

Применение устройств силовой электроники отечественной разработки и изготовления для управления режимами работы активных электрических сетей

Заведующий кафедрой промышленной электроники , д.т.н., доц. – Асташев Михаил Георгиевич

Актуальность применения устройств силовой электроники в электрических сетях



Устройства силовой электроники – надёжный инструмент управления режимами работы электрических сетей.

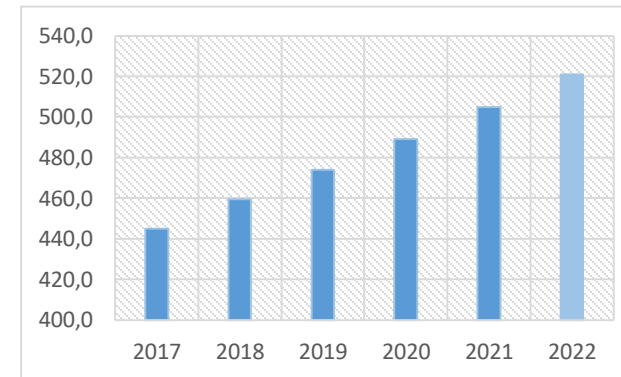
Актуальные задачи применения устройств силовой электроники в электрических сетях:

1. Уменьшение потерь электроэнергии при её транспортировке и распределении.
2. Улучшение показателей качества электрической энергии у потребителей.
3. Увеличение пропускной способности линий электропередачи.
4. Повышение устойчивости энергосистем в нормальных и аварийных режимах работы.

Механизмы воздействия устройств силовой электроники на сеть:

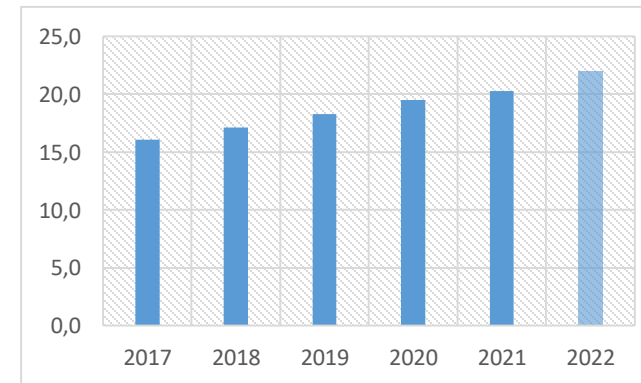
- Управление напряжениями в узлах сети (модуль, угол сдвига фаз).
- Управление потоками реактивной мощности.
- Изменение физических параметров ЛЭП.
- Перераспределение энергии между фазами.

Мировой рынок устройств силовой энергетической электроники имеет тенденцию к постоянному росту.



Источник:
[Thyristor Controlled Series Capacitor \(TCSC\) Market Share Valuation 2022 Global Size with Top Countries Data Analysis, Top Leading Players, Industry Growth, Sales and Revenue, Supply, Regional Demands, Forecast till 2028](#)
[Static VAR Compensators \(SVC\) - Global Market Trajectory & Analytics](#)

Ретроспектива мирового рынка компенсаторов реактивной мощности и устройств симметрирования режимов работы в электрической сети, 2017–2022 гг., млрд. долл. США.



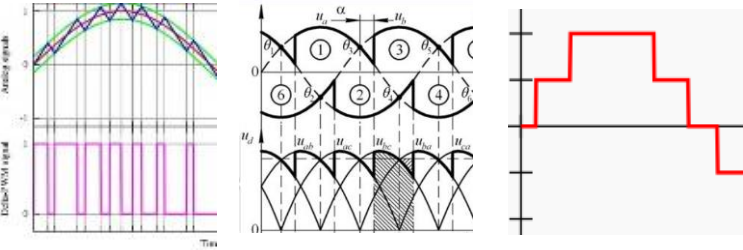
Источник:
[Process Instrumentation Market Analysis of Technology & Industries - Global Forecast to 2014 - 2020](#)

Ретроспектива мирового рынка регуляторов-стабилизаторов напряжения, 2017–2022 гг., млрд. долл. США.

Подходы к построению устройств силовой энергетической электроники

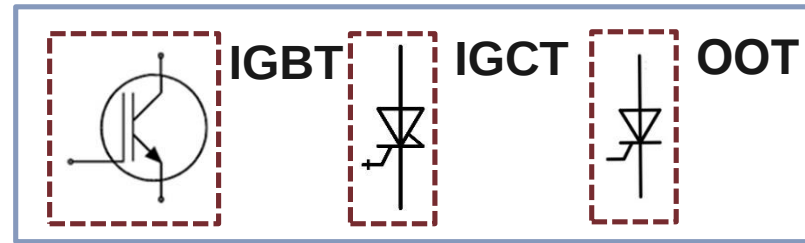


Управление ключами

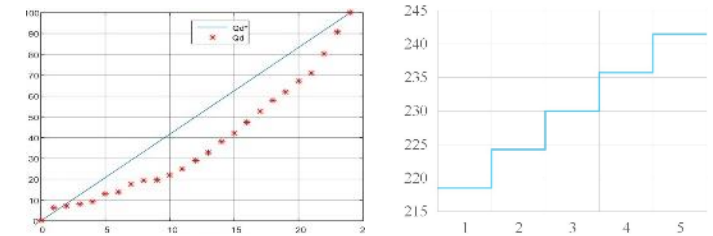


ШИМ, фазовое управление,
АИМ

Элементная база



Регулирование



непрерывное - дискретное

Транзисторные преобразователи:

- Широкий спектр функциональных возможностей;
- Универсальность;
- Возможность комплексного решения различных сетевых задач;
- Находятся на начальном этапе внедрения в электроэнергетике (СТАТКОМ);
- Высокие динамические потери энергии;
- Генерация высших гармоник тока и напряжения;
- Относительно дорогая элементная база, в РФ производство развито слабо (IGBT и IGCT).

Тиристорные преобразователи:

- Доступная компонентная база, широко производится в РФ;
- Высокие предельные параметры приборов по напряжению и току;
- Широко применяются в сетях (СТК, УШР, УУПК и др.);
- Неполная управляемость однооперационных тиристоров (ООТ);
- Ограниченные динамические свойства приборов и преобразователей на их основе;
- Наличие широкого спектра гармоник при регулировании;
- Алгоритмы управления зависят от множества факторов;
- Круг решаемых в энергетике задач существенно ограничен.

Особенности представленных в докладе технологий и устройств силовой энергетической электроники



1. Силовые управляемые полупроводниковые преобразователи построены на основе тиристоров. Применение тиристоров обеспечивает достижение высоких показателей мощности и рабочего ресурса устройств, конкурентные технико-экономические показатели;
2. Устройства реализуют дискретное управление режимами работы ЛЭП; Идеология построения устройств направлена на максимальное соответствие концепциям интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью и цифровой трансформации энергетики.
3. Все устройства обеспечивают синусоидальные токи и напряжения в полном диапазоне регулирования своих параметров. Это гарантирует предельно высокое качество регулируемой электроэнергии в ЛЭП;
4. Обеспечивается высокое быстродействие регулирования параметров устройств устройств - пределах 20 мс;
5. Технологии являются масштабируемыми в широких диапазонах классов напряжений и мощностей устройств;
6. Силовая электронная и электротехническая элементная база устройств является полностью отечественной;
7. Системы управления устройствами являются цифровыми. Системы управления обеспечивают внутреннюю диагностику и мониторинг состояния работы устройства. Системы управления имеют механизмы интеграции в информационную структуру цифровых сетей по протоколам МЭК 61850 и МЭК 60870-104;
8. Для всех устройств разработаны математические и физические модели, интегрируемые в стандартные программные комплексы для расчета электрических режимов работы электроэнергетических систем;
9. Совместно с промышленными партнерами созданы опытно-промышленные образцы устройств, проведена их опытно-промышленная эксплуатация в электроэнергетических системах;
10. Разработки выполнены в рамках НИОКР с реальными заказчиками: электросетевые компании (ПАО «ФСК ЕЭС», ПАО Россети Ленэнерго и др.), Минобрнауки РФ, предприятия реального сектора экономики (АО ВО «Электроаппарат, ПАО «Электровыпрямитель» и др.);
11. Применяемые схемотехнические решения и алгоритмы их управления являются инновационными и защищены патентами.

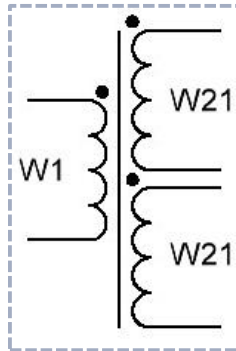
Номенклатура разработанных устройств и их элементная база

Номенклатура разработанных устройств силовой электроники (УСЭ):

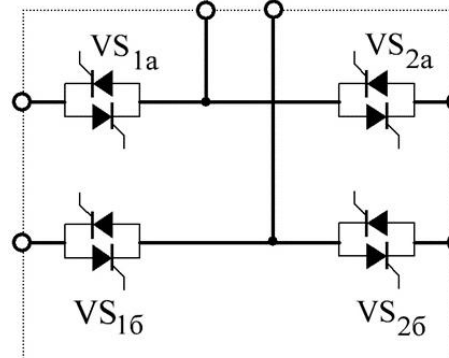
1. Тиристорные регуляторы переменного напряжения.
2. Управляемые источники реактивной мощности с тиристорными коммутаторами.
3. Фазоповоротные устройства с тиристорными коммутаторами.
4. Статические регуляторы мощности (в том числе, устройства симметрирования) с тиристорными коммутаторами.
5. Управляемые устройства продольной компенсации с тиристорными коммутаторами.

Силовые элементы разработанных УСЭ

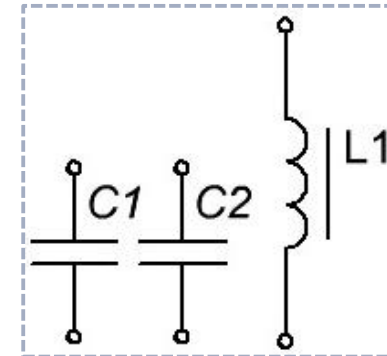
Трансформаторы с
секционированными обмотками



Тиристорные
коммутаторы



Реактивные
элементы



На основе трёх типов оборудования реализуются различные классы УСЭ, решающие широкий спектр задач по управлению режимами работы активно-адаптивных электрических сетей.

Перспективные направления исследований в области ТРПН:

- создание современных средств быстродействующего **регулирования напряжения на трансформаторных подстанциях – ТП (6-10-20)/0,4 кВ**, в виду полного отсутствия на данных ТП (как в России, так и за рубежом) механизмов быстродействующего регулирования напряжения в сетях класса 0,4 кВ.
- **разработка новых типов линейных** (устанавливаемых в ЛЭП) **регуляторов** переменного напряжения **с вольтодобавкой** с целью технологического усовершенствования и обеспечения работоспособности устройств данного класса.



Существующие подходы к решению задач регулирования напряжения в активно-адаптивных сетях:

Задача			Применяемые средства
1.	Регулирование напряжения на трансформаторных подстанциях.	на	Механические РПН* – ТП 110 кВ и выше Регулирование в режиме ПБВ** ТП 6-20кВ.
2.	Регулирование напряжения в линиях электропередачи.		Вольтодобавочные трансформаторы и устройства на их основе.

*- РПН – устройство регулирования под нагрузкой (медленное регулирование: 3-5 сек, ограниченное количество циклов коммутации: n*10 000.

**-. ПБВ – переключение регулировочных ответвлений обмотки без возбуждения (требует отключения трансформатора от сети и нагрузки).

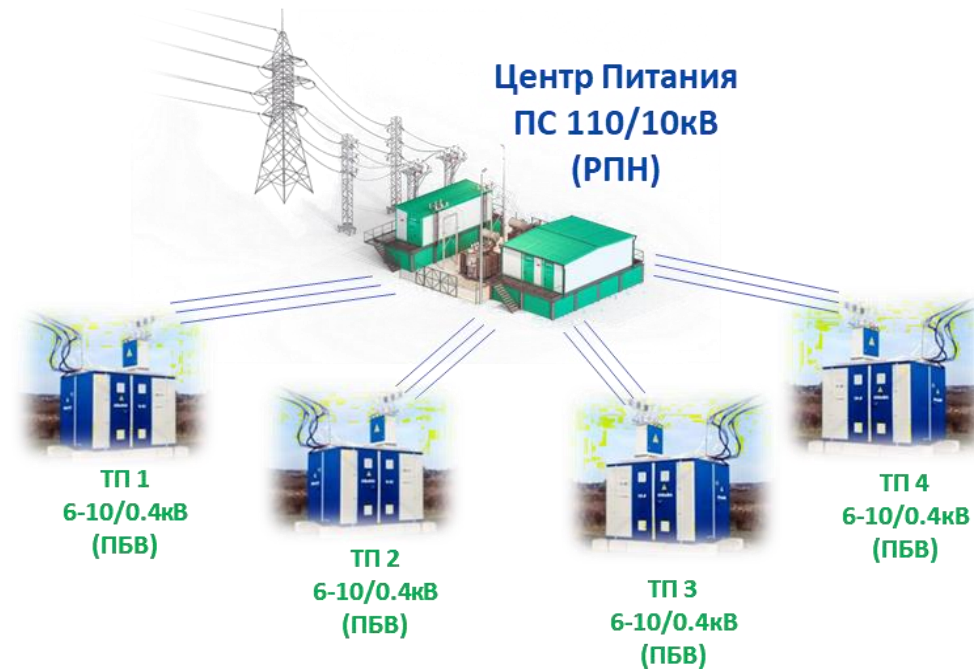
Механизмы регулирования напряжения в распределительных сетях и их особенности



Существующие механизмы регулирования напряжения:

1. Центр питания (110/10кВ) – устройство РПН:
 - Малое быстроедействие (3-4 сек.);
 - Одновременное воздействие на значительную группу трансформаторных подстанций (ТП) с разнородной нагрузкой.
 2. ТП (6-10/0.4кВ) – устройство ПБВ:
 - Переключение при отключении трансформатора;
 - Отсутствие возможности автоматического управления напряжением.
- Существующие механизмы не позволяют в темпе процесса изменять напряжение электрической сети и обеспечивать требуемые показатели качества электроэнергии в части установившегося отклонения напряжения во всех точках присоединения нагрузок потребителей.
 - Отсутствие возможности регулирования напряжения трансформаторов 6-10/0,4кВ под нагрузкой затрудняет полноценную интеграцию ТП 6-10/0,4кВ в структуру активно- адаптивных сетей с целью комплексной реализации концепции цифровой трансформации электроэнергетики.

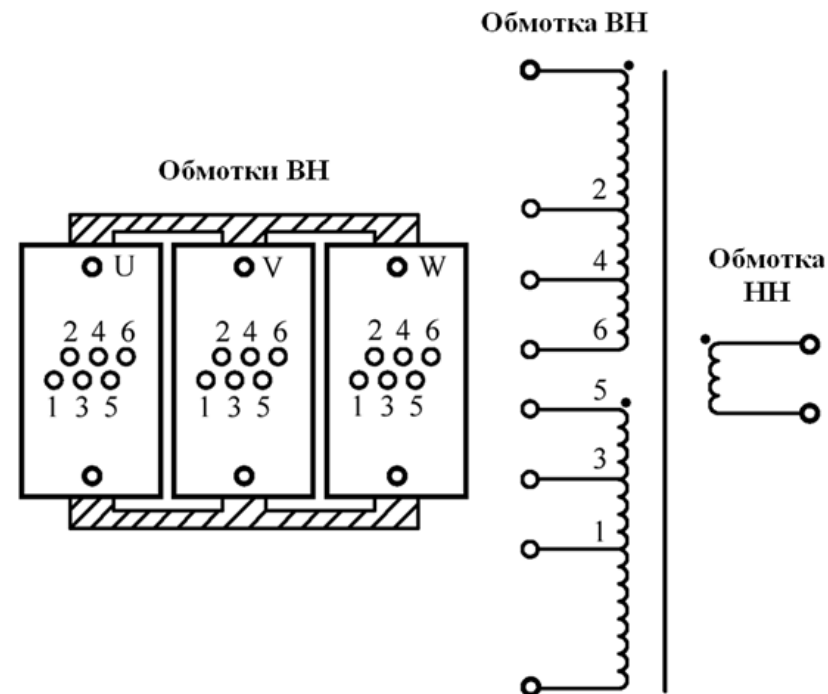
Типовая структура распределительной сети



Функции ПБВ силовых трансформаторов 6-20/0,4 кВ



Номер ступени регулирования напряжения	Значение напряжения обмотки НН, в зависимости от номинального, %	Номера замыкаемых ответвлений обмотки ВН.
1	-5%	5-6
2	-2,5%	5-4
3	0%	3-4
4	+2,5%	3-2
5	+5%	2-1



Регулировочные ответвления ПБВ обмоток ВН трансформатора позволяют осуществлять ступенчатое переключение количества витков обмоток ВН каждой фазы, изменяя коэффициенты трансформации и, соответственно, напряжения на обмотках НН.

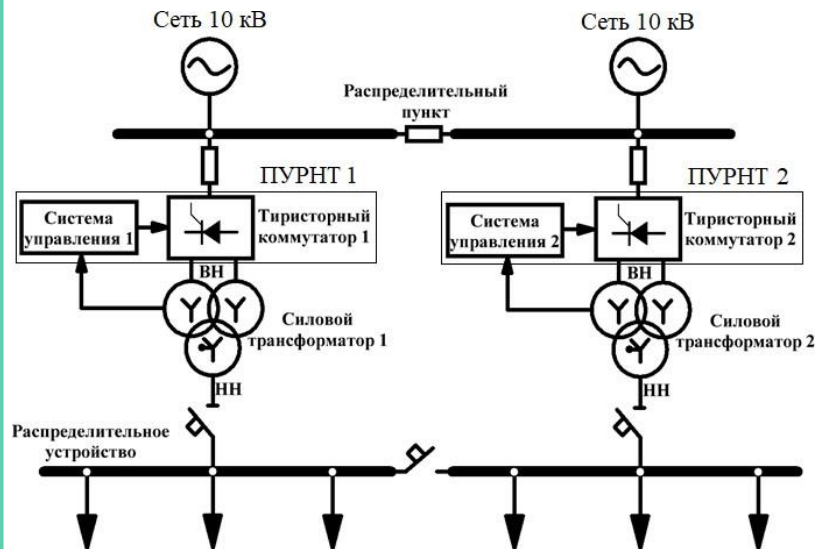
Регулировочные ответвления силовых трансформаторов 6-20/0,4 кВ сухого типа доступны для внешнего подключения.

Полупроводниковые устройства регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой (ПУРНТ)

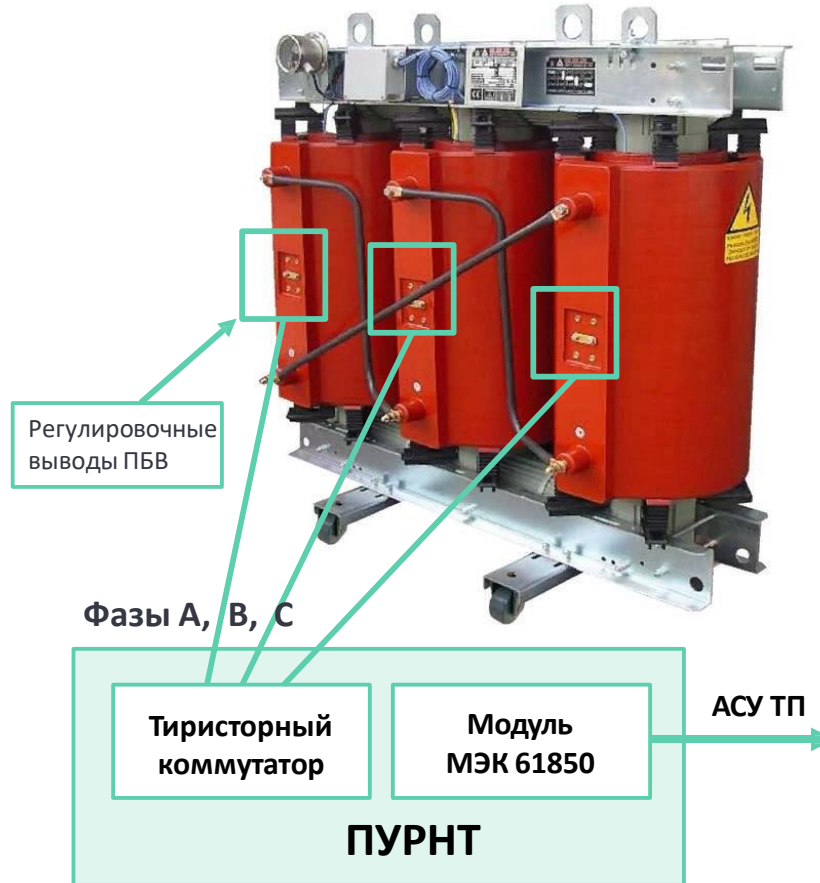
ПУРНТ предназначены для регулирования напряжения трансформаторов ТП под нагрузкой.

ПУРНТ подключаются к стандартным регулировочным ответвлениям ПБВ трансформаторов класса 6-10/0,4кВ сухого типа.

Упрощённая схема ТП с ПУРНТ



Сухой силовой трансформатор



Технология создана в рамках Постановления Правительства №218 от 09.04.2010г.
Индустриальный партнер – АО ВО «Электроаппарат»
Сроки реализации: декабрь 2019г. – декабрь 2021г.

Тиристоры не имеют ограничений по коммутационному ресурсу, что обеспечивает высокую надежность ПУРНТ

Особенности технической реализации ПУРНТ

Топологии ПУРНТ на основе двунаправленных тиристорных ключей

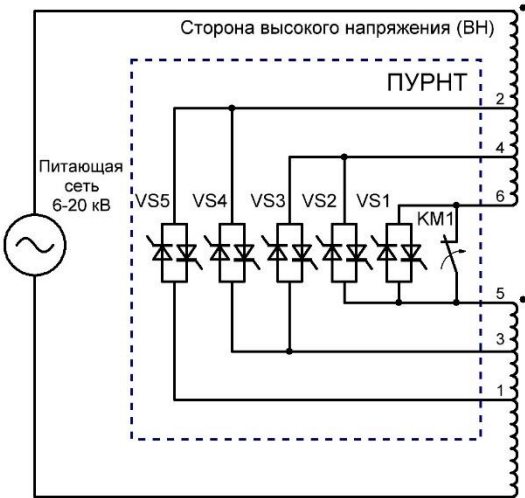


Схема 1

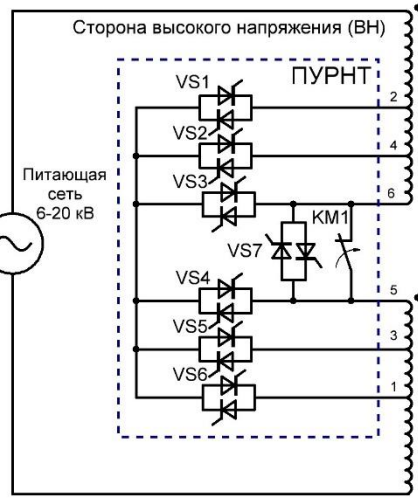
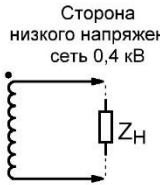


Схема 2



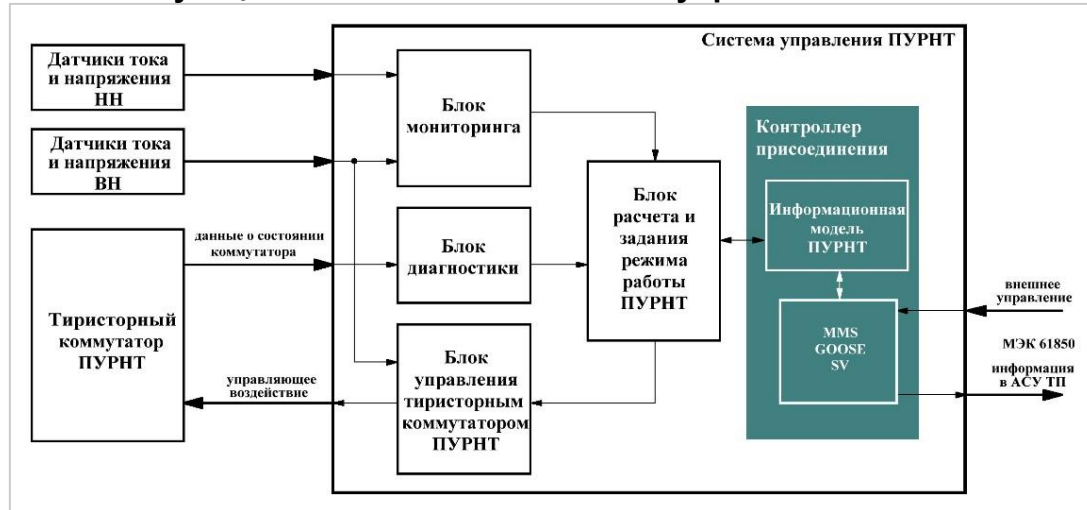
Схема 1:

- содержит 5 ДТК;
- одновременно проводит ток 1 ДТК;
- максимальное напряжение на закрытых ДТК – напряжение секции.

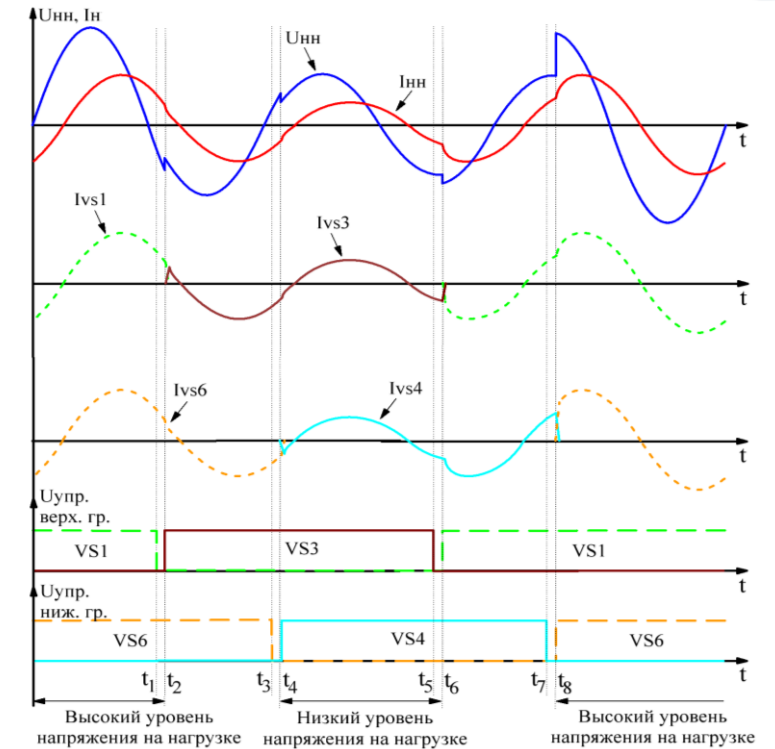
Схема 2:

- содержит 7 ДТК;
- одновременно проводят ток 2 ДТК;
- максимальное напряжение на закрытых ДТК – 1/2 напряжения секции.

Функциональная схема системы управления ПУРНТ



Реализация управления ПУРНТ



Особенности алгоритмов управления ПУРНТ

1. Использование способа выключения ДТК путем приложения обратного напряжения позволяет **снизить класс напряжения ДТК до 10 раз** по сравнению с классом напряжения сети.
2. Алгоритм переключения ступеней зависит от характера нагрузки (активно-индуктивный, активно-емкостной) и от направления изменения напряжения (уменьшение, увеличение).

Опытный образец ПУРНТ



Опытный образец ПУРНТ



ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ПУРНТ:

Центральный модуль СУ;
Модуль обмена данными с АСУ ТП

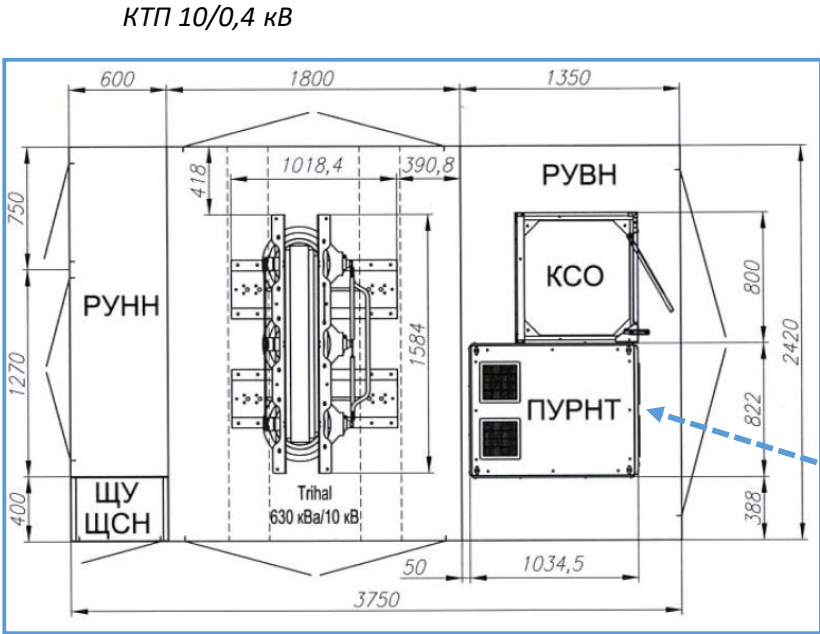
Локальные модули СУ фаз А, В, С;
Тиристорный коммутатор;
Комплект датчиков тока и напряжения.

Вводы 10 кВ от ПБВ трансформатора.

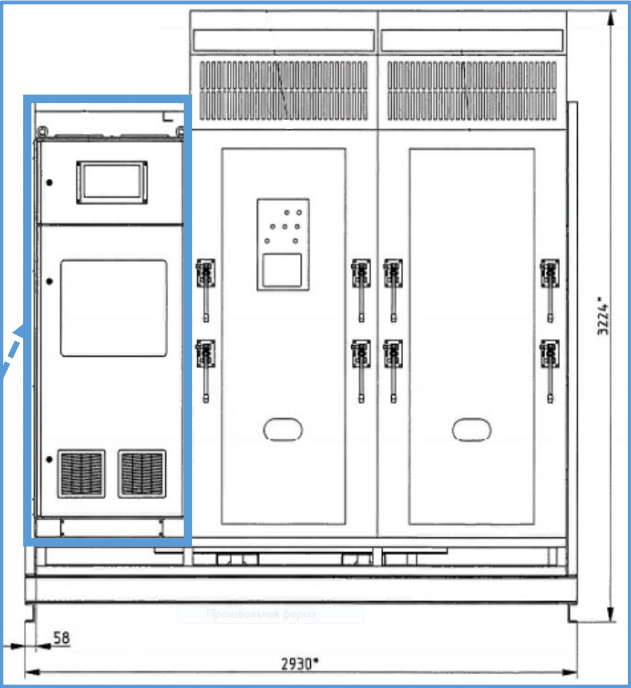
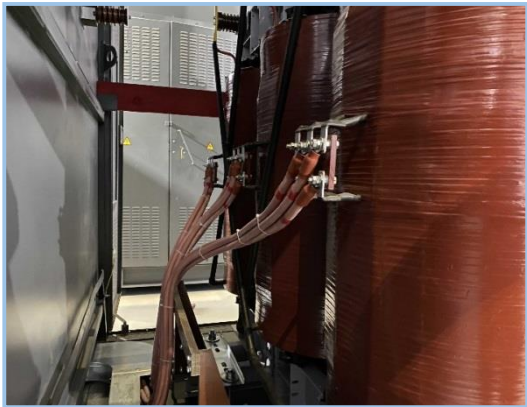
Технические характеристики ПУРНТ

№	Параметр	Значение
1.	Класс напряжения электрической сети	6-10 кВ
2.	Диапазон мощностей нагрузки	250кВт – 2МВт
3.	Диапазон регулирования напряжения	до ±5 % Uном
4.	Тип регулирования	дискретное, пофазное
5.	Тип исполнения	1-фазное / 3-фазное
6.	Быстродействие регулирования	20 мс
7.	Климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69	У, УХЛ, ХЛ(+40/-60 С°)
8.	Категория размещения по ГОСТ 15150-69	1-4
9.	Влияние на качество электроэнергии	отсутствует
10.	Мониторинг состояния работы регулятора	по GSM, Ethernet – каналам
11.	Алгоритмы функционирования	-автономный; -внешнее управление
12.	Защита от коротких замыканий в ЛЭП	внутренняя
13.	Теледиagnostика и телеуправление	по стандарту МЭК 61850

КТП класса 6-10/0,4 кВ с ПУРНТ



Размещение ПУРНТ на КТП (вид сверху)



ПУРНТ

Габаритные размеры ПУРНТ (ДхШхВ), мм – 1000 х 1000 х 2900 в составе КТП (лицевая панель)



ЭА ЭЛЕКТРОАППАРАТ

ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ИЗДЕЛИЯ
КТП с ПУРНТ (С)-1000/10/0,4-УХЛ1

Заводской номер №	002
Тип	КТП-1000/10/0,4
Номинальное напряжение ВН/НН	10/0,4кВ
Частота	50
Степень защиты	IP55
Масса	8000 кг
Дата	22.11.2021

Изготовлено в Р.Ф. МЭИУ.566522.000 ТУ
г. Санкт-Петербург, 24-я линия ВО, д. 3-7
тел. +7 (812) 677-83-83
E-mail: box@ea.spb.ru

www.elektroapparat.ru

Оценка эффекта применения ПУРНТ в энергосистеме

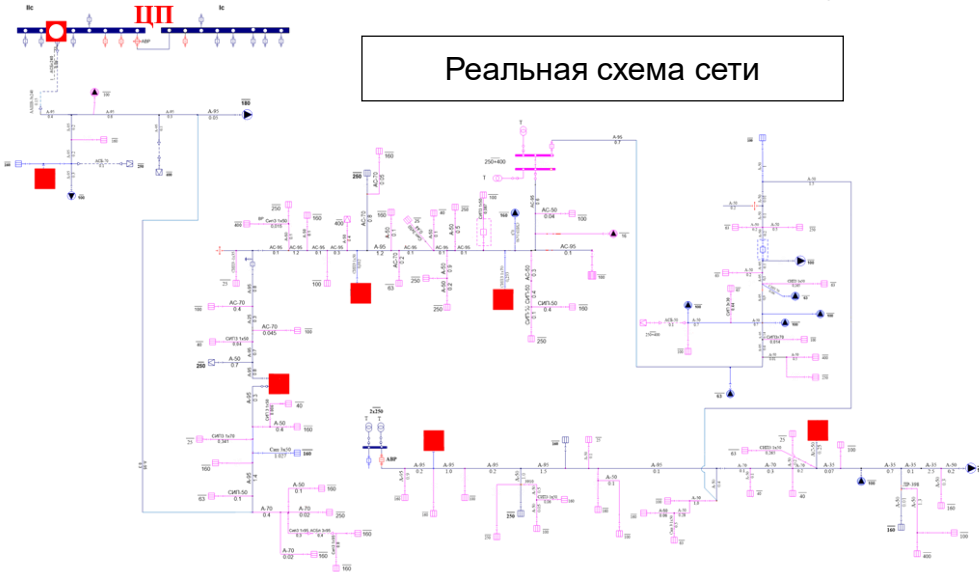


Фидер, обеспечивающий электроснабжение смешанной нагрузки: СНТ, деревни, честные предприятия, общества с ограниченной ответственностью, частные лица и пр.

Расчетная модель сети



Реальная схема сети

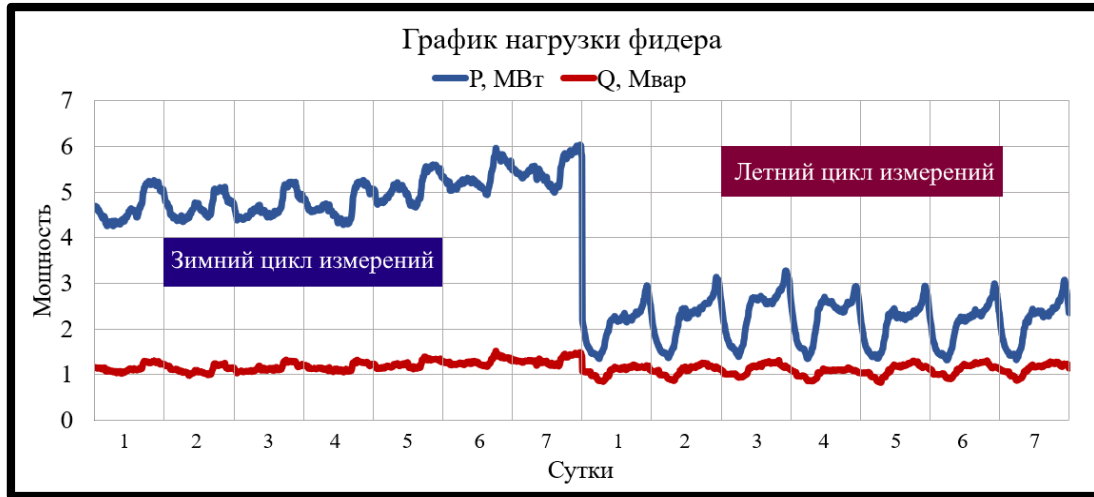


Характеристика исследуемой распределительной сети

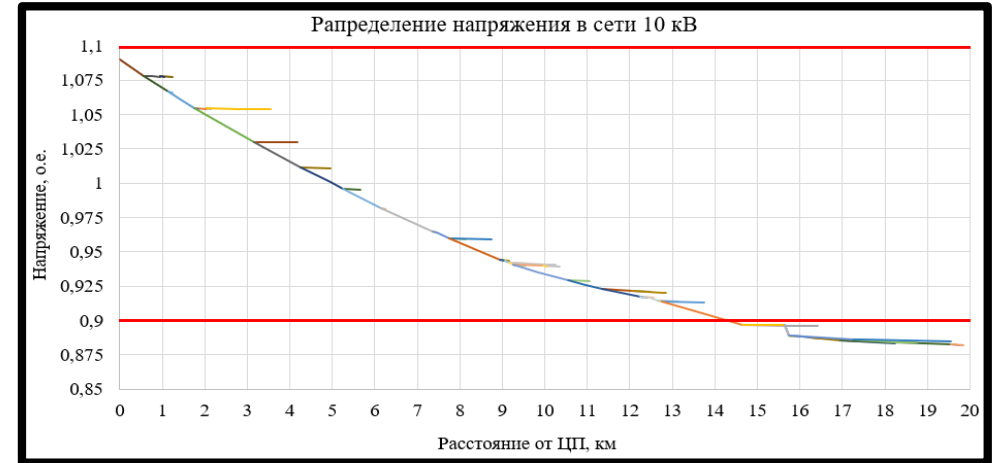
- суммарная длина линий до наиболее удаленного потребителя составляет : 19,8 км;
- сечений линий: 95 и 70 мм²;
- диапазон РПН ТР на ЦП: 10,8±0,15 кВ;
- ПБВ распределительных ТР: 5 положений по 2,5%;
- наименьшая нагрузка 1572 кВА (август);
- наибольшая нагрузка 6217 кВА (ноябрь);
- $\text{Cos}(\text{Fi})_{\text{НБ}} = 0,97$.

Оценка эффекта применения ПУРНТ в энергосистеме

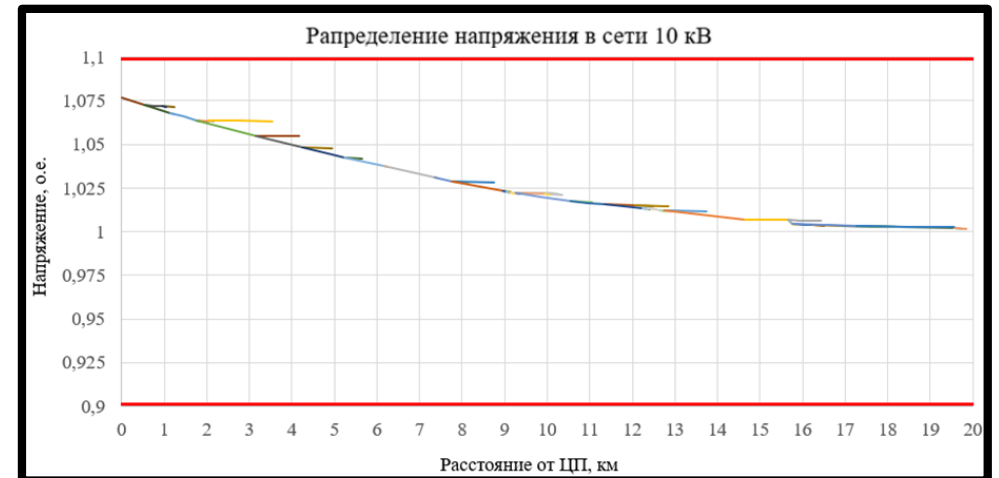
Распределение напряжения и мощности в сети



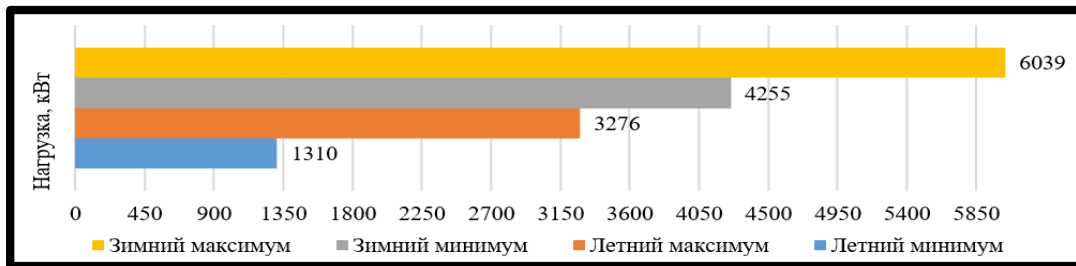
Графики активной и реактивной мощности фидера в зимнем и летнем цикле измерений



Распределение напряжения в сети 10 кВ в зимний период

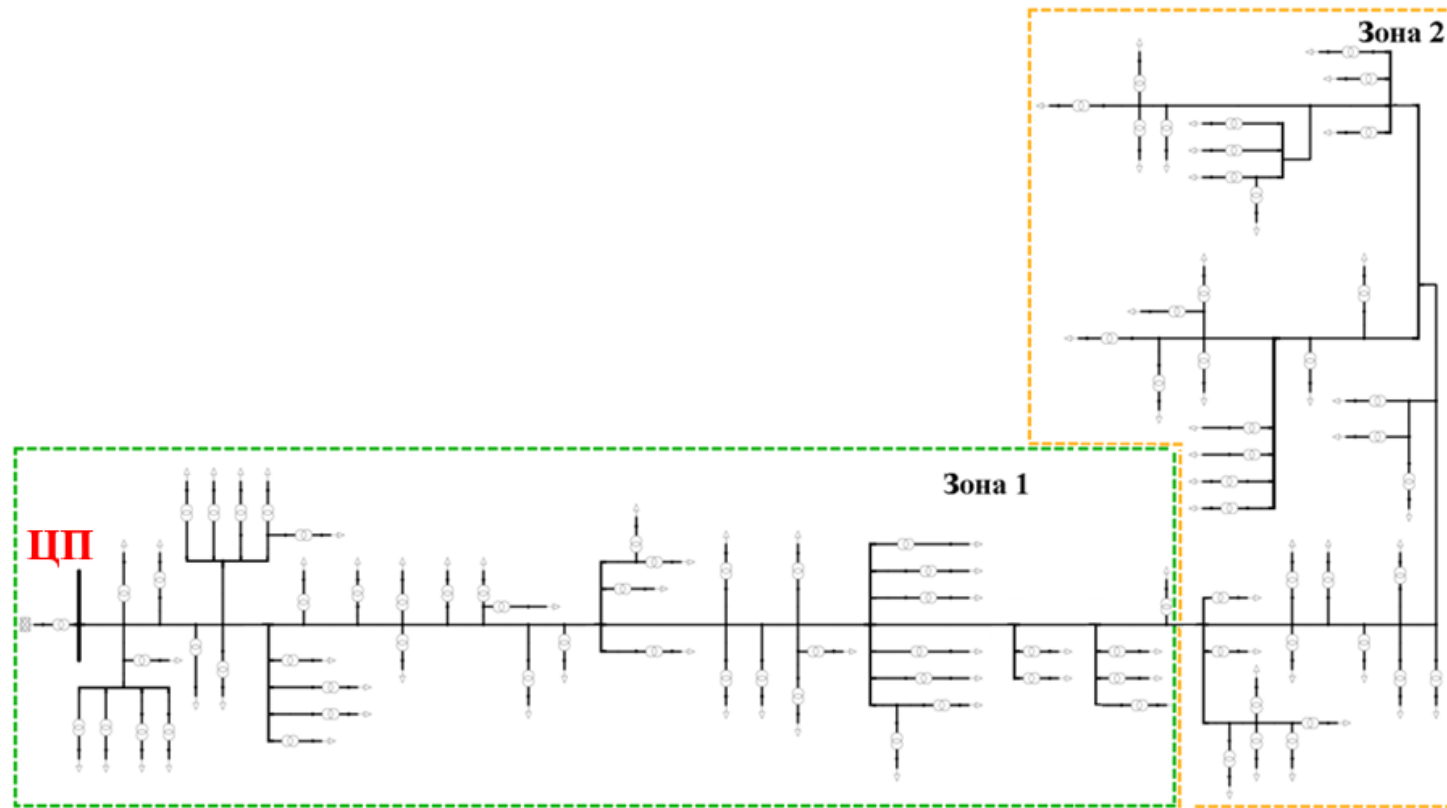


Распределение напряжения в сети 10 кВ в летний период



Неоднородность нагрузки РЭС

Разделение РЭС по зонам с различными диапазонами изменения напряжения



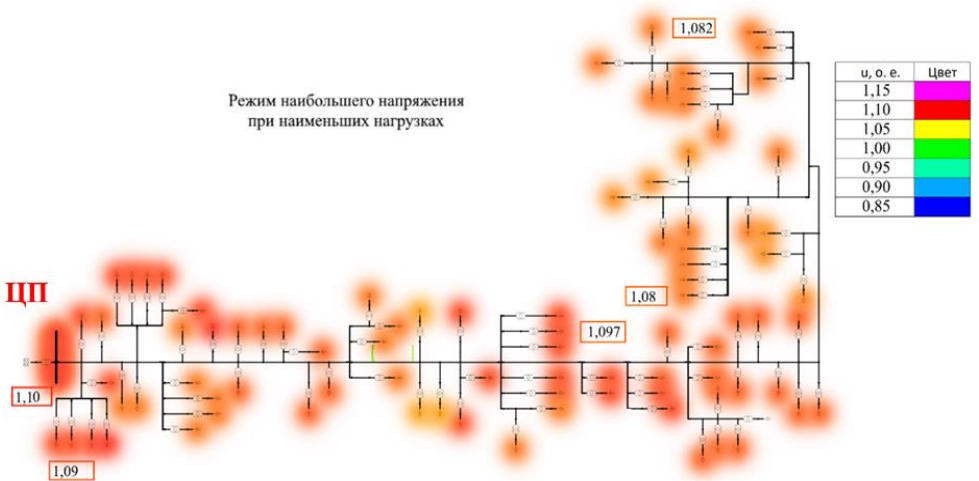
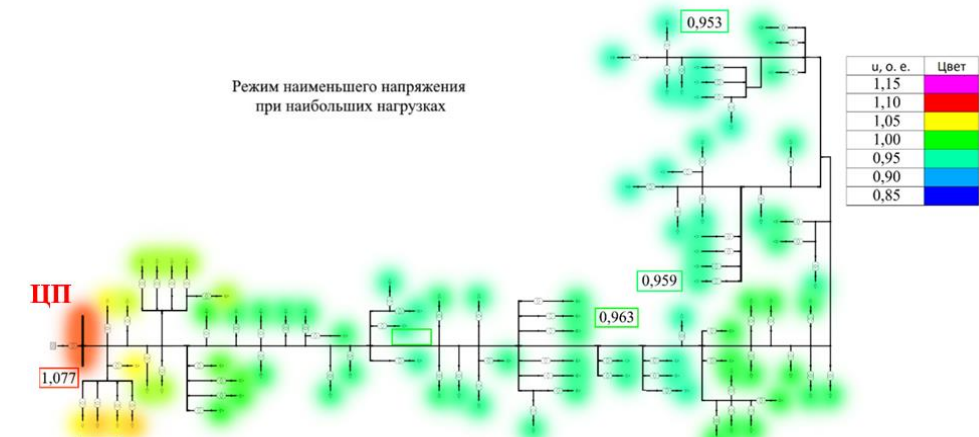
Зоны распределительной сети по диапазону изменения напряжения

Зона 1 - Напряжение на ПС, находящихся в Зоне 1 возможно поддерживать в диапазоне 95-110 % $U_{ном}$ только за счет работы устройств РПН на ЦП, переключение анцапф ПБВ на трансформаторах ТП не требуется.

Зона 2 - Автоматическое регулирования напряжения с помощью устройств ПБВ на всех ПС 6-20/0,4 кВ в Зоне 2 позволит поддерживать напряжение в диапазоне 95-110 % $U_{ном}$.



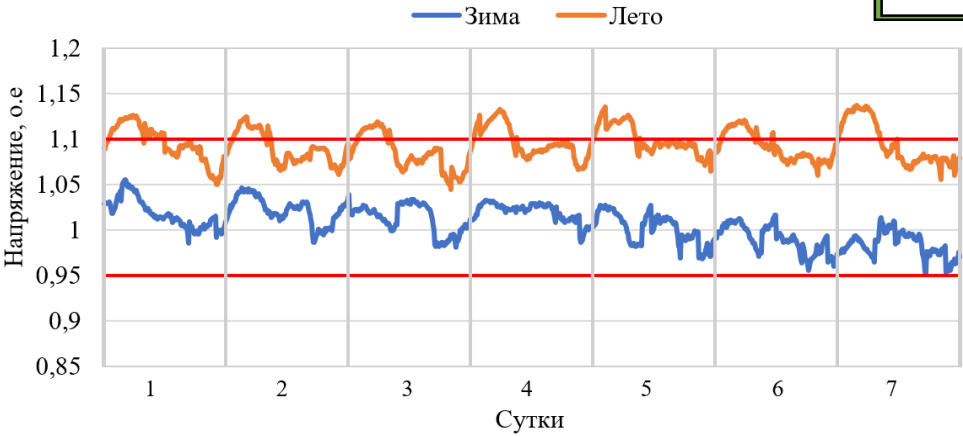
Применение устройств ПУРНТ в РЭС



Расчетная схема в режимах с наибольшим и наименьшим уровнем напряжения в сети

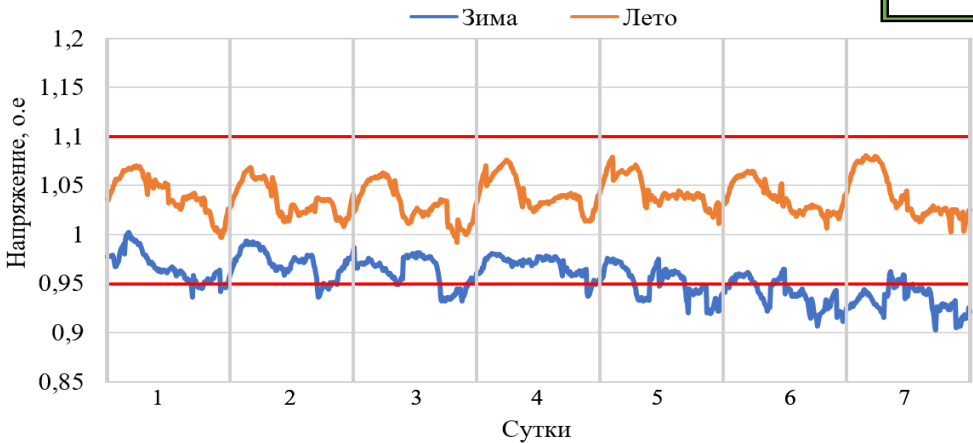
Графики напряжения в наиболее удаленной точке

$n_{отв}=1$



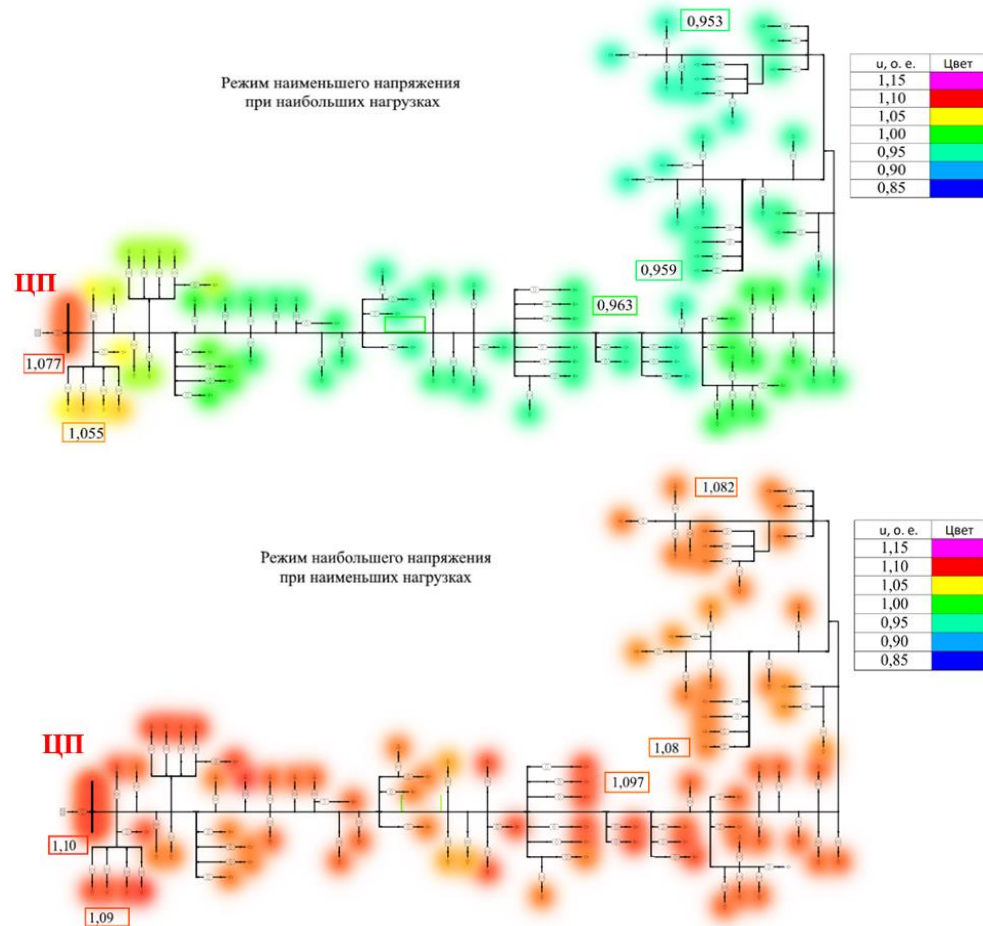
Графики напряжения в наиболее удаленной точке

$n_{отв}=3$



Оценка эффекта применения ПУРНТ в энергосистеме

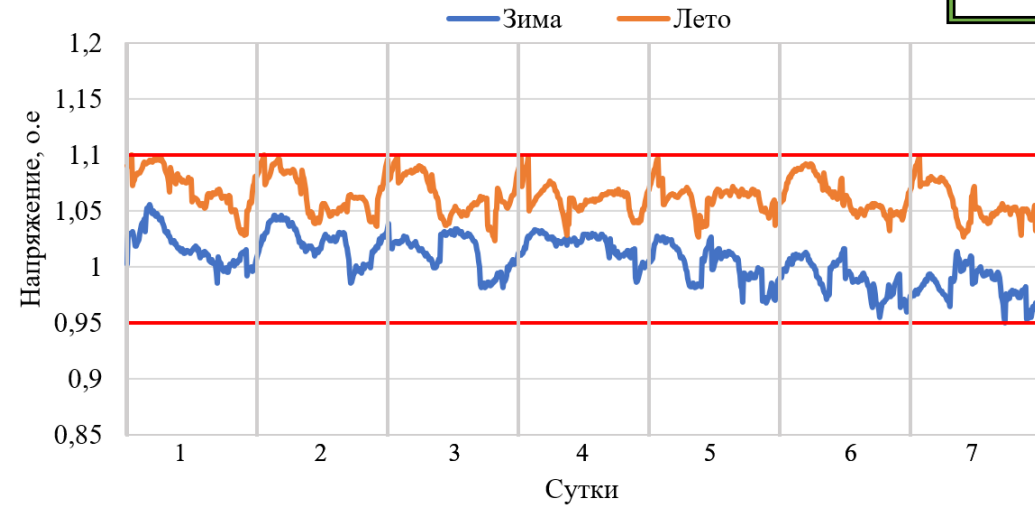
Применение устройств ПУРНТ в РЭС



Расчетная схема в режимах с наибольшим и наименьшим уровнем напряжения в сети

Графики напряжения в наиболее удаленной точке

$n_{отв} = \text{авто}$



Выводы: Применение полупроводниковых устройств регулирования выходного напряжения трансформаторов позволяет обеспечить требуемый уровень напряжения (0,95 - 110% $U_{ном}$) на всех ТП 10/0,4 кВ Зоны 2 во всех режимах работы.

Установка подобных устройств в РЭС аналогичную данной технически целесообразна.

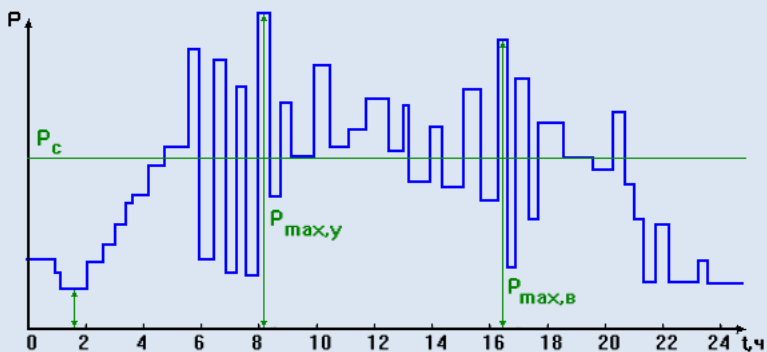
Особенности технологии ПУРНТ и её развитие

- Разработанные устройства могут использоваться только совместно с трансформаторами сухого типа. У серийно выпускаемых масляных трансформаторов возможности подключения к ответвлениям ПБВ нет. При этом масляные трансформаторы составляют подавляющее большинство парка силовых трансформаторов.
- Стоимость ПУРНТ на сегодняшний день соизмерима со стоимостью силового трансформатора ТП. При этом стоимость силовой электронной компонентной базы в ПУРНТ составляет не более 25% общей стоимости устройства.

Трансформатор масляного типа 1МВА с внешними выводами ПБВ



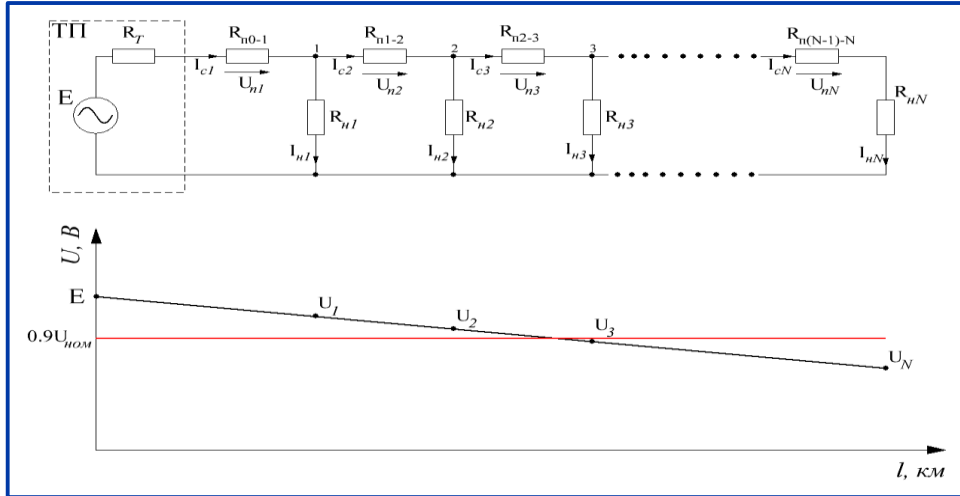
Трансформатор 10/0,4кВ 1 МВА спроектирован и изготовлен в рамках задельной НИОКР, реализуемой в НИУ «МЭИ» с целью развития технологии ПУРНТ. Трансформатор имеет увеличенный диапазон регулирования напряжения: $\pm 10\%$. Стоимость трансформатора на 15% превышает стоимость серийного стандартного аналога.



Можно ли обеспечить нормированные ПКЭ в сетях с мощной зарядной инфраструктурой без быстродействующих средств регулирования напряжения на ТП?

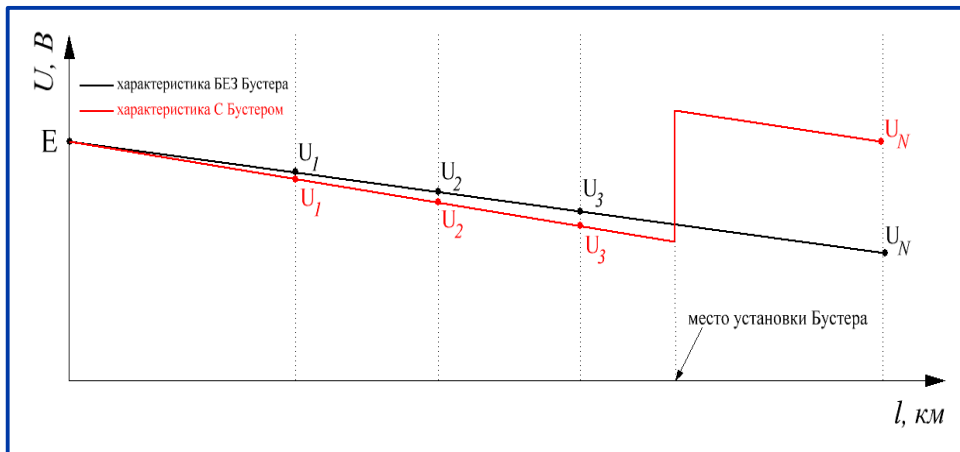
Регуляторы-стабилизаторы напряжения (РСН) для ЛЭП

Падение напряжения вдоль ЛЭП 0,4кВ

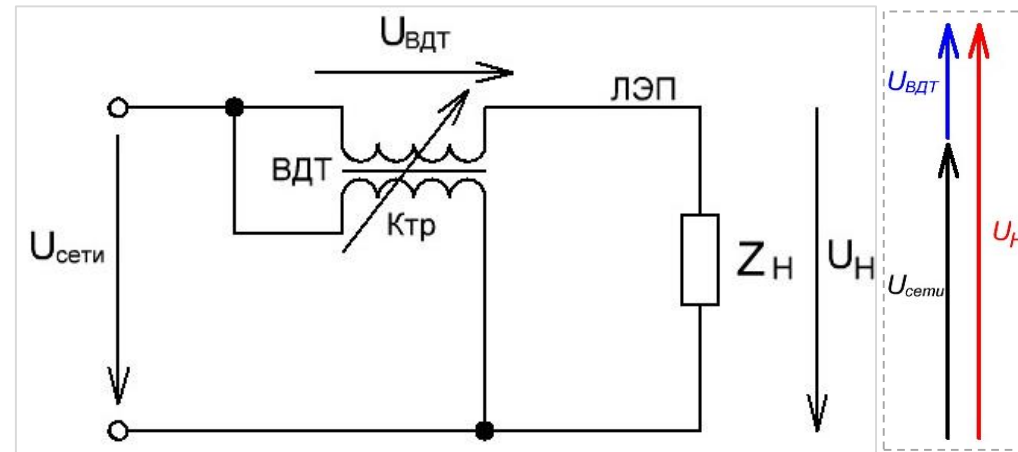


- Проблема низкого напряжения у последнего потребителя в протяженных сетях (0,8 – 2 км) 0,4 кВ не решается на ТП. Напряжение падает на сопротивлении проводов ЛЭП.
- Варианты решения проблемы:
 - реконструкция сети (уменьшение длины ЛЭП, увеличение сечения провода);
 - интеграция в сеть регуляторов - стабилизаторов напряжения на основе вольтодобавки (бустеров).

Эффект применения РСН в ЛЭП 0,4 кВ



РСН на основе вольтодобавочного трансформатора (ВДТ)



РСН разных производителей отличаются подходами к реализации ВДТ с регулируемым коэффициентом трансформации.

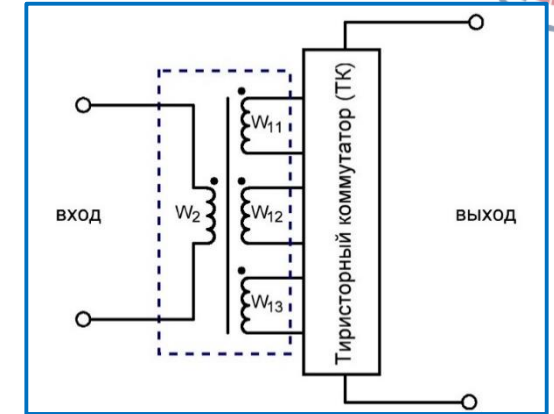
Проектирование современных РСН для ЛЭП

Актуальные задачи проектирования РСН:

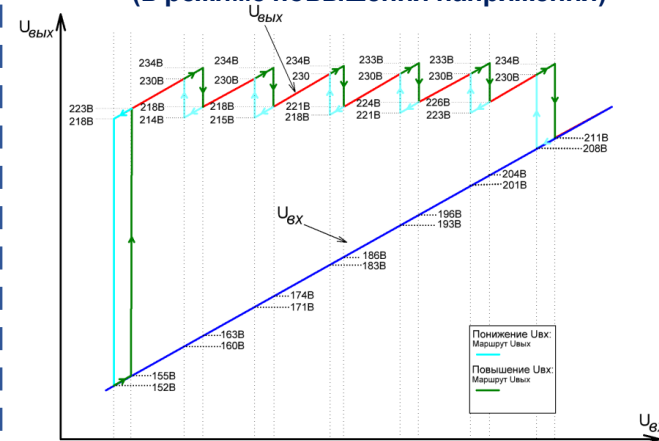
- 1) Обеспечение высокого быстродействия регулирования напряжения.
- 2) Расширение диапазона входных напряжений.
- 3) Гарантия высокого рабочего ресурса (до 25 лет).
- 4) Независимое регулирование напряжений фаз в 3-фазной сети.
- 5) Устойчивость к аварийным режимам: сохранение работоспособности при КЗ и перенапряжениях в сети.
- 6) Уменьшение стоимости владения для заказчика.
- 7) Отечественная компонентная база.
- 8) Интеграция в цифровые сети (МЭК 60870-5-104, МЭК 61850).
- 9) Обеспечение достаточной дискретности регулирования.

Реализация трансформатора с регулируемым коэффициентом трансформации:

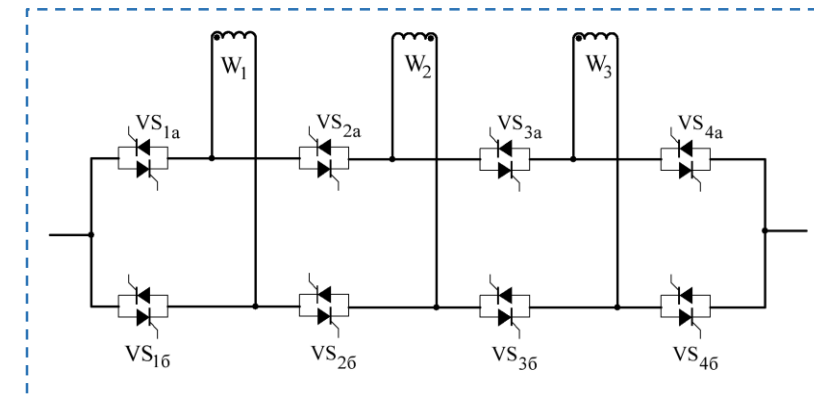
1. Секционирование одной из обмоток трансформатора с гальваническим разделением секций;
2. Применение тиристорных коммутаторов (ТК) для изменения комбинаций включения секций секционированной обмотки.



Регулировочная характеристика РСН (в режиме повышения напряжения)

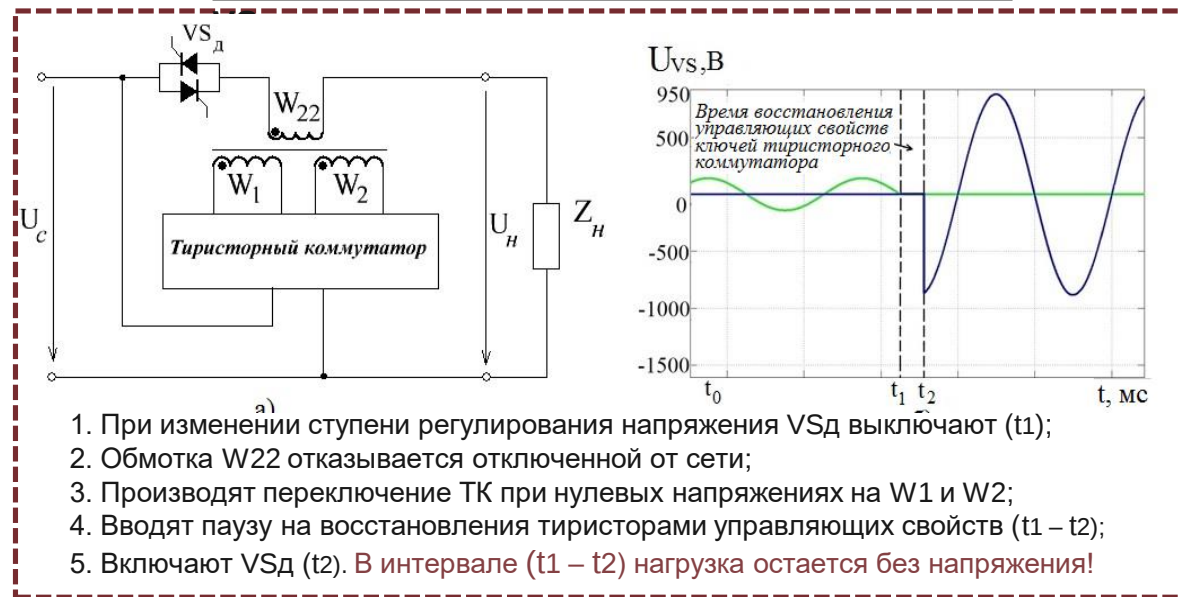


Пример возможной топологии ТК

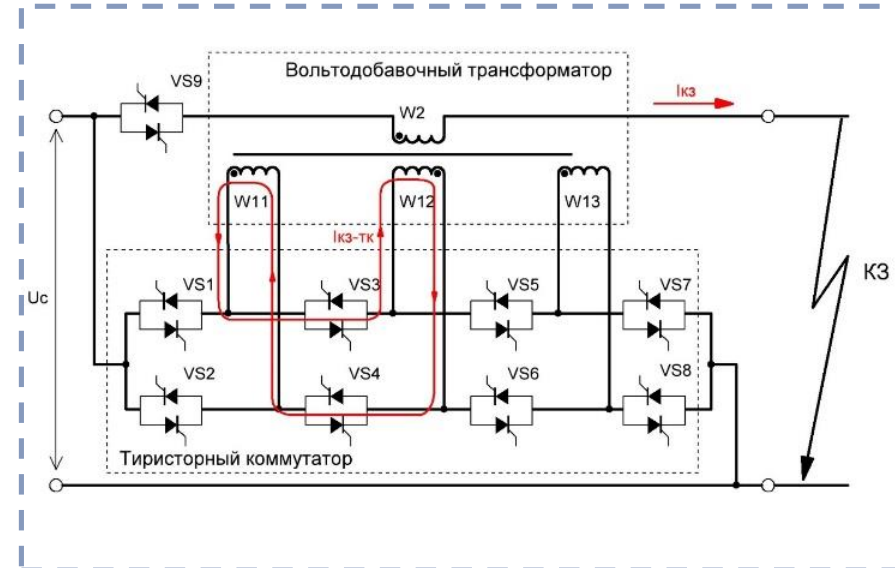


Топологии и алгоритмы управления и защиты РСН

Топология РСН с ВД с дополнительным ДТК –

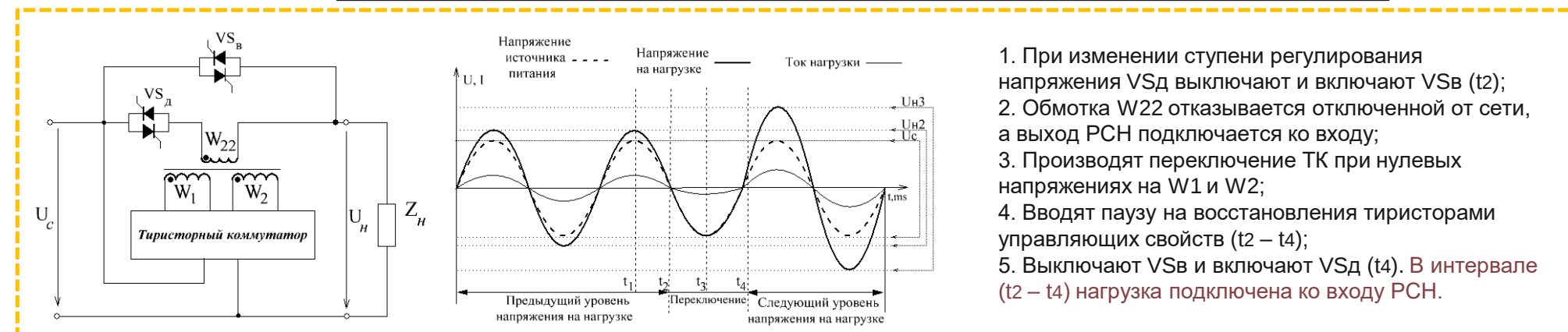


Алгоритм защиты РСН от КЗ в ЛЭП



1. Детектируют ток КЗ в РСН.
2. Переключают комбинацию ДТК в ТК, замыкая накоротко секции секционированной обмотки с максимальным количеством витков. ВДТ работает в режиме тр-ра тока с высоким коэффициентом ослабления до отключения КЗ.

Топология РСН с ВД с дополнительным (VS_d) и вспомогательным (VS_b) ДТК





На базе АО ВО «Электроаппарат» организовано серийное производство трехфазных РСН серии ТТРН-Б на мощности 50, 100, 120, 160 кВт.

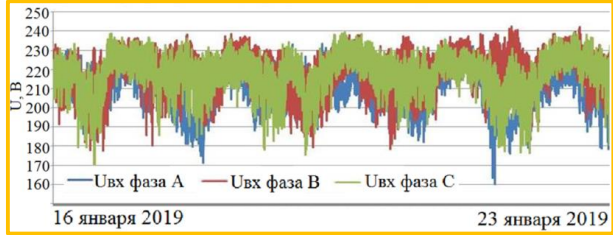


Характеристики РСН

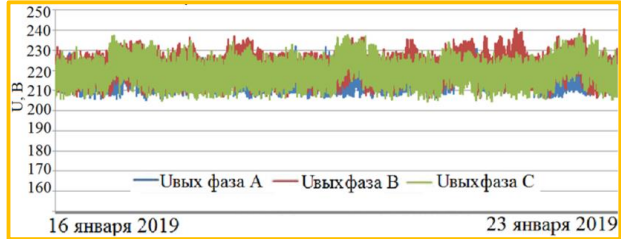
Параметр	Значение
Класс напряжения электрической сети	0,4 кВ
Номенклатурный ряд мощностей нагрузки	50-100-120-160-200 кВт
Диапазон регулирования напряжения	$\pm 40\%$ $U_{ном}$
Тип регулирования	дискретное, пофазное
Тип исполнения	1-фазное / 3-фазное
Быстродействие регулирования	10 мс
Климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69	У, УХЛ, ХЛ(+40/-60 С°)
Категория размещения по ГОСТ 15150-69	1-4
Влияние на качество электроэнергии	отсутствует
Мониторинг состояния работы регулятора	по GSM – каналу с минутным интервалом передачи данных
Алгоритмы функционирования	-автономный; -внешнее управление
Защита от коротких замыканий в ЛЭП	внутренняя

Опыт эксплуатации РСН серии ТТРН-Б на электросетевых объектах

Трехфазное напряжение на входе ТТРН-Б



Трехфазное напряжение на выходе ТТРН-Б



ОПЭ трехфазного ТТРН-Б-100/0,4-3 на объекте АО «ОЭК»

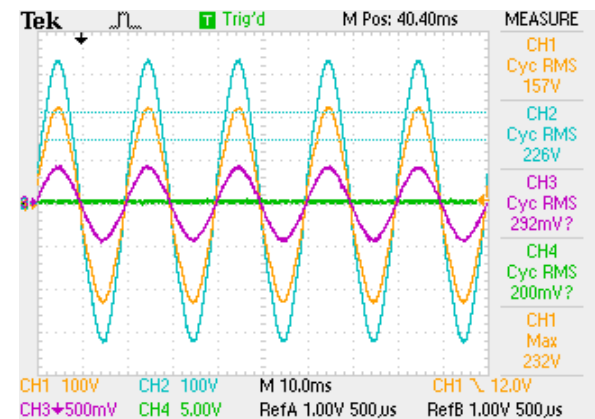


ОПЭ трехфазного ТТРН-Б-100/0,4-3 на объекте Белгородэнерго



ОПЭ трехфазного ТТРН-Б-100/0,4-3 на объекте Ярэнерго

РСН не оказывает влияния на гармонический состав напряжений сети



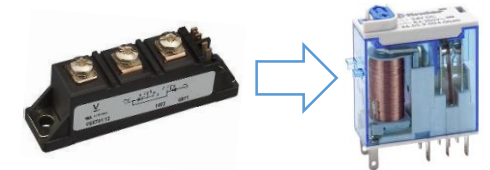
----- входное напряжение,
 ----- выходное напряжение,
 ----- напряжение
 вольтодобавки.

Выводы по результатам организации производства и внедрения РСН:

- ❑ Требуется усиление защиты электронных узлов (особенно, цифровых систем управления) от импульсных перенапряжений, особенно в случае эксплуатации устройств в грозоактивных регионах. Использование стандартных ОПН на входе/выходе оказывается недостаточно.
- ❑ Выбор места установки устройства должен осуществляться расчетным путем, например с использованием специализированного ПО, предоставляемого разработчиком. Установка устройства в неправильно выбранном месте может усугубить ситуацию с ПКЭ.
- ❑ Максимальная токовая защита устройства, реализованная на основе неуправляемого автоматического выключателя, может оказаться неработоспособной в точках установки с низкой мощностью - Ркз.

Потенциал снижения стоимости РСН – замена части тиристорных модулей в составе ТК на реле при условии использования только механического ресурса реле. Возможно реализовать за счёт изменения топологии и алгоритмов управления ТК.

- электрический ресурс реле ~ 10^5 .
- механический ресурс реле ~ 10^7 .



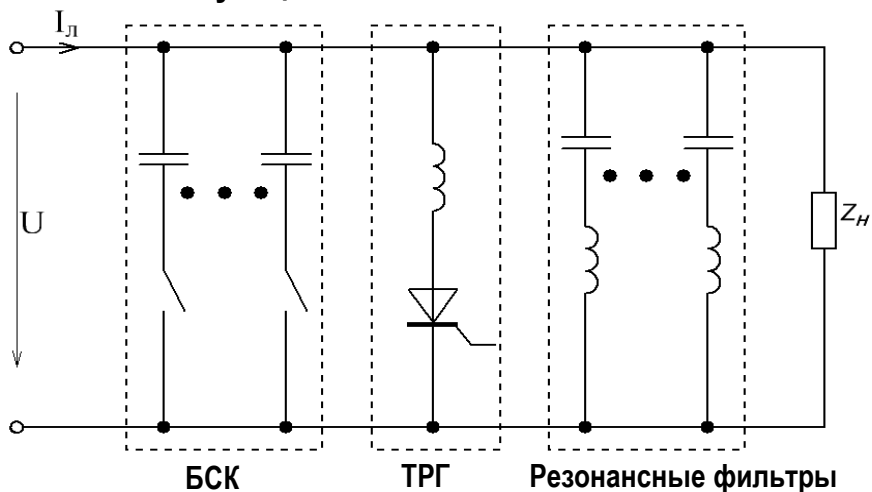
Управляемые источники (компенсаторы) реактивной мощности (УИРМ)



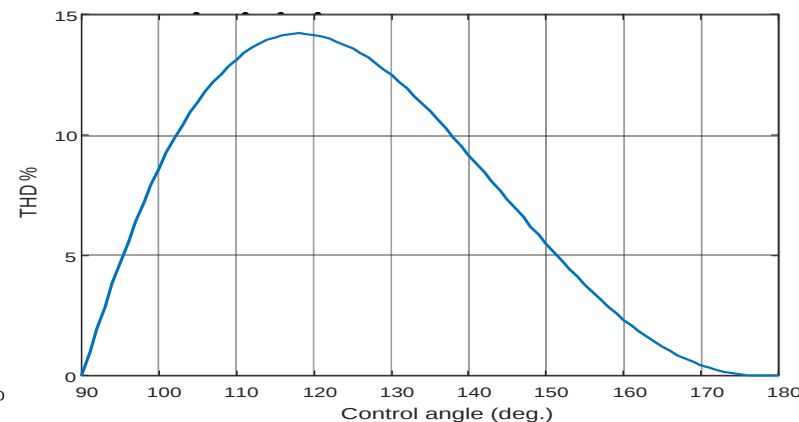
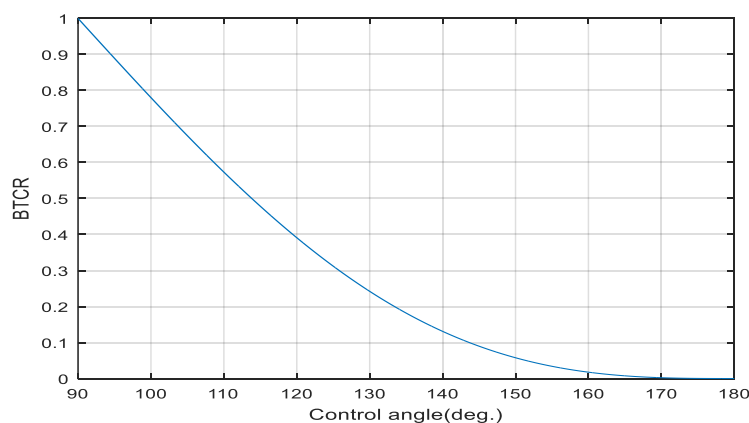
Применение источников и компенсаторов реактивной мощности – эффективный инструмент управления напряжением и уменьшения потерь энергии в электрических сетях.

Классическим примером УИРМ, применяемых в электроэнергетике, является статический тиристорный компенсатор – СТК.

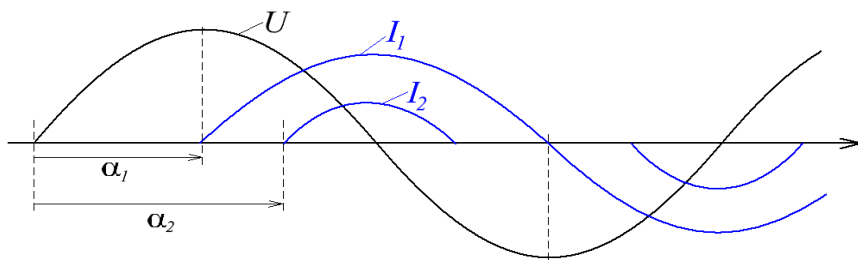
Функциональная схема СТК



Регулировочная характеристика и коэффициент гармоник в токе ТРГ



Принцип регулирования реактивной мощности



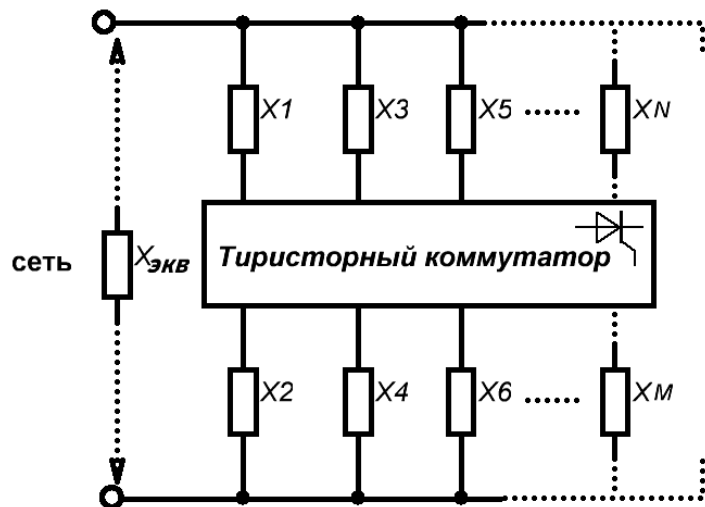
α - фазовый угол опирания тиристора ТРГ

Основные особенности СТК:

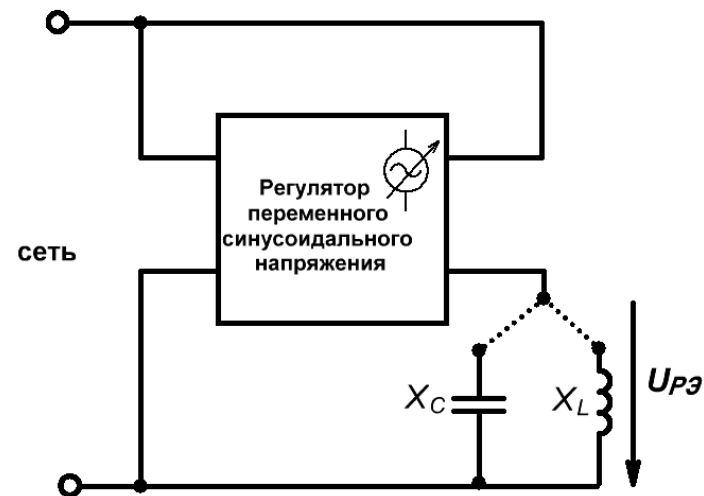
1. Содержат в своём составе: батарею статических конденсаторов (БСК), тиристорно-реакторную группу (ТРГ) и резонансные фильтры.
2. ТРГ генерирует значительный уровень высших гармоник тока – 15%;
3. Требуется применение настроенных резонансных фильтров (увеличение габаритов, стоимости, снижение надёжности).

Разработанные инновационные технологии УИРМ

Технология управления величиной эквивалентного реактивного элемента



Технология управления величиной напряжения на реактивном элементе

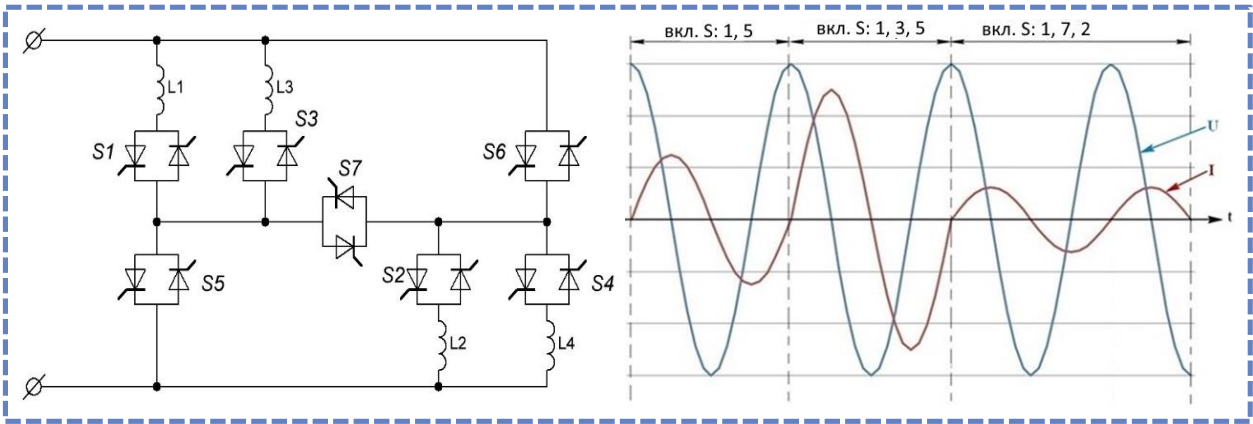


Особенности предложенных технологий построения УИРМ:

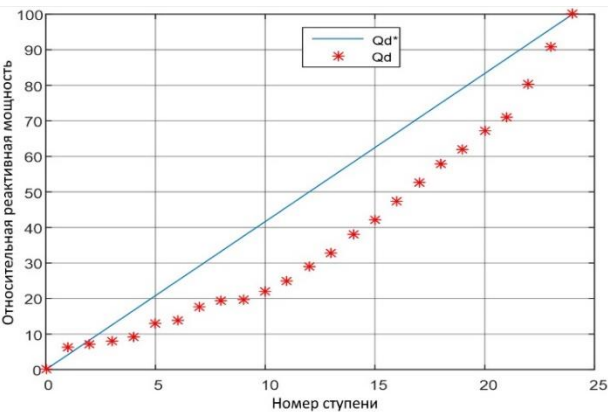
- ❑ Обеспечение синусоидальной формы регулируемого тока без использования фильтров;
- ❑ Высокое быстродействие – управление потоками реактивной энергии в темпе процесса;
- ❑ Высокая дискретность регулирования реактивной мощности;
- ❑ Независимое автоматическое управление реактивной мощностью в каждой фазе электрической сети.

УИРМ на основе технологии управления величиной эквивалентного реактивного элемента

Тиристорно-переключаемая реакторная группа (ТПРГ) на основе 4-х реактивных элементов (РЭ)



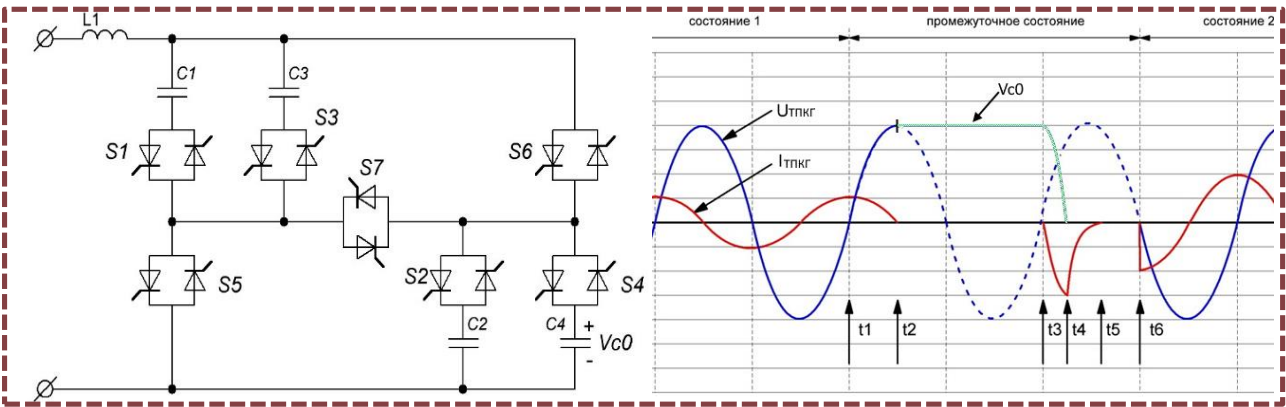
Регулировочная характеристика УИРМ



Алгоритмы управления ТПРГ и ТПКГ имеют существенные различия:

- ключи ТПРГ переключают (выключают и включают) в момент достижения током ДТК (сети) нулевого значения;
- ключи ТПКГ выключают при нулевом токе ДТК, рекуперативно выводят в сеть остаточный заряд конденсаторов и включают ДТК при переходе через нулевое значение напряжения на ТПКГ.

Тиристорно-переключаемая конденсаторная группа (ТПКГ) на основе 4 РЭ



Количество реализуемых ступеней регулирования реактивного сопротивления УИРМ в зависимости от количества РЭ в его составе

Количество РЭ УИРМ	2	3	4	5	6
Количество ступеней регулирования	5	11	25	50	68

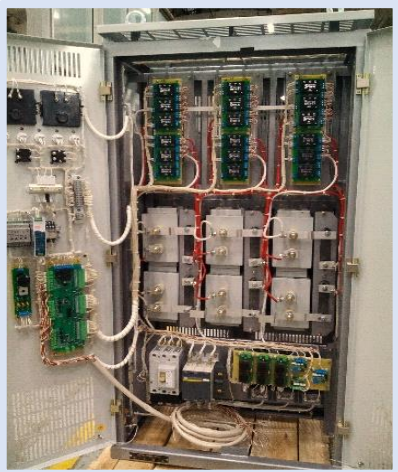
Опытно-промышленные образцы УИРМ 0,4 кВ



Конденсаторные УИРМ 0,4 кВ



200 кВАр



50 кВАр

Реакторный ПРРМ 0,4 кВ



200 кВАр

Технология УИРМ разработана АО «ЭНИН» и НИУ «МЭИ» в рамках реализации ФЦП Минобрнауки РФ и НИОКР ПАО «Ленэнерго». Индустриальный партнер проекта и производитель УИРМ – ПАО «Электровыпрямитель».

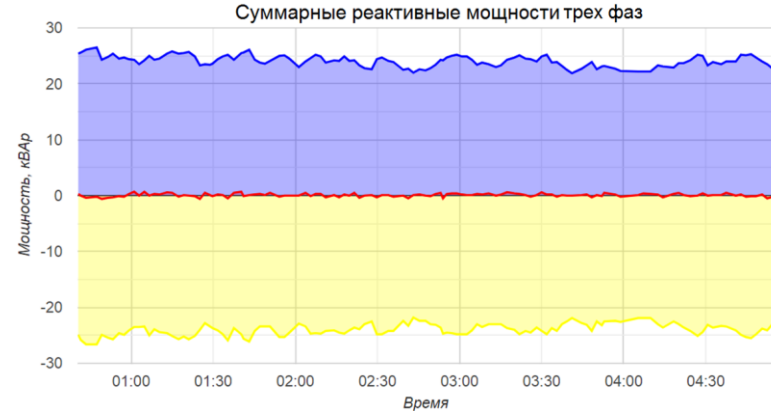
Характеристики компенсаторов реактивной мощности на основе тиристорно-переключаемых схем:

Технические параметры	ПРРМ 0,4-(50)	ПРРМ 0,4-(±200)
Электропитание	0,4 кВ, 50 Гц	0,4 кВ, 50 Гц
Максимальная мощность (суммарно по 3 фазам)	50 кВАр	200 кВАр
Номинальный ток в фазе	72 А	300 А
Количество дискретных уровней регулирования реактивной мощности	32/0	25/25
Дискретность регулирования реактивной мощности, не более	1,56 кВАр	8 кВАр
Отсутствие высших гармоник во всём диапазоне регулирования реактивной мощности; Управление – цифровое (автономное или дистанционное); Климатическое исполнение – УХЛ 4		

Опытно-промышленная эксплуатация УИРМ (ПРРМ) 0,4 кВ



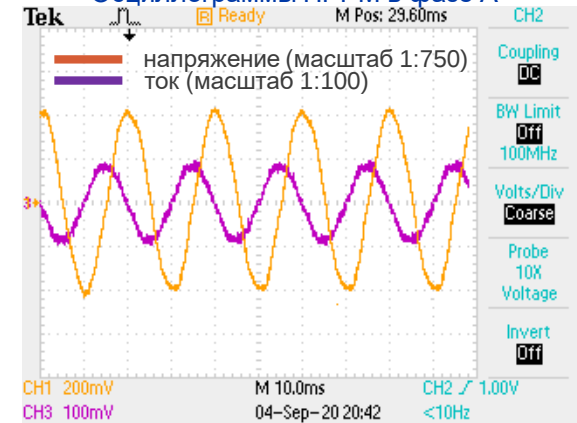
Опытно-промышленный образец ПРРМ 50квар на объекте опытно-промышленной эксплуатации в ПАО «Россети Ленэнерго»



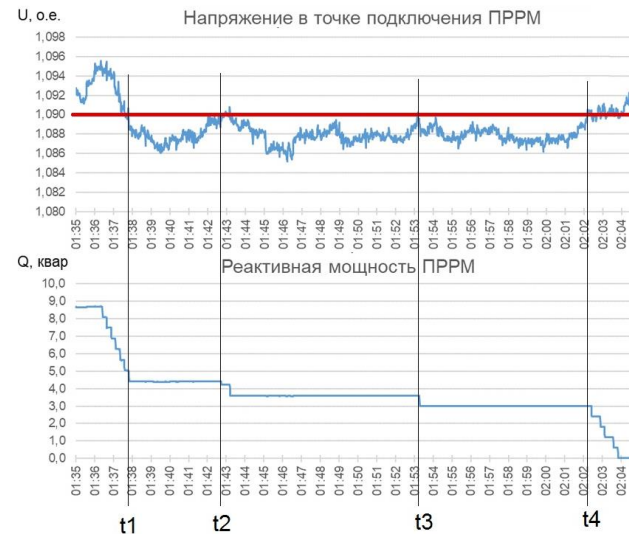
- Суммарная реактивная мощность сети (Q_{abc} сети), кВАр
- Суммарная реактивная мощность ПРРМ (Q_{abc} ПРРМ), кВАр
- Суммарная реактивная мощность нагрузки (Q_{abc} нагрузки), кВАр

Реактивная мощность в сети после установки ПРРМ снижена до нулевого уровня, при сохранении синусоидальной формы тока сети.

Осциллограммы ПРРМ в фазе А



Эффективное функционирование ПРРМ в активно-адаптивной сети предполагает работу ПРРМ с использованием адаптивных алгоритмов управления.



Реакция ПРРМ на превышение напряжением предустановленной уставки 109% Уном: прекращается минимизация реактивной мощности, включается алгоритм ограничения напряжения.

Динамика переключения ступеней ПРРМ в автоматическом режиме



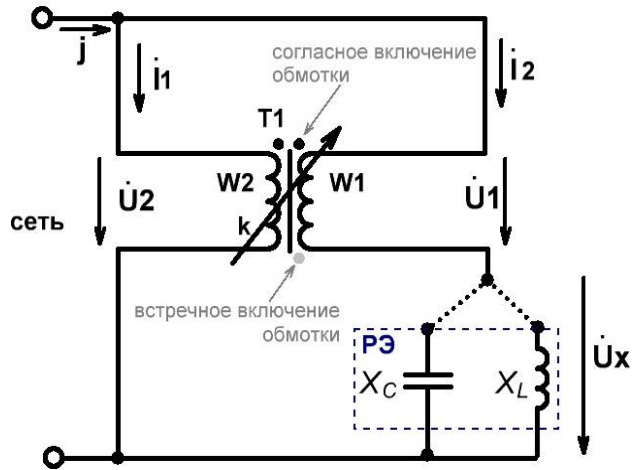
В режиме автоматической компенсации ПРРМ совершает до 4-5 переключений в минуту. Механические контакторы исчерпали бы электрический ресурс в течение 1 года.

Преимущества активно-адаптивного управления ПРРМ:

- Повышение надежности и эффективности функционирования электрической сети;
- Интеграция в сеть «необслуживаемого», энергоэффективного оборудования;
- Сокращение совокупной стоимости владения применяемого оборудования и технологий;
- Интеллектуализация устройств управления режимами работы энергосистемы за счет развития «цифровых» и «активных» элементов электрической сети;
- Развитие мультиагентных технологий управления.

УИРМ на основе технологии управления величиной напряжения на реактивном элементе

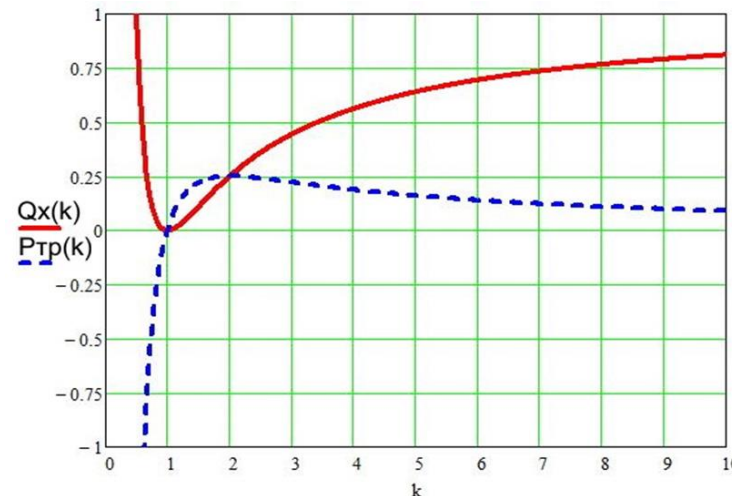
Топология построения УИРМ



Математическая модель УИРМ с согласным включением обмоток трансформатора

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= k \dot{U}_1; & (1) & & j &= j \frac{\dot{U}_2}{X} * \frac{(k-1)^2}{k^2}; & (7) \\ \dot{U}_x &= \dot{U}_2 - \dot{U}_1; & (2) & & \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 * \frac{1}{k}; & (8) \\ i_2 &= \frac{i_1}{k}; & (3) & & \dot{U}_x &= \dot{U}_2 * \frac{k-1}{k}; & (9) \\ j &= i_1 + i_2, & (4) & & S &= P - jQ = \tilde{J} * \dot{U}_2 = -j \frac{U_2^2}{X} * \frac{(k-1)^2}{k^2}, & (10) \\ i_1 &= j \frac{\dot{U}_2}{X} * \frac{k-1}{k}; & (5) & & Q_x &= U_x * I_1 = \frac{U_2^2}{X} * \frac{(k-1)^2}{k^2}; & (11) \\ i_2 &= j \frac{\dot{U}_2}{X} * \frac{k-1}{k^2}; & (6) & & \dot{U}_1 * \tilde{I}_1 &= -\dot{U}_2 * \tilde{I}_2 = -j \frac{U_2^2}{X} * \frac{k-1}{k^2}, & (12) \end{aligned}$$

Регулировочная характеристика УИРМ с согласным включением обмоток трансформатора



k – коэффициент трансформации тр-ра Т1.
 Q_x – реактивная мощность РЭ, нормированная к номинальной мощности РЭ.
 $P_{тр}$ – мощность трансформатора, нормированная к мощности РЭ (не превышает 25% Q_x).

Опытный образец однофазного УИРМ 5 МВАр 10 кВ

Параметры опытного образца	
Номинальная мощность	5 МВА
Класс напряжения питающей сети	10-35 кВ
Частота питающей сети	50 Гц
Гармонический состав напряжений и токов во всём диапазоне регулирования реактивной мощности	Высшие гармоники отсутствуют
Принцип регулирования	Дискретный (18 ступеней регулирования)
Быстродействие	20 мс



Трансформатор 1 МВА



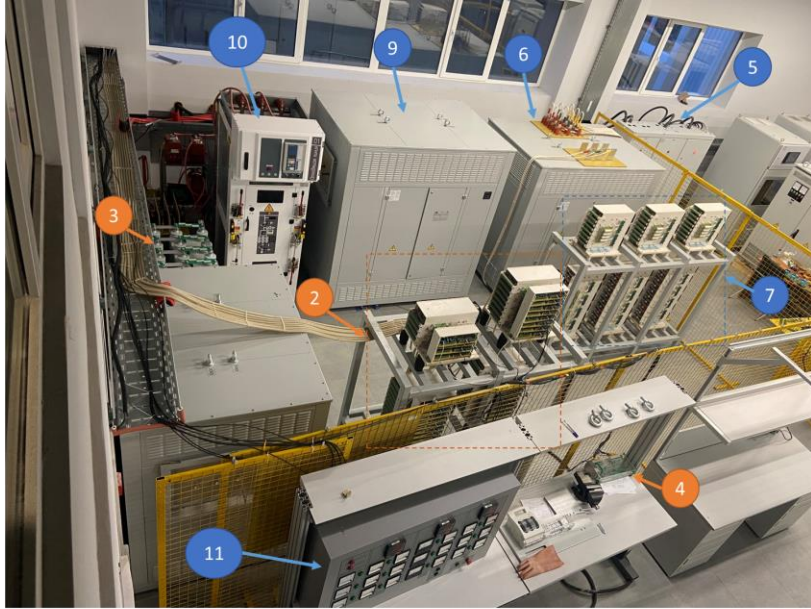
БСК 5Мвар



Тиристорный коммутатор 1 МВА

Опытный образец УИРМ в составе экспериментального стенда Центра энергетической электроники НИУ «МЭИ»

Внутри помещения



На улице



Обозначения на рисунке:

- 1 – трансформатор опытного образца КРМ;
- 2 – полупроводниковый коммутатор опытного образца КРМ;
- 3 – реактивный элемент опытного образца КРМ;
- 4 – система управления опытного образца КРМ;
- 5 – вводной щит питания экспериментального стенда;
- 6 – трансформатор с секционированной обмоткой 0,4/0,4 кВ 1МВА экспериментального стенда;
- 7 – полупроводниковый коммутатор для трансформатора п.6;
- 8 – регулятор напряжения 0,4/0,4 кВ 100 кВА (РТТМ) экспериментального стенда;
- 9 – повышающий трансформатор 0,4/10 кВ экспериментального стенда;
- 10 – КСО экспериментального стенда;
- 11 – панель мониторинга и управления.

Симметрирование режимов работы ЛЭП

Причины возникновения несимметричных режимов работы сети:

Изменение во времени напряжений в узлах распределительной сети;

Неравномерное распределение нагрузок по фазам распределительной сети.

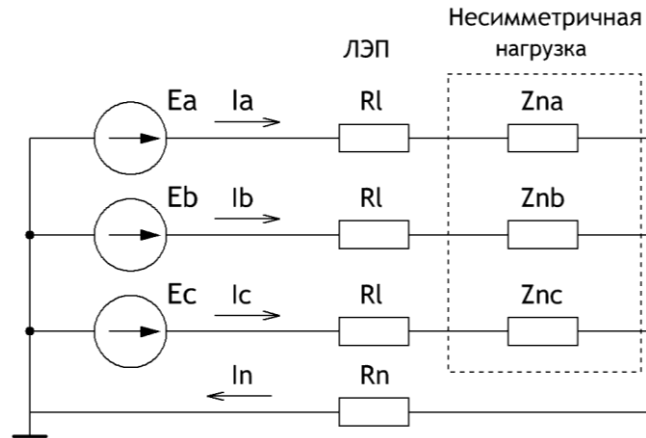
Цели устранения несимметричных режимов работы сети:

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.



Чувствительные к несимметрии ПКЭ:

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

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

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%

Симметричные составляющие токов сети:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{(0)} + \dot{I}_{(1)} + \dot{I}_{(2)}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c)$$

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = \frac{\dot{I}_n}{3}$$

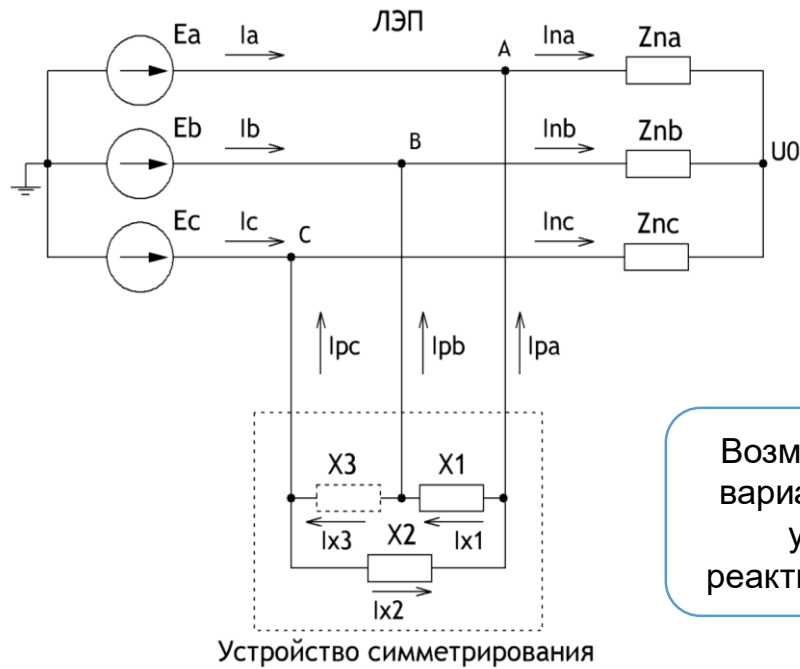
Полная мощность, потребляемая от генератора, определяется только токами прямой последовательности:

$$\sum_{i=1}^3 \tilde{S} = \sum_{i=1}^3 \dot{E}_i \dot{I}_i^* = 3 \dot{E} \dot{I}_{(1)}^*$$

Мощность потерь в сети определяется всеми симметричными составляющими тока:

$$\begin{aligned} P_{\text{потерь}} &= 3(R + R_n) \dot{I}_{(0)}^2 + 3R |\dot{I}_{(1)}|^2 + 3R |\dot{I}_{(2)}|^2 \\ &= P_{\text{потерь}(0)} + P_{\text{потерь}(1)} + P_{\text{потерь}(2)} \end{aligned}$$

Технология симметрирования для трехпроводных ЛЭП

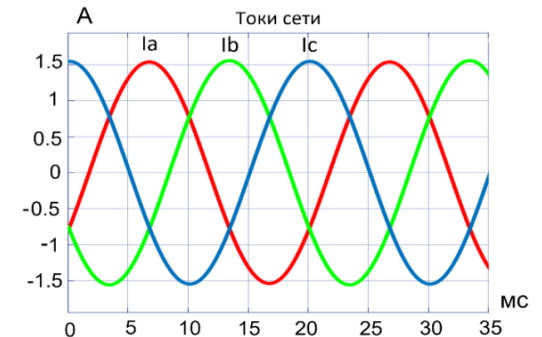
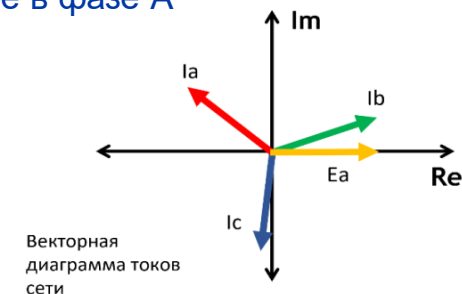
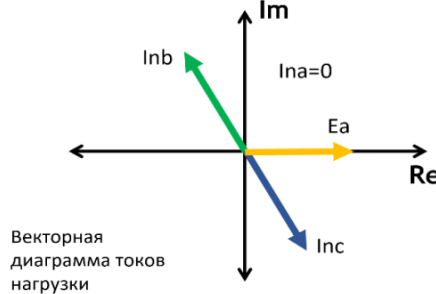


Возможны различные варианты реализации управляемых реактивных элементов.

Для симметрирования режима работы трехпроводной ЛЭП устройство симметрирования может строиться на основе двух управляемых реактивных элементов $X1$, $X2$ подключенных к линейным напряжениям.

Для обеспечения дополнительной компенсации реактивной мощности в ЛЭП необходимо использовать третий управляемый реактивный элемент - $X3$.

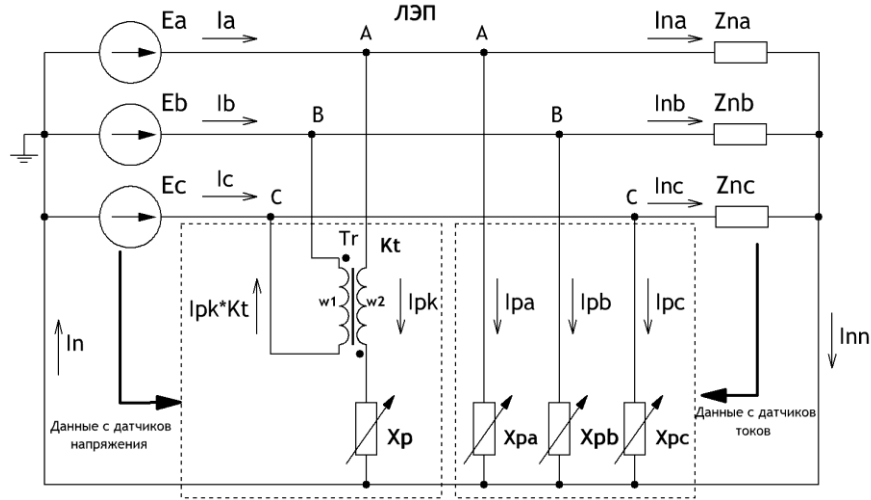
Симметрирование режима работы ЛЭП с помощью УС при обрыве в фазе А



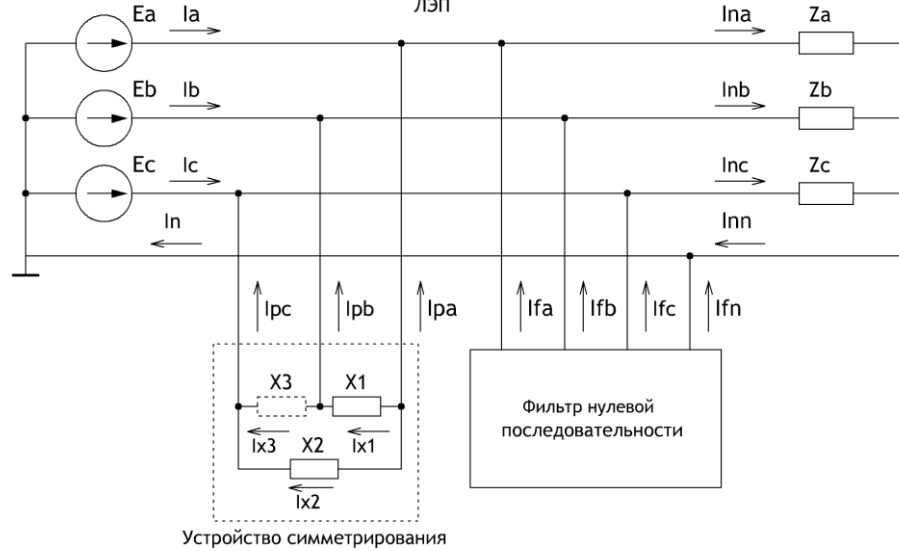
УС формирует такую систему токов, чтобы токи в фазах ЛЭП были одинаковы по модулю, имели одинаковый угол сдвига фаз относительно соответствующих напряжений при симметрировании и нулевой угол сдвига фаз при дополнительной компенсации реактивной мощности.

Технологии симметрирования для четырехпроводных ЛЭП

Технология 1: универсальный регулятор мощности

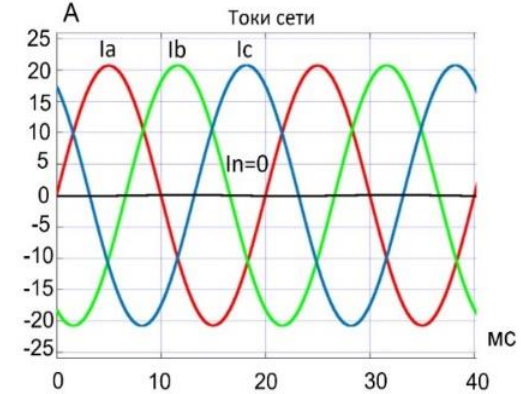
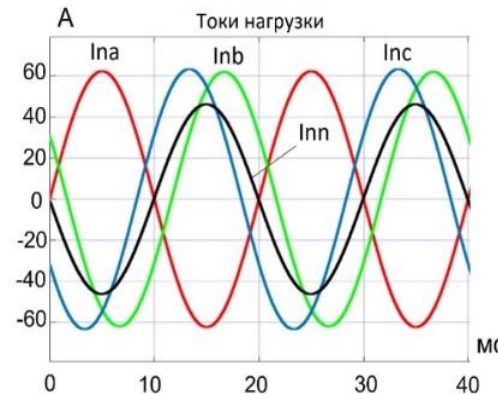
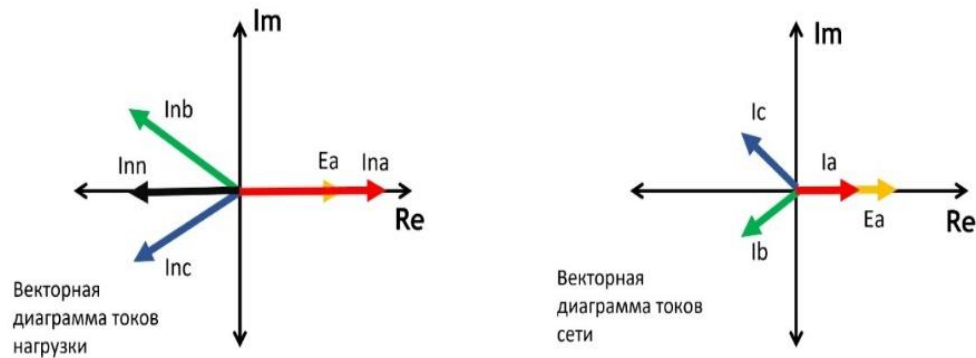


Технология 2: устройство симметрирования с фильтром нулевой последовательности



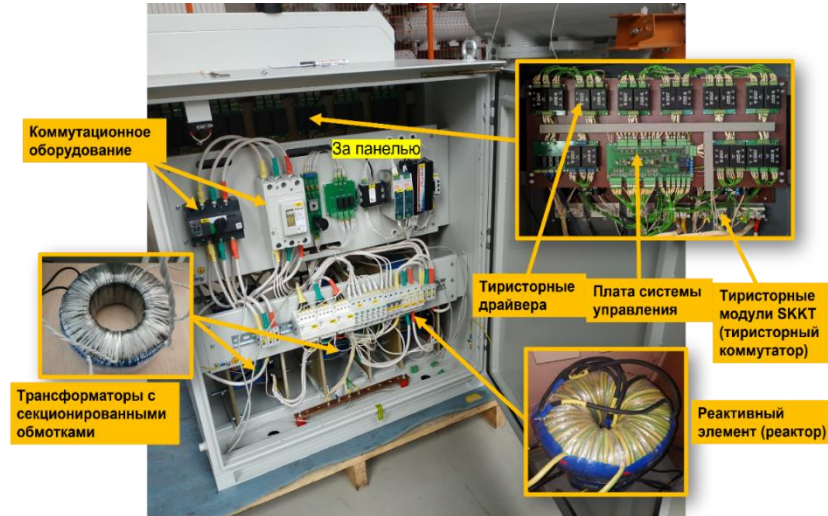
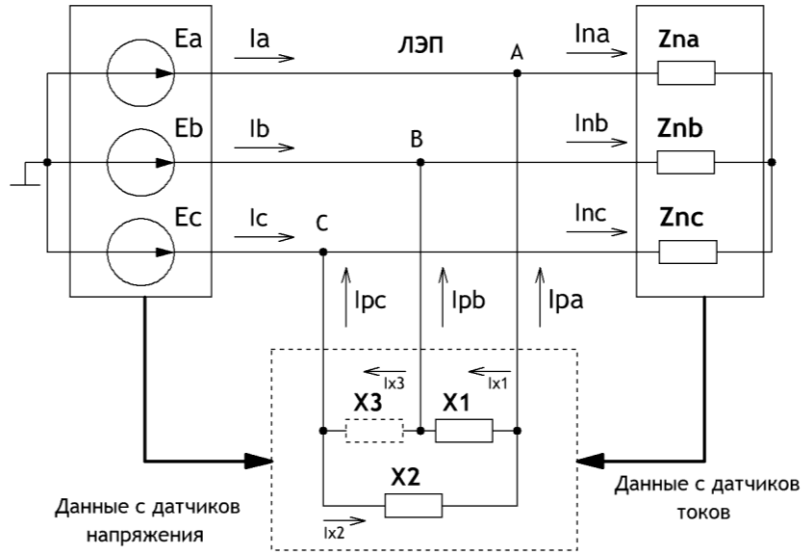
Фильтр нулевой последовательности – трансформатор специального исполнения, компенсирующий токи нулевой последовательности сети.

Эффект применения технологий 1 и 2 при симметрировании токов в 4-х проводной сети

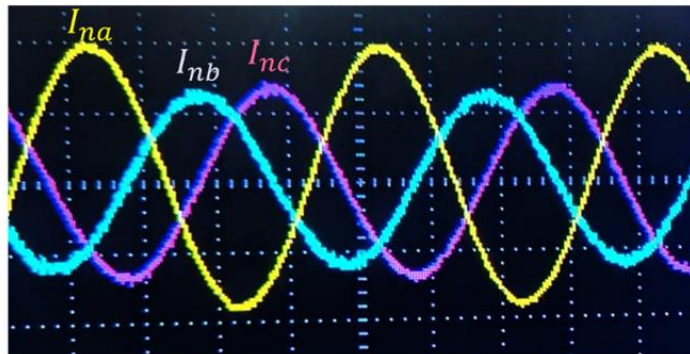


Практическая реализация устройств симметрирования

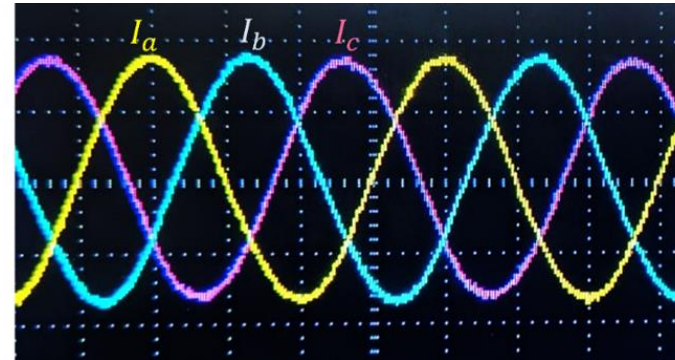
Макет устройства симметрирования 50 кВА для ЛЭП 0,4 кВ



Технический эффект применения устройства симметрирования



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



Симметричная система токов сети I_a , I_b , I_c

Фазоворотные устройства (ФПУ) с тиристорными коммутаторами

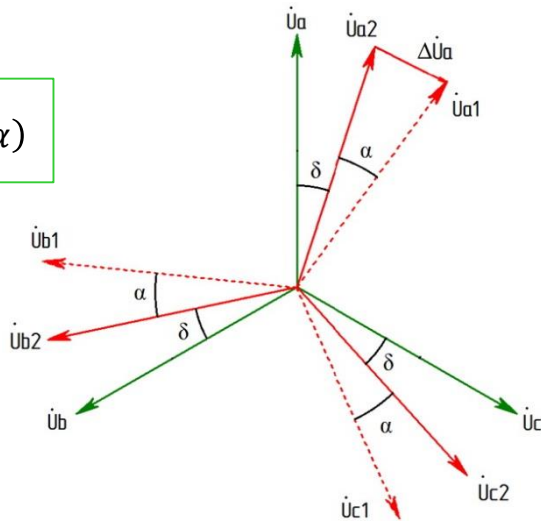
Задачи ФПУ в активно-адаптивной сети:

1. Управляемое перераспределение потоков энергии в сложных замкнутых электрических сетях;
2. Увеличение пропускной способности отдельных сечений энергосистемы;
3. Ограничение перегрузок линий электропередачи, шунтированных ЛЭП высшего напряжения;
4. Снижение транспортных потерь энергии.

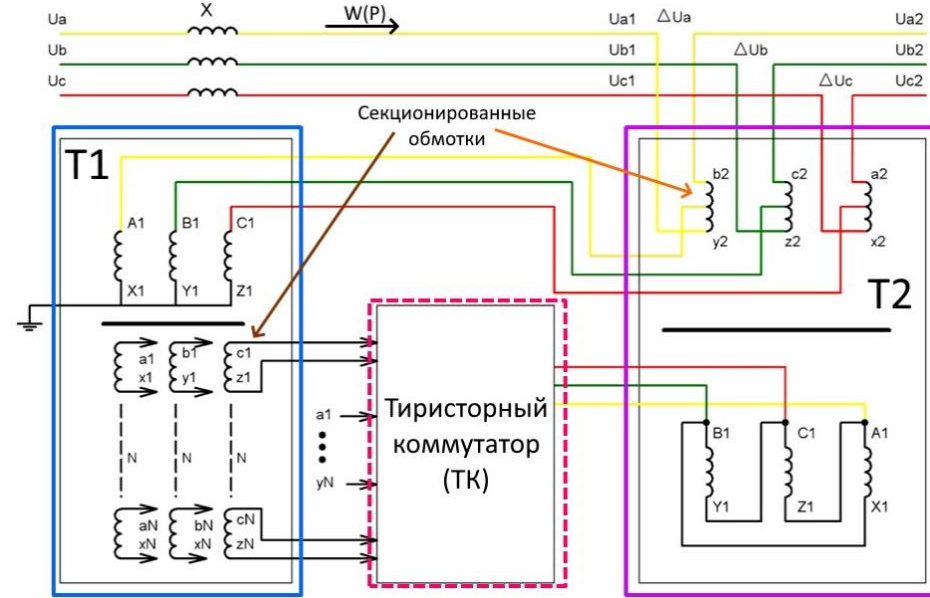
Векторная диаграмма напряжений ФПУ

Мощность потока энергии в ЛЭП:

$$P = \frac{U_{a2} \cdot U_a}{X} \cdot \sin(\delta + \alpha)$$

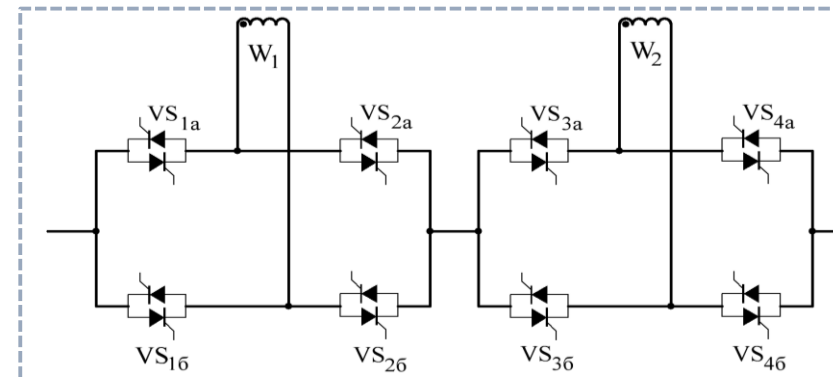


Топология ФПУ со средней точкой серийного трансформатора



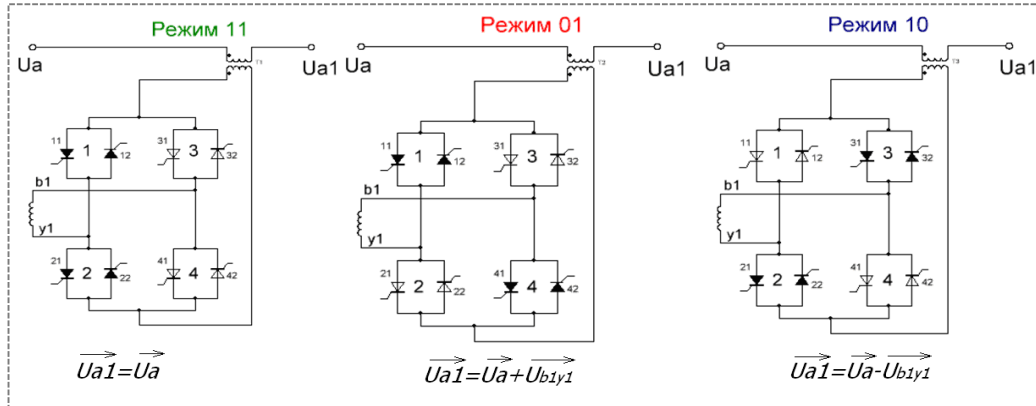
T1 – параллельный (шунтовой) трансформатор
T2 – вольтдобавочный (серийный) трансформатор (ВДТ)

Базовая топология ТК (мост) для переключения секций шунтового трансформатора T1



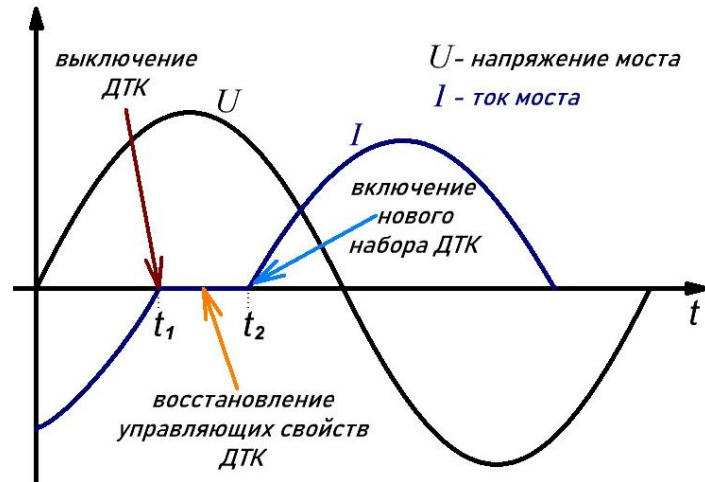
Алгоритмы управления тиристорными коммутаторами ФПУ

Режимы работы тиристорных мостов ТК ФПУ

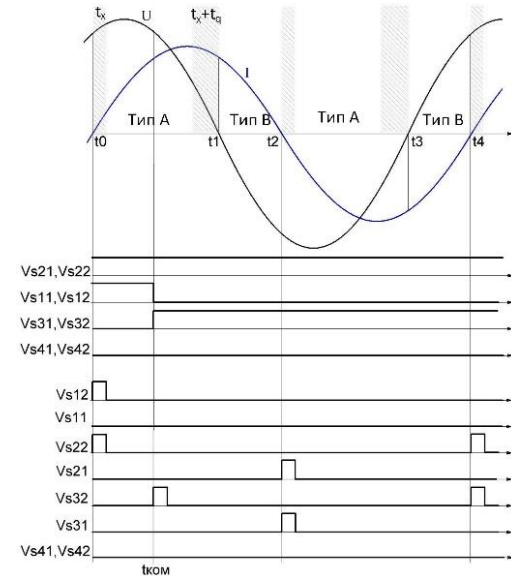


режим 11 – исключение секции из контура формирования ВД;
режим 01 – согласное включение секции в контур формирования ВД;
режим 10 – встречное включение секции в контур формирования ВД.

Переключение ТК с выключением ДТК в нуле



Переключение ТК на «разрешенных» интервалах



Типы «разрешенных» интервалов:

- тип А – ток моста и напряжение, подводимое к мосту, имеют один знак;
- тип В – ток моста и напряжение, подводимое к мосту, имеют противоположные знаки.

Поключевая коммутация – синхронное управление ООТ в ДТК;

Повентильная коммутация – раздельное управление ООТ в ДТК.

tq – время восстановления управляющих свойств тиристора;

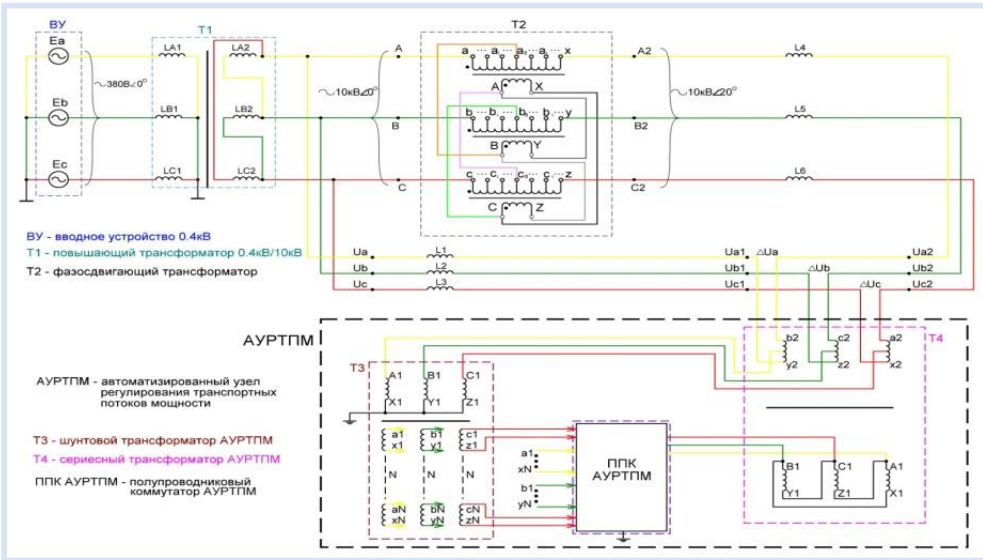
tx – длительность коммутации.

Особенности:

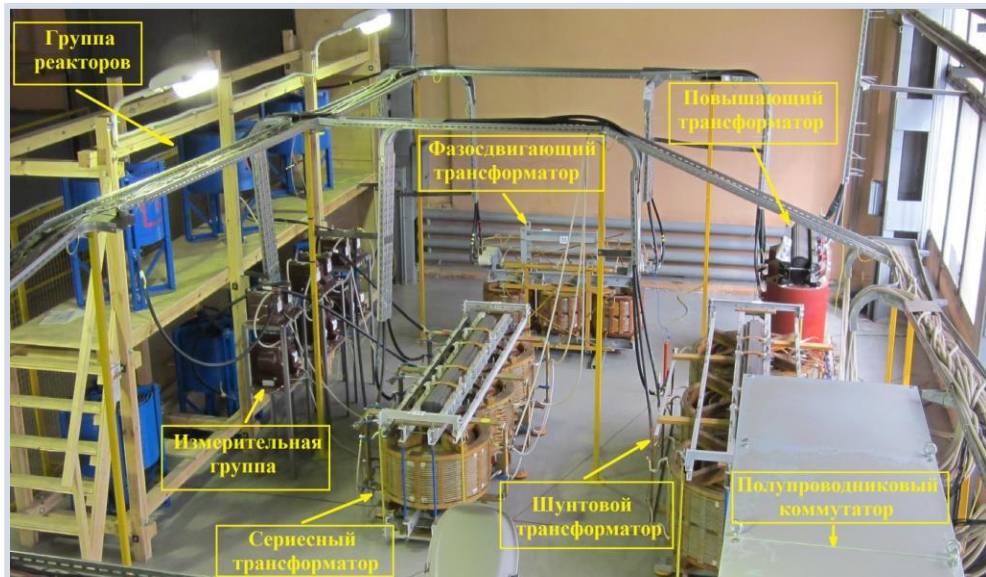
1. Переключение ТК в нуле тока реализуется при любом фазовом сдвиге тока ЛЭП, однако приводит к перенапряжениям на ДТК мостов;
2. Переключение ТК на «разрешенных» интервалах не приводит к перенапряжениям на ДТК, при этом реализуется только при наличии интервала требуемого типа (А или В).
3. Наиболее эффективны стратегии многокритериального выбора способа переключения ТК, комбинирующие п.1 и п.2.

Физическая модель ФПУ с моделью сети 10 кВ - 1 МВА

Схема установки



Общий план установки



Система управления ФПУ



Фаза полупроводникового коммутатора ФПУ



Назначение установки:

- Исследование электромагнитных процессов в управляемых полупроводниковых устройствах продольной компенсации в условиях максимально приближенных к реальным;
- Верификация аналитических моделей управляемых устройств продольной компенсации и отработка алгоритмов их работы.

Особенности:

- Возможность задания параметров линии электропередачи, характерных для конкретного места установки устройств продольной компенсации;
- Анализ работы и отладка программно-аппаратного обеспечения систем управления устройств продольной компенсации в реальном масштабе времени.

Параметры установки:

- Номинальная установленная мощность 400 кВА
- Электропитание стенда 3-х фазная сеть 380 В, 630 А.
- Номинальное рабочее напряжение АУРТПМ 10 кВ.
- Диапазон изменения фазового сдвига выходного напряжения АУРТПМ ± 20 эл.град.
- Имитация работы линии электропередачи с возможностью регулирования ее параметров: напряжение на концах ЛЭП $10 \text{ кВ} \pm 6\%$ с фазовым сдвигом ± 20 эл.град, реактивное сопротивление ЛЭП 20 – 40 Ом.

Заказчик работы – Минобрнауки РФ
 (Соглашение 14.579.21.0045 на период 2014 - 2016 г.г.)

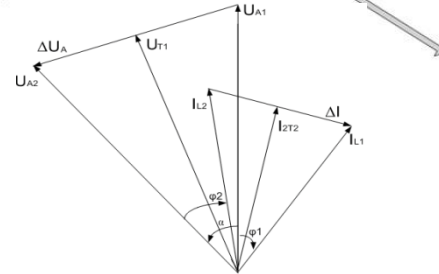
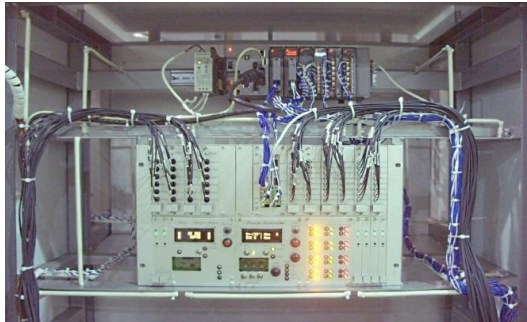
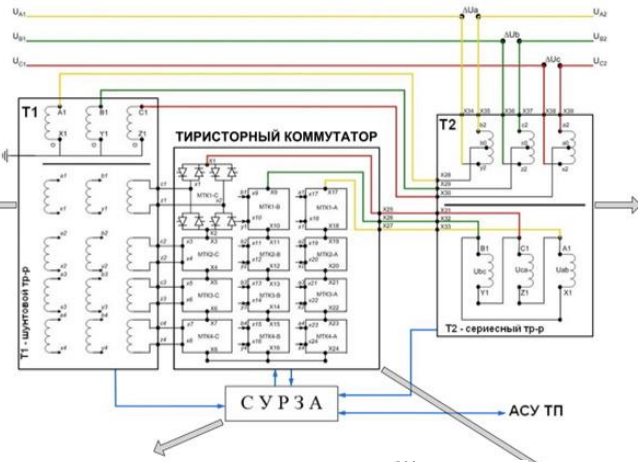
Исполнитель – АО «ЭНИН»

Соисполнитель – НИУ «МЭИ»

Индустриальный партнер -

ООО «Тольяттинский трансформатор»

Тиристорное фазоповоротное устройство 300 МВА для ВЛ 220кВ



Заказчик ФПУ – ПАО «ФСК ЕЭС»
Сроки выполнения НИОКР:
 июнь 2011г. – май 2014г.

Участники проекта:

1. АО «ЭНИН»;
2. НИУ «МЭИ»;
3. ООО «Тольяттинский трансформатор»;
4. ПАО «Электровыпрямитель»;
5. ООО «Институт «Энергосетьпроект».

Параметры ФПУ:

- Номинальная мощность104 МВА
- Пропускная мощность300 МВА
- Номинальное напряжение линии.....220 кВ
- Длительно допустимый ток линии787 А
- Номинальная частота сети50 Гц
- Диапазон регулирования фазового сдвига напряжения..... ±20 град.эл.
- Дискретность регулирования фазового сдвига.....1,33 град.эл.
- Время регулирования.....не более 0,02 с.

Режимы работы на объекте установки:

- Устранение токовых перегрузок ВЛ 220 кВ, шунтированных ВЛ 500 кВ в ремонтных и послеаварийных режимах работы сети (*эффект – увеличение ДДП в характерном сечении на 30%*);
- Минимизация транспортных потерь энергии в параллельном транзите 500/220кВ в нормальном режиме работы сети (*эффект – снижение мощности транзитных потерь в среднем на 23%*).

Малогабаритные устройства распределенной продольной компенсации (МУПК)

Задачи устройств продольной компенсации в активно-адаптивных сетях:

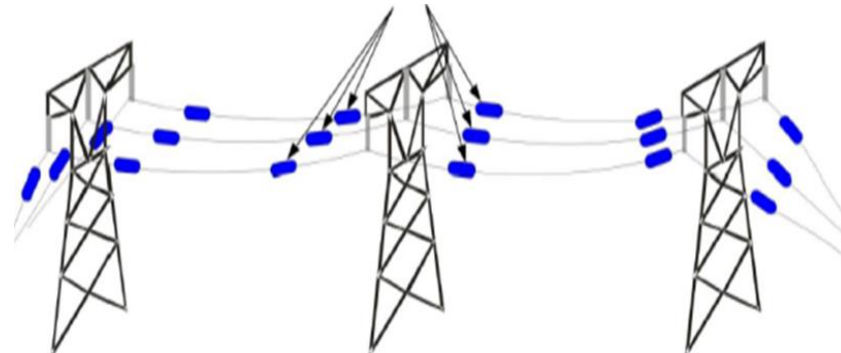
1. Управление реактивным сопротивлением ЛЭП;
2. Повышение пропускной способности и устойчивости работы сети;
3. Управление потоками энергии в ЛЭП.



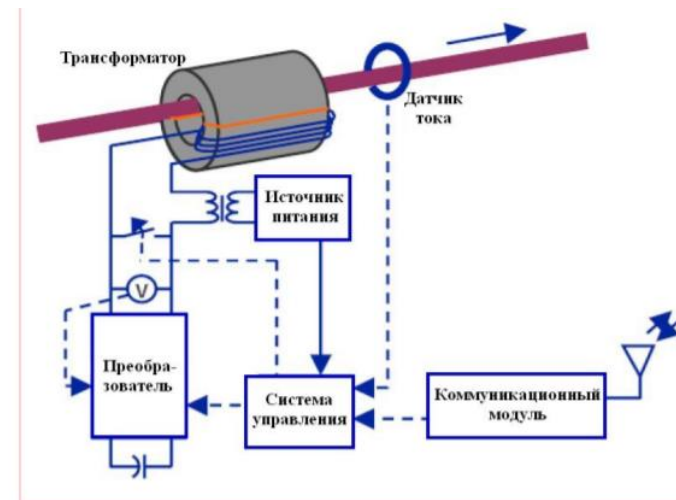
Особенности УУПК в малогабаритном исполнении (технология Smart Wire):

1. Монтаж устройств непосредственно на проводах ВЛ (без нарушения целостности провода);
2. Мобильность, возможность оперативного переноса на другие объекты;
3. Не требуют землеотвода для сооружения.

Иллюстрация концепции МУПК



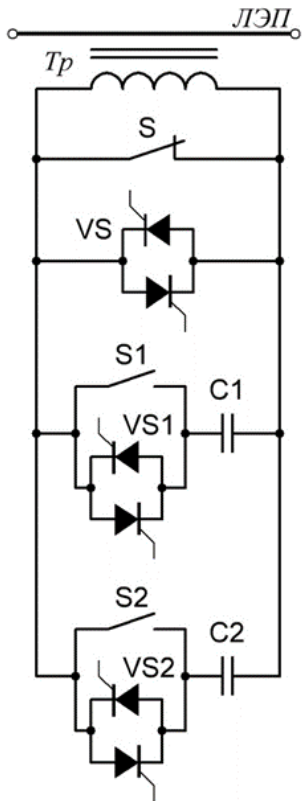
Внутренняя структура МУПК



Малогабаритные УУПК системно применяются в энергосистемах США и Канады.

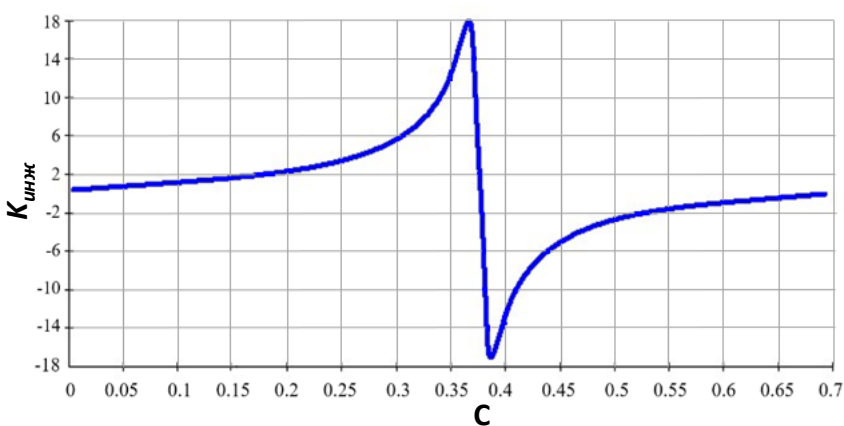


Топология МУПК с двумя конденсаторами



Для питания СУ МУПК энергия отбирается от провода ЛЭП.

Регулировочная характеристика МУПК



Концепция управления: МУПК размещаются на ВЛ группами n*10 – n*100 шт. Управление устройствами осуществляется на основе радиointерфейса ZigBee. Возможность адресного включения и выключения каждого устройства позволяет избежать необходимости организации глубокого регулирования сопротивления каждого устройства.

$$X_{э\kappa\upsilon} = \frac{U_1}{I} = \frac{j \cdot \omega \cdot L_m}{1 - \omega^2 \cdot L_m \cdot C \cdot K_{mp}^2}$$
$$K_{инж} = \frac{X_{э\kappa\upsilon}}{j\omega L_m} = \frac{1}{1 - \omega^2 \cdot L_m \cdot C \cdot K_{mp}^2}$$

$X_{э\kappa\upsilon}$ – эквивалентный реактанс, вносимый МУПК в ЛЭП;
 $K_{инж}$ – «коэффициент инjection» характеризует изменение $X_{э\kappa\upsilon}$ относительно реактивного сопротивления индуктивности намагничивания трансформатора (L_m).

Опытный образец МУПК



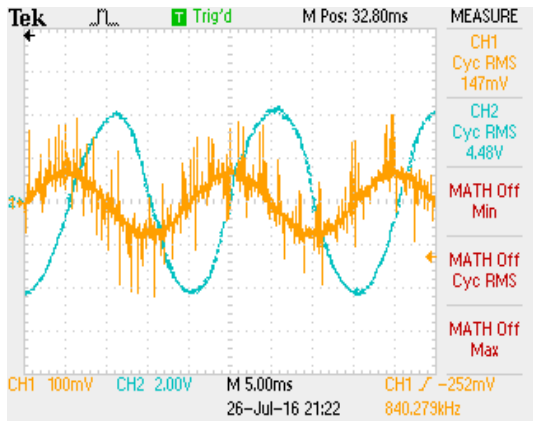
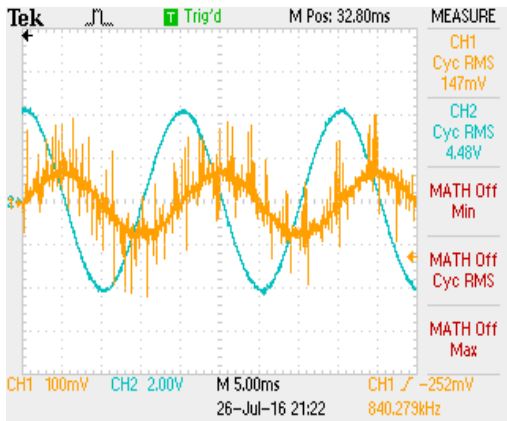
Опытно-промышленная эксплуатация МУПК на ВЛ 110 кВ



Опытные образцы МУПК на объекте ОПЭ



Осциллограммы работы МУПК: ——— ток линии, ——— напряжение, наводимое МУПК на провод



Характеристики опытных образцов МУПК

№ п/п	Режим работы	Условия реализации режима
1	Режим байпас	при любом значении $I_{вл}$
2	Режим введения в ВЛ сопротивления индуктивного характера величиной 7,85 мОм	при $I_{вл}$ от 0,1* $I_{ном}$ до $I_{ном}$
3	Режим введения в ВЛ сопротивления индуктивного характера величиной 15,7 мОм	при $I_{вл}$ от 0,1* $I_{ном}$ до 0,5* $I_{ном}$
4	Режим введения в ВЛ сопротивления емкостного характера величиной 15,7 мОм	при $I_{вл}$ от 0,1* $I_{ном}$ до 0,5* $I_{ном}$

Электрические параметры

Класс напряжения ВЛ	220 кВ
Диапазон изменения тока ВЛ	0 – 750 А
Номинальный ток ВЛ	750 А
Максимальный ток ВЛ	1,3
Ударный ток короткого замыкания в фазе ВЛ	110 кА

Климатические параметры

Колебания температуры окружающей среды	от –45 до + 40 С
Ветровая нагрузка	не более 29 м/с

Конструктивные параметры

Диаметр фазного провода ВЛ	15 – 27 мм
Геометрические размеры	1400x160x140 (мм)
Масса	50 кг

Спасибо за внимание!

Контакты:

Зав. каф. ПЭ, д.т.н. – Асташев Михаил Георгиевич
E-mail: AstashevMG@mpei.ru тел. +79262812281