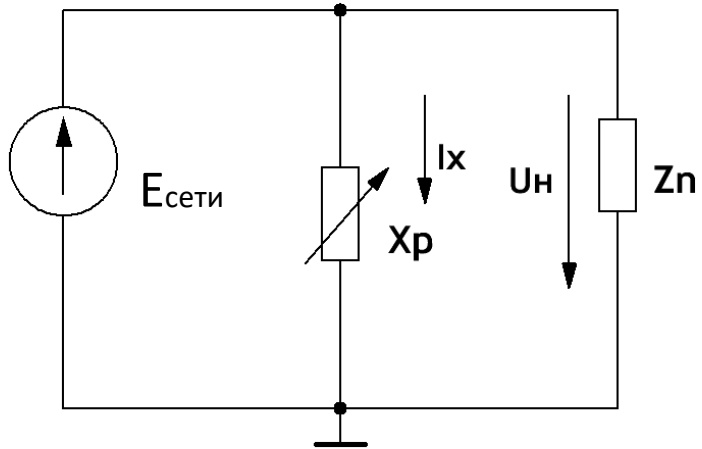
Диаграммы работы балансера



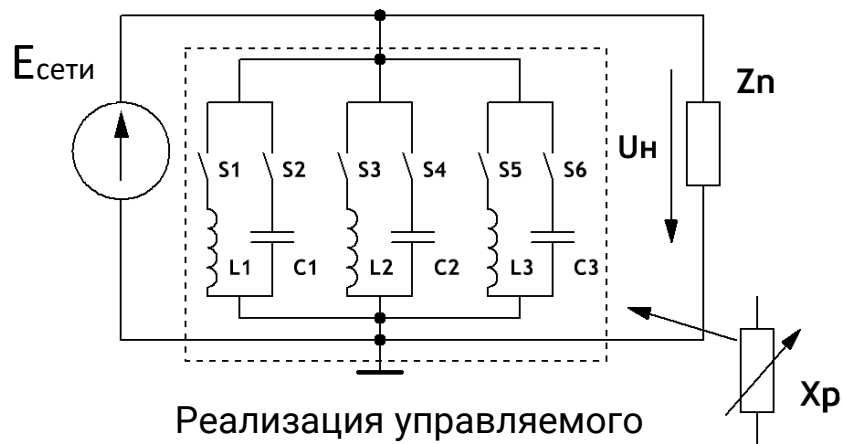
Токи фаз нагрузки
 I_{na} (зеленый),
 I_{nb} (синий),
 I_{nc} (красный)

Токи нейтрали нагрузки
 I_{nn} (зеленый) и
 сети
 I_{n0} (синий)

Компенсаторы реактивной мощности



Подключение КРМ к одной фазе сети



Реализация управляемого реактивного элемента КРМ

а)



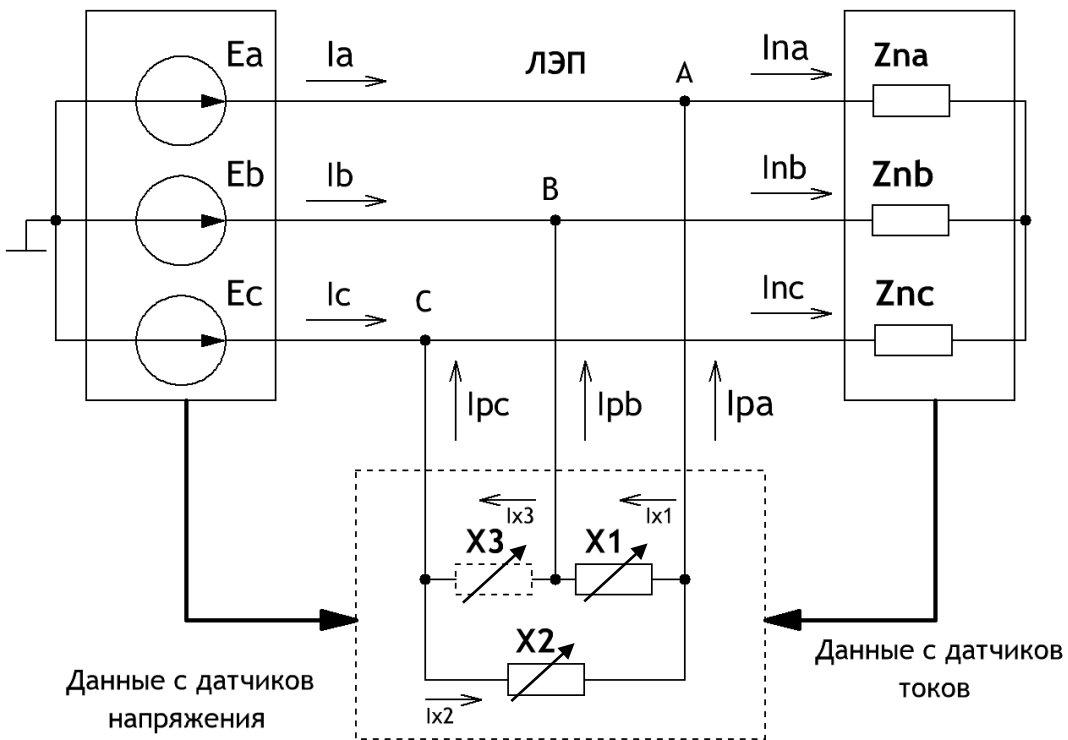
б)



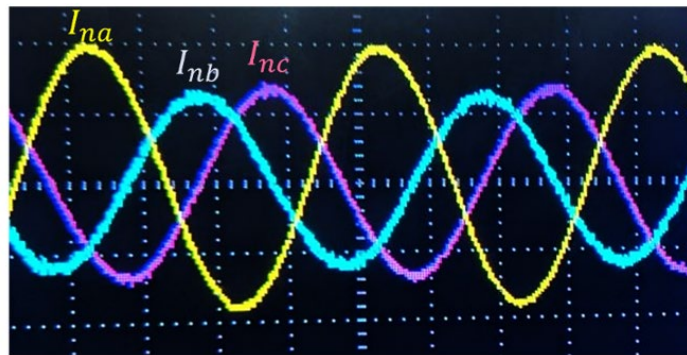
Трехфазный индуктивный (а) и конденсаторный (б) КРМ 0,4 кВ мощностью 200 кВАр

Параметры трехфазных КРМ 200 кВАр	
Класс напряжения, кВ	0,4 – 27,5
Частота питающего напряжения, Гц	50
Диапазон мощностей, МВАр	0,05 – 15
Доля установленной мощности трансформатора от генерируемой реактивной мощности, %	15
Количество дискретных уровней регулирования реактивной мощности при 3 секциях обмотки	12
Количество дискретных уровней регулирования реактивной мощности при 4 секциях обмотки	24
Быстродействие	20 мс
Управление	Автономное

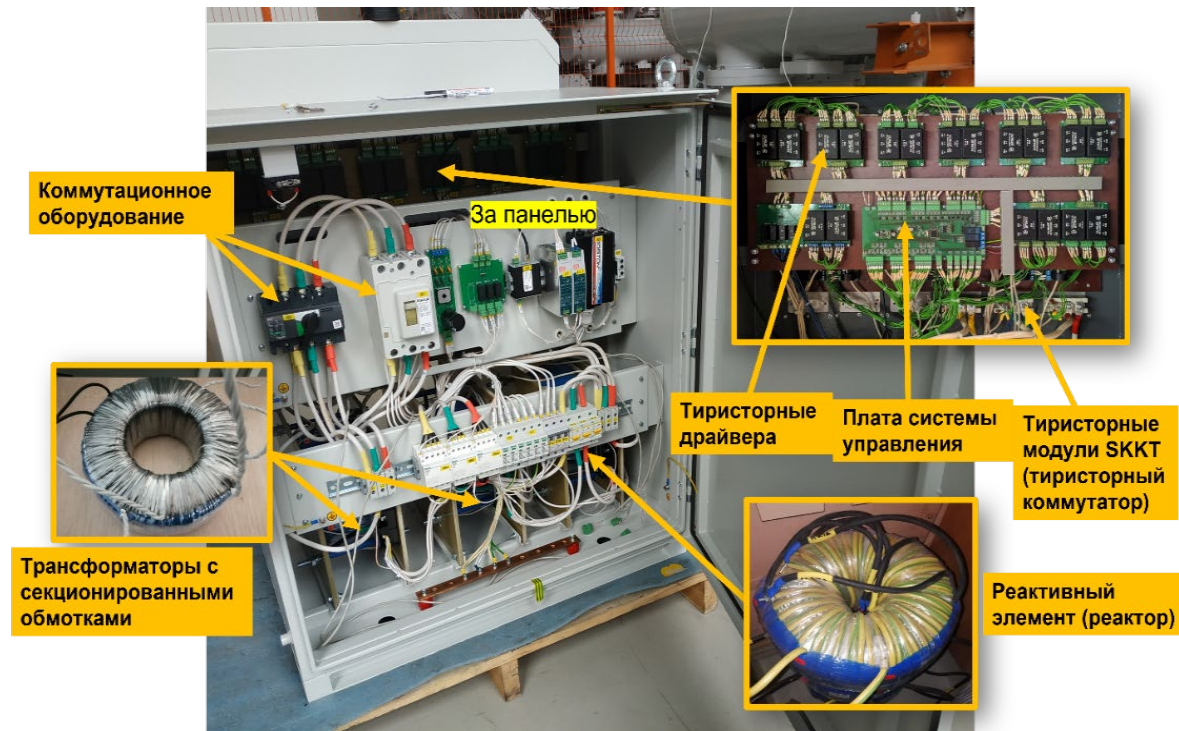
Регуляторы мощности



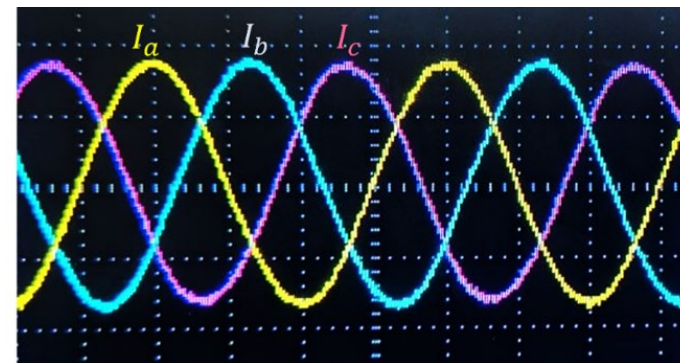
Регулятор мощности для трехпроводной сети на основе двух(трех) управляемых реактивных элементов



Несимметричная система токов нагрузки I_{na}, I_{nb}, I_{nc}

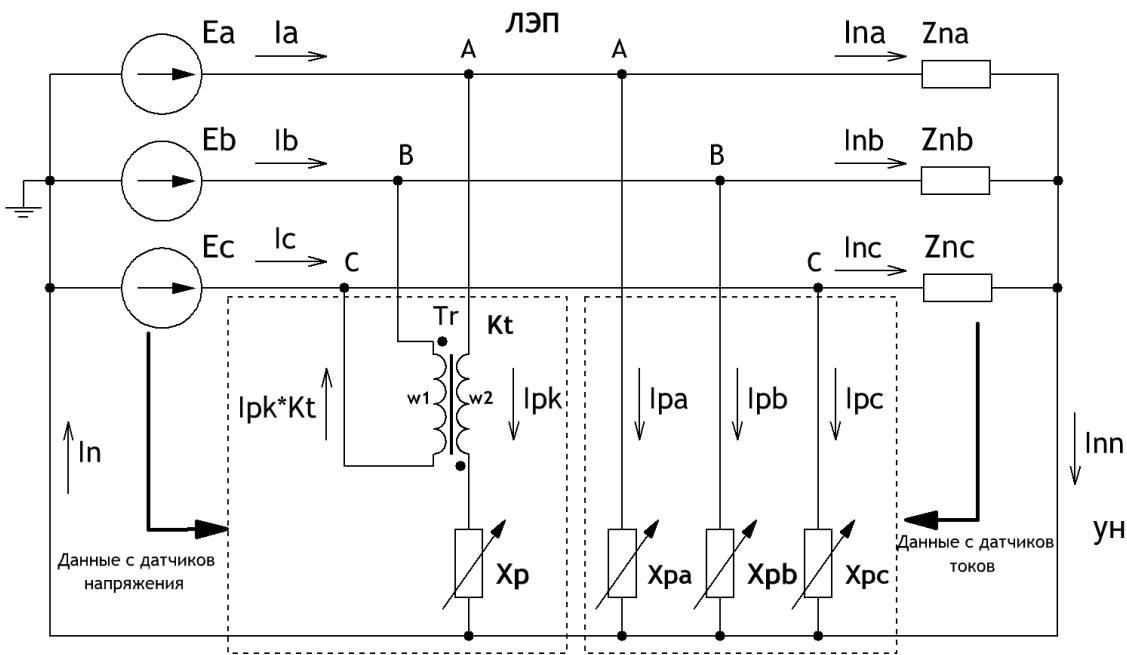


Основные узлы опытного образца регулятора мощности



Симметричная система токов сети I_a, I_b, I_c

Универсальные регуляторы мощности



Универсальный регулятор мощности для четырехпроводной сети

Параметры нагрузки: $Z_{na} = 5 \text{ Ом}$ $Z_{nb} = j5 \text{ Ом}$ $Z_{nc} = -j5 \text{ Ом}$

Рассчитанные параметры универсального регулятора мощности:

$K_t = -0.22$; $X_p = j15,12 \text{ Ом}$; $X_{pa} = j14,1 \text{ Ом}$;
 $X_{pb} = -j15 \text{ Ом}$; $X_{pc} = j18,7 \text{ Ом}$

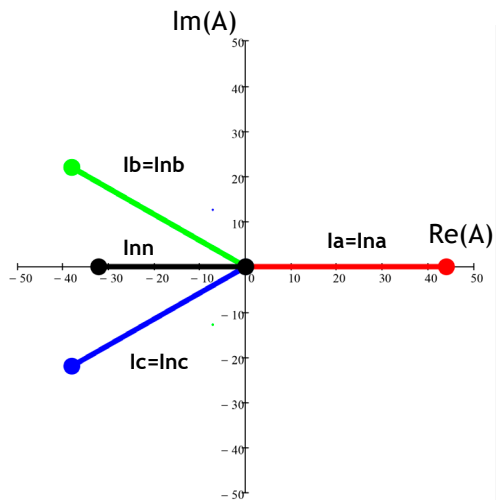


Диаграмма токов сети без универсального регулятора мощности

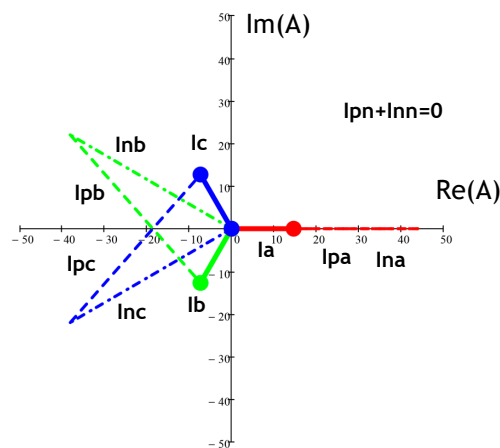
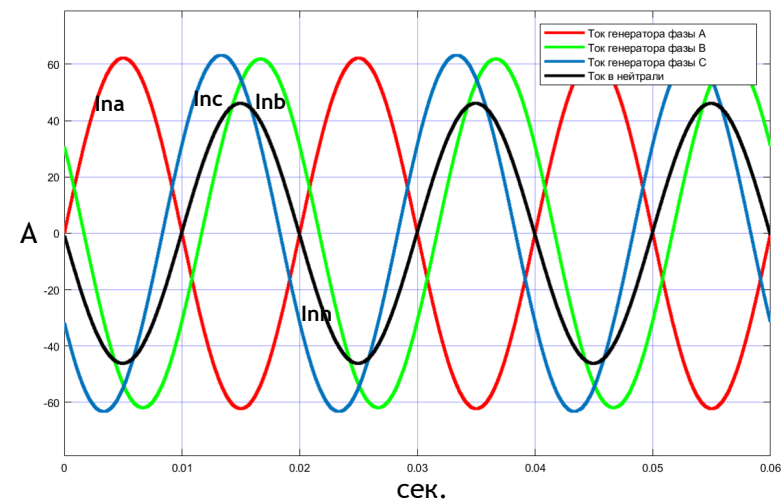
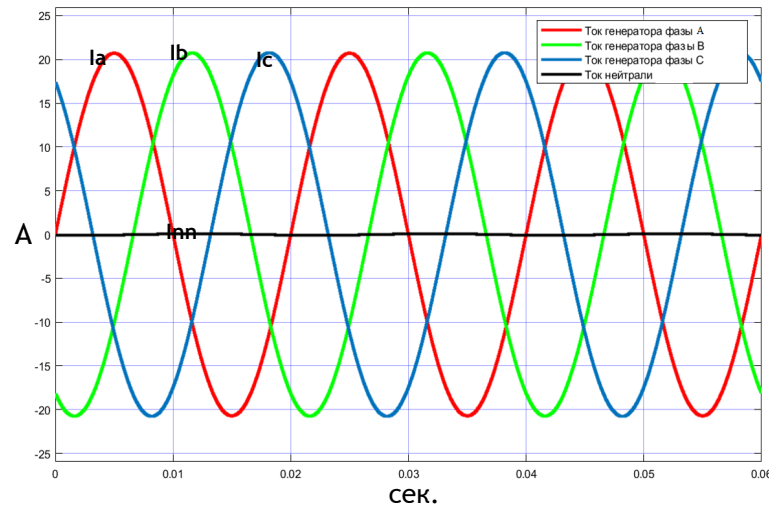


Диаграмма токов сети с универсальным регулятором мощности

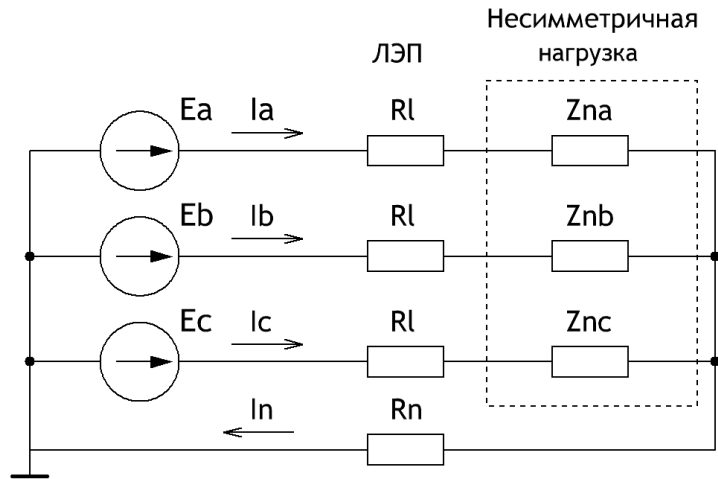
Токи сети (без универсального регулятора мощности)



Токи сети (с универсальным регулятором мощности)



Влияние различных технологий управления на режимы работы ЛЭП с несимметричной нагрузкой



Четырехпроводная ЛЭП с несимметричной нагрузкой

Данные ЛЭП

Напряжение фаз ЛЭП: $E_a = 220 \angle 0^\circ$ В, $E_b = 220 \angle -120^\circ$ В, $E_c = 220 \angle 120^\circ$ В

Параметры ЛЭП:

$R_l = 0,164 + j0,016$ Ом,

$R_n = 0,126 + j0,014$ Ом

(СИП-2 3x50 мм² + 1x70 мм² 200 метров)

Режим работы распределительной сети		Несимметричная нагрузка	Несимметричная нагрузка + Балансер	Несимметричная нагрузка + Балансер + Регулятор мощности с 3 реактивными элементами
Нагрузка		$Z_{na} = 6+j2$ Ом; $Z_{nb} = 1+j0,5$ Ом; $Z_{nc} = 3+j9$ Ом		
I_a	Ток фазы А нагрузки	$35,2 \angle -17^\circ$	$33,3 \angle -21^\circ$	$32 \angle -20^\circ$
I_b	Ток фазы В нагрузки	$159,8 \angle -144^\circ$	$175 \angle -141^\circ$	$184 \angle -147^\circ$
I_c	Ток фазы С нагрузки	$23,6 \angle 49^\circ$	$22,7 \angle 54^\circ$	$22 \angle 56^\circ$
I_n	Ток нейтрали нагрузки	$117 \angle -133^\circ$	$136 \angle -136^\circ$	$144 \angle -138^\circ$
P_n	Мощность потерь в нейтрали ЛЭП	1750	44	1
$\sum P$	Суммарная мощность потерь ЛЭП	6572	6407	3180
ϑ	Коэффициент полезного действия %	84%	86%	93%
$K_{2U\%}$	Коэффициент несимметрии обратной последовательности напряжения ЛЭП	4,42%	4,50%	0,05%
$K_{0U\%}$	Коэффициент несимметрии нулевой последовательности напряжения ЛЭП	5,23%	0,53%	0,04%

Основные выводы

- Нагрузка распределительных сетей в подавляющем большинстве случаев несимметрична, что отрицательно сказывается на качестве электрической энергии, потерях и надежности работы электросетевого оборудования;
- Существуют различные технологии и оборудование, направленные на устранение негативного влияния несимметрии нагрузки и обеспечивающие симметрирование режимов работы распределительных сетей;
- Представленное в докладе оборудование имеет широкий функционал и позволяет воздействовать как на отдельные составляющие несимметричного режима, так и обеспечивать полное симметрирование режимов работы сети;
- Выбор конкретных технологий и оборудования зависит от характера и графика изменения нагрузки сети, а также заданного конечного технико-экономического эффекта.

Спасибо за внимание!

