



**Восстановление качества электроэнергии
высоковольтной сети с несимметричной нелинейной
нагрузкой пофазно управляемыми статическими
компенсаторами электромагнитного типа.**

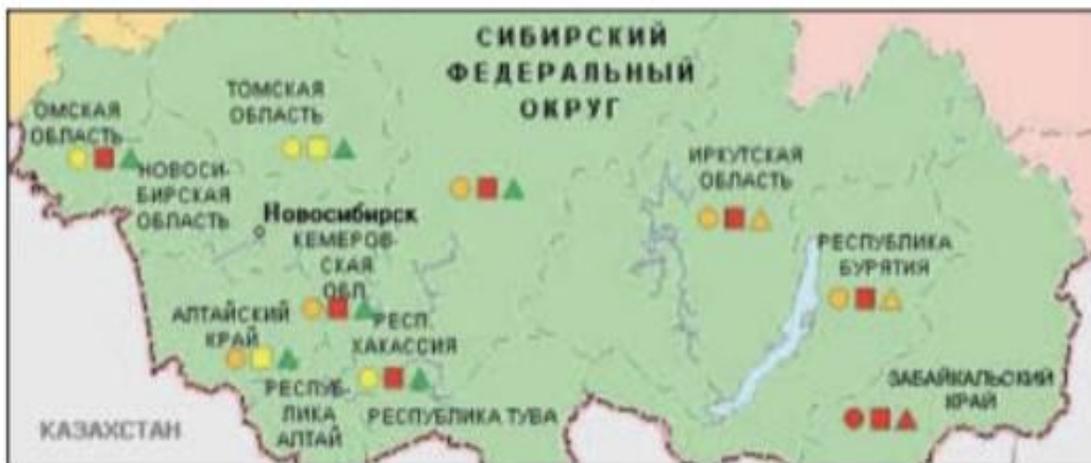
**Доклад ООО «Электросетевые компенсаторы»
на Президиуме Научно-технического совета
ПАО «РОССЕТИ», 06.06.2022 г.**



Актуальность проблемы

В регионах опережающего развития Сибири и Дальнего Востока протяжённых электрических сетей значительную долю составляет промышленная нагрузка и подвижной состав железной дороги. Как следствие, нарушения ГОСТ 32144 - 2013 имеют « ... массовый и систематический характер во многих энергосистемах... » по следующим показателям:

- dU - медленные отклонения напряжения;
- K2u - несимметрия напряжений и токов;
- Ku - высшие гармоники.



Условные обозначения:

- — отклонение напряжения,
- — несинусоидальность напряжения,
- △ — несимметрия напряжений по обратной последовательности.

Цвета значков обозначают нарушения:

- — на большинстве объектов региона,
- — в отдельных энергорайонах региона,
- — на отдельных объектах региона,
- — не зафиксированы.



Анализ литературных источников последних лет опубликованных специалистами РАН, ПАО «Россети», АО «ФСК ЕЭС» показывает, что масштаб и острота проблемы постоянно нарастает. [1,2]



ИРМм - техническое средство решения проблемы.

Полноценным техническим средством решения проблемы является статический компенсатор электромагнитного типа с пофазным регулированием мощности (ИРМм) в составе [3]:

- управляемый магнитно – вентильный реактор трансформаторного типа с независимым регулированием мощности фаз (УШРТм) ;
- батарея статических конденсаторов (БСКм) с функцией широкополосной фильтрации высших гармонических .

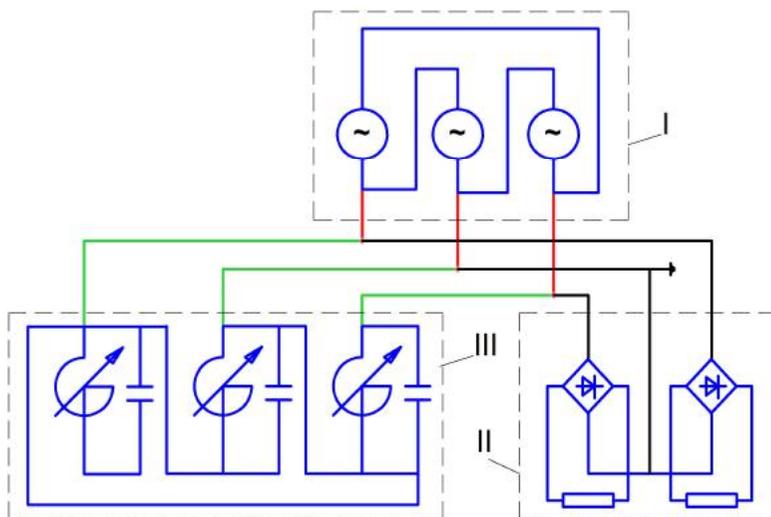


Рис. 1. Принципиальная схема подключения источника реактивной мощности к трехфазной сети питающей двухфазную нелинейную нагрузку.

- I – трехфазная электрическая сеть;
- II – двухфазная нелинейная нагрузка;
- III – источник реактивной мощности.

ГОСТ 32144-2013: $K_{2u} < 0,02$, $K_u < 0,02$

$K_{2u} < 0,01$,

$K_{uab} < 0,02$,

$K_{ubc} < 0,02$,

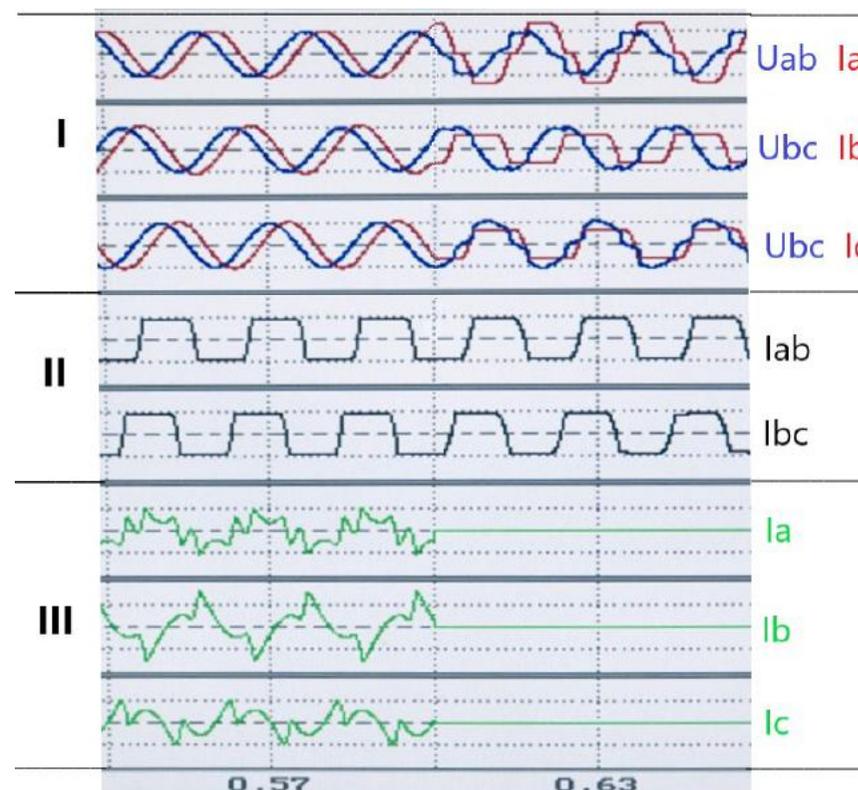
$K_{uca} < 0,02$

$K_{2u} = 0,12$,

$K_{uab} = 0,18$,

$K_{ubc} = 0,25$,

$K_{uca} = 0,28$.



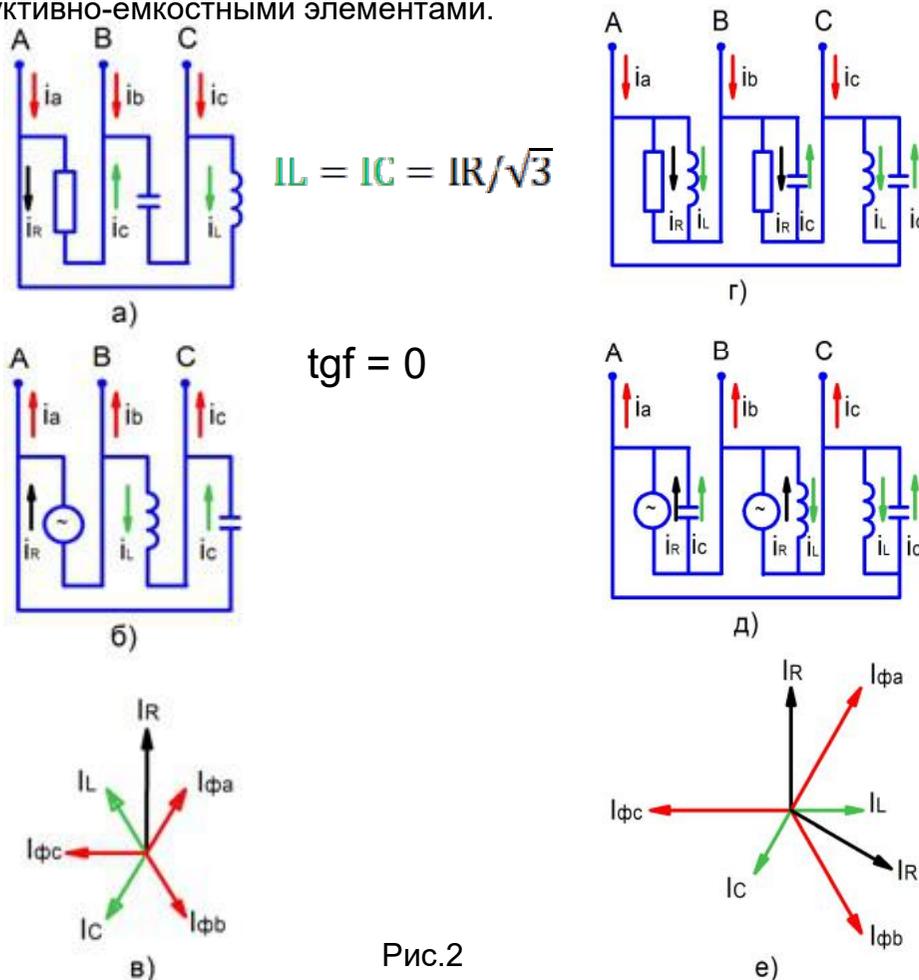
Графики напряжений и токов трехфазной сети (I) , токов двухфазной нелинейной нагрузки (II) , токов фаз источника реактивной мощности (III) схемы рисунка 1.



Принцип действия ИРМм, характерные особенности оборудования.

Теорема Ч. П. Штейнмеца:

Строгое симметрирование режимов потребления или выдачи (рекуперации) мощности трехфазно-однофазной или трехфазно-двухфазной сети может быть обеспечено индуктивно-емкостными элементами.



УШРТм - модифицированный вариант управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов, широко применяющихся, как у нас в стране так и за рубежом.

Характерные особенности УШРТм:

- ❑ Электромагнитная схема с полностью независимым регулированием мощности фаз, обеспечивающая функцию симметрирования режима трехфазной сети;
- ❑ Размещение электромагнитной и полупроводниковой частей в общем маслonaполненном баке трансформаторного типа, обеспечивающее возможность повышения коэффициента длительной перегрузки тока фазы в несимметричном режиме;
- ❑ Автоматическое регулирование мощности фаз по знаку рассогласования, обеспечивающее высокоточную астатическую стабилизацию текущего режима работы ИРМм.

Характерная особенность БСКм:

- ❑ Широкополосная фильтрация высших гармоник тока нечетной кратности.
- ❑ Тангенс угла нагрузки tgf :

$$0 < \text{tgf} = f(Q_{УШР}/Q_{БСК}) < 0$$



Магнитно-вентильный управляемый реактор трансформаторного типа УШРТм с независимым регулирование мощности фаз.

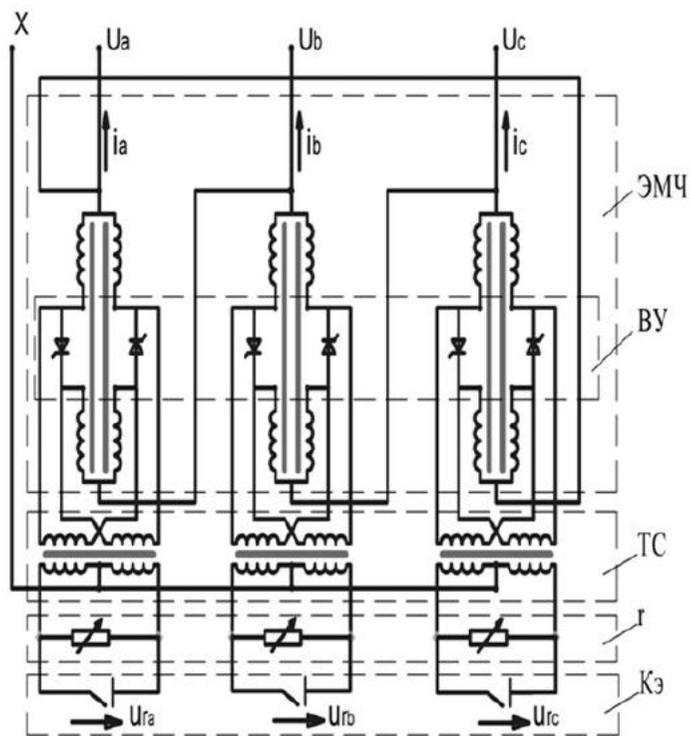


Рис.3. Принципиальная схема трехфазного магнитно-вентильного управляемого реактора.

ЭМЧ - электромагнитная часть;
ВУ- вентильное устройство;
r – резисторы;
Кэ - электронные ключи;
ТС – согласующие трансформаторы.



Рис.4. Фото общего вида и выемной части магнитно-вентильного управляемого реактора трансформаторного типа мощностью 25 Мвар напряжением 35 кВ. (РТУ-25000/38,5-УХЛ1).

- 4.1. Полная масса: 52 тонны;
- 4.2. Габариты: длина 6460 мм, ширина 3565 мм, высота 4900 мм;
- 4.3. Номинальные потери: 200 кВт;
- 4.4. Диапазон плавного регулирования мощности: $(0,01 - 1,3)Q_{ном}$;
- 4.5. Коэффициент длительной перегрузки тока фазы в несимметричном режиме: $1,6Q_{фном}$.

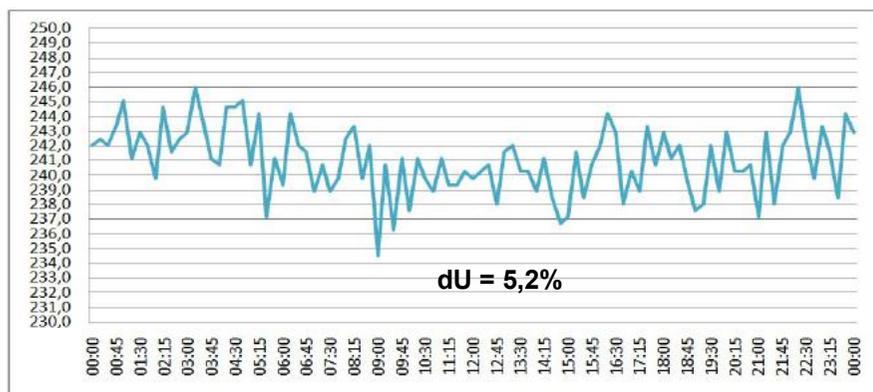


ООО «Электросетевые компенсаторы»

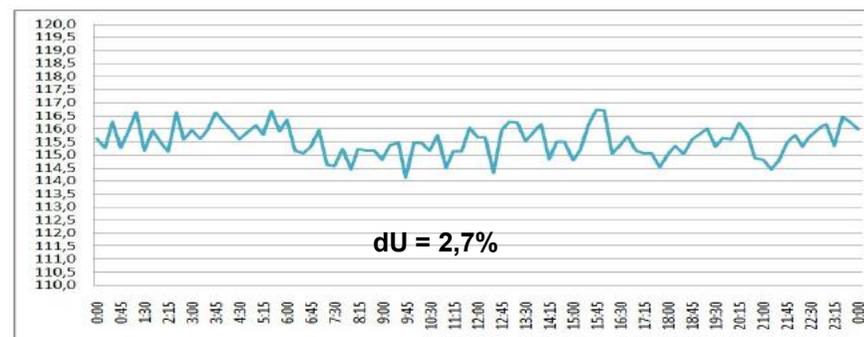
Пример применения УШРТм типа РТУ-25000/38,5 на ЦПС 220 кВ «Петровск-Забайкальская».

Две единицы УШРТм типа РТУ-25000/38,5 введены в эксплуатацию в 2018 г. Режим эксплуатации - полностью автоматический, без участия персонала подстанции.

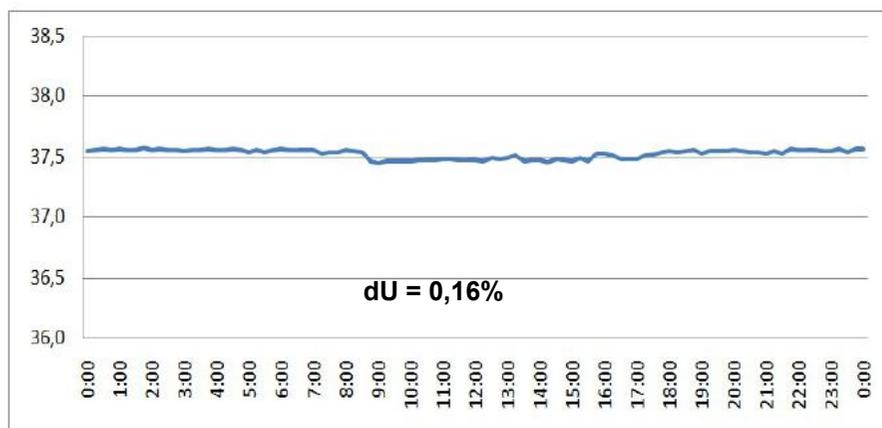
Обеспечена точность стабилизации напряжения шин 35 кВ равная 0,16% принципиально недостижимая в аналогичных устройствах с статической регулировочной характеристикой.



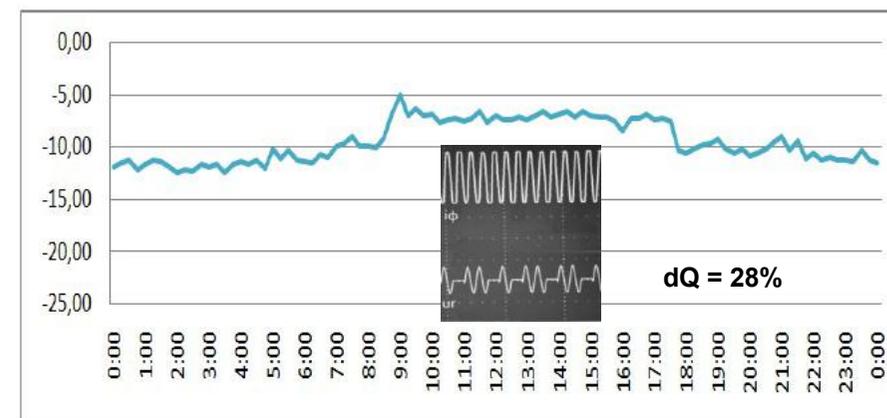
а) напряжение 220 кВ



б) напряжение 110 кВ



в) напряжение 35 кВ



г) мощность

Рис. 5. Пример суточных графиков мощности РТУ-25000/38,5 и напряжений 35/110/220 кВ на шинах ЦПС 220 кВ «Петровск-Забайкальская».

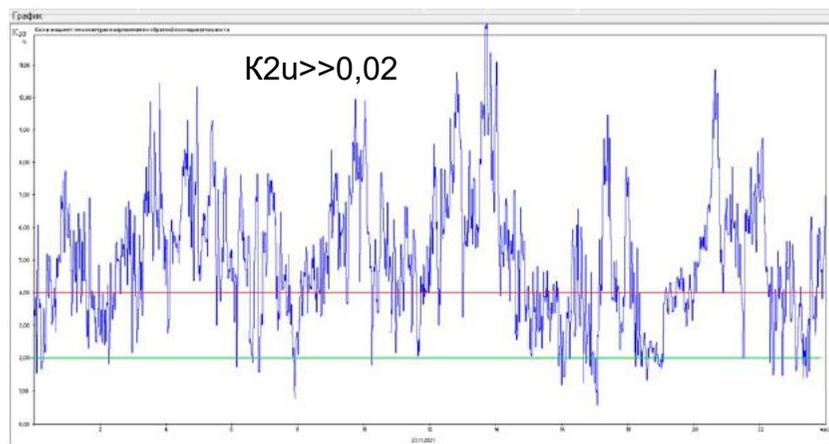


Технические решения на УШРТм/ИРМм класса напряжений 110-220 кВ.

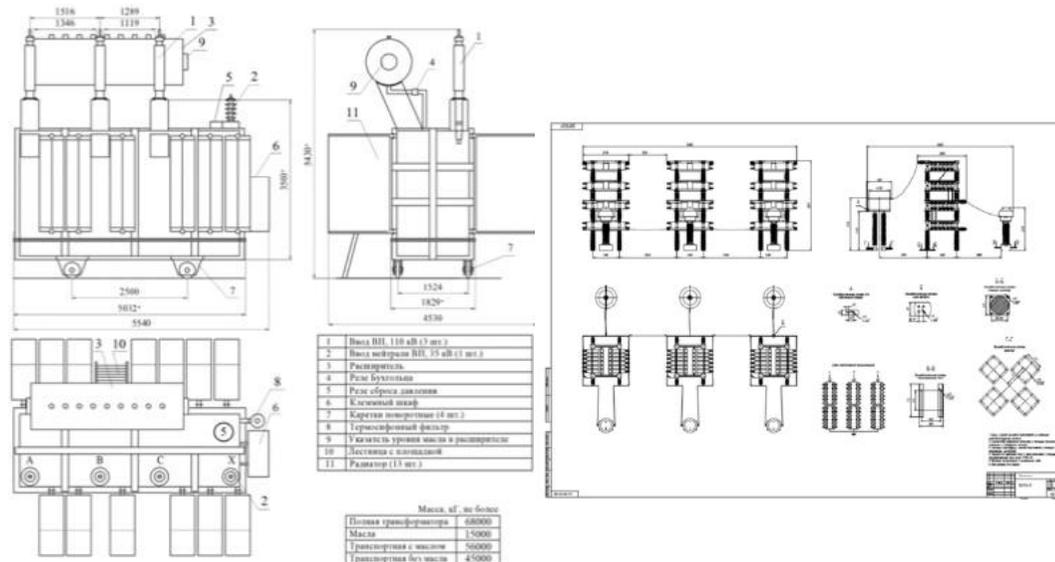
Искажения, вызываемые несимметричной нагрузкой 6 - 35 кВ трансформируются в более высокие классы напряжения 110-220 кВ и в ряде случаев значительно усиливаются в резонансных точках прилегающей сети.

Конструкция УШРТм моноблочного исполнения детально проработана и согласована с потенциальными производителями РФ вплоть до мощностей 100 МВАр и напряжений 220 кВ с улучшенными в 1,5-2,5 раза технико-экономическими показателями по сравнению с аналогами.

ИРМм класса напряжения 110-220 кВ восстанавливают качество электроэнергии на шинах подстанции нарушаемое не только нагрузкой, но и напряжением центров питания.



Пример суточного графика коэффициента несимметрии K_{2u} и гармонический состав напряжения $K_{(n)u}$ одной из подстанций 110 кВ Сибирского региона



Габаритные чертежи УШРТм 40 МВАр, 110 кВ и БСКм 26 МВАр, 110 кВ.



История производства УШР (ИРМ) электромагнитного типа 10-500 кВ.

Фаза управляемого реактора РОДЦУ-60/525/ $\sqrt{3}$ на п/ст «Белый Раст», РФ 1989 год.

Назначение:

Сетевые Испытания (регулируемые, динамические, вибро-шумовые, коммутационные характеристики; нелинейные искажения тока, резонансные явления)

Основные технические данные:

- | | |
|--------------------------------|--------------------|
| 1. Номинальное напряжение | 525/ $\sqrt{3}$ кВ |
| 2. Номинальная мощность | 60 МВАр |
| 3. Диапазон изменения мощности | 0,2...81 МВАр |
| 4. Время изменения мощности | 0,3 с |
| 5. Потери: | |
| - холостого хода | 90 кВт |
| - номинальные | 465 кВт |
| 6. Мощность управления | 1,8 МВА |
| 7. Полная масса | 138 т |



Заключение Заказчика («Дальние Электрпередачи»):

«Опытно-промышленный образец успешно прошел испытания и может быть принят за прототип при создании головного образца».

Трехфазный управляемый реактор 25 МВАр, 110 кВ на п/ст «Кудымкар», РФ 1999 год.

Назначение:

Стабилизация напряжения в точке подключения и оптимизация перетоков реактивной мощности в прилегающей сети (подключен в параллель с ШКБ 42 МВАр).

Основные технические данные:

- | | |
|--------------------------------|--------------|
| 1. Номинальное напряжение | 121 кВ |
| 2. Номинальная мощность | 25 МВАр |
| 3. Диапазон изменения мощности | 0,25÷30 МВАр |
| 4. Время изменения мощности | 2,0 с |
| 5. Потери: | |
| - холостого хода | 200 кВт |
| - номинальные | 25 кВт |
| 6. Мощность управления | 160 КВА |
| 7. Высшие гармоники в токе | < 4% |
| 8. Полная масса | 69 т |



Заключение Заказчика (решение выездного семинара РАО «ЕЭС России» на месте установки):

1. Колебания напряжения ограничены до $\pm 1,5\%$.
2. В часы максимума нагрузки потери энергии в прилегающей сети снижены до 2,5 МВт.
3. За счет повышения пропускной способности транзита, строительство дополнительной линии 220 кВ отнесено на 10-15 лет».

Трехфазный управляемый реактор 100 МВАр, 220 кВ на п/ст «Чита», РФ 2002 год.

Назначение:

Стабилизация напряжения в точке подключения, разгрузка генераторов по реактивной мощности

Основные технические данные:

- | | |
|--------------------------------|-----------------|
| 1. Номинальное напряжение | 220 кВ |
| 2. Номинальная мощность | 100 МВАр |
| 3. Диапазон изменения мощности | -2,5...113 МВАр |
| 4. Время изменения мощности | 0,4 с |
| 5. Потери: | |
| - холостого хода | 87,7 кВт |
| - номинальные | 558 кВт |
| 6. Мощность управления | 1 МВА |
| 7. Высшие гармоники в токе | < 2% |
| 8. Полная масса | 183 т |



Заключение Заказчика (Пункт 2 Решения НТС РАО «ЕЭС России от 29.12.2003 г.):

«Рекомендовать ОАО «ФСК ЕЭС» применение аналогичных управляемых реакторов в сети 110÷330 кВ».

Трехфазный управляемый реактор 180 МВАр, 330 кВ на п/ст «Барановичи», Беларусь 2003 год.

Назначение:

Стабилизация напряжения, разгрузка генераторов по реактивной мощности.

Основные технические данные:

- | | |
|--------------------------------|---------------|
| 1. Номинальное напряжение | 347 кВ |
| 2. Номинальная мощность | 180 МВАр |
| 3. Диапазон изменения мощности | -5...195 МВАр |
| 4. Время изменения мощности | 0,7 с |
| 5. Потери: | |
| - холостого хода | 138 кВт |
| - номинальные | 753 кВт |
| 6. Мощность управления | 1 МВА |
| 7. Высшие гармоники в токе | < 2% |
| 8. Полная масса | 320 т |



Предварительное Заключение Заказчика (технический совет «Белэнерго» проекта):

«Рекомендовать концерну «Белэнерго» применять в сети 330 кВ исключительно управляемые шунтирующие реакторы».

Источник реактивной мощности на базе УШР типа РТМУ-10000/35-УХЛ-1 на ПС 35 кВ «Ванкор», 2011 г.





ООО «Электросетевые компенсаторы»

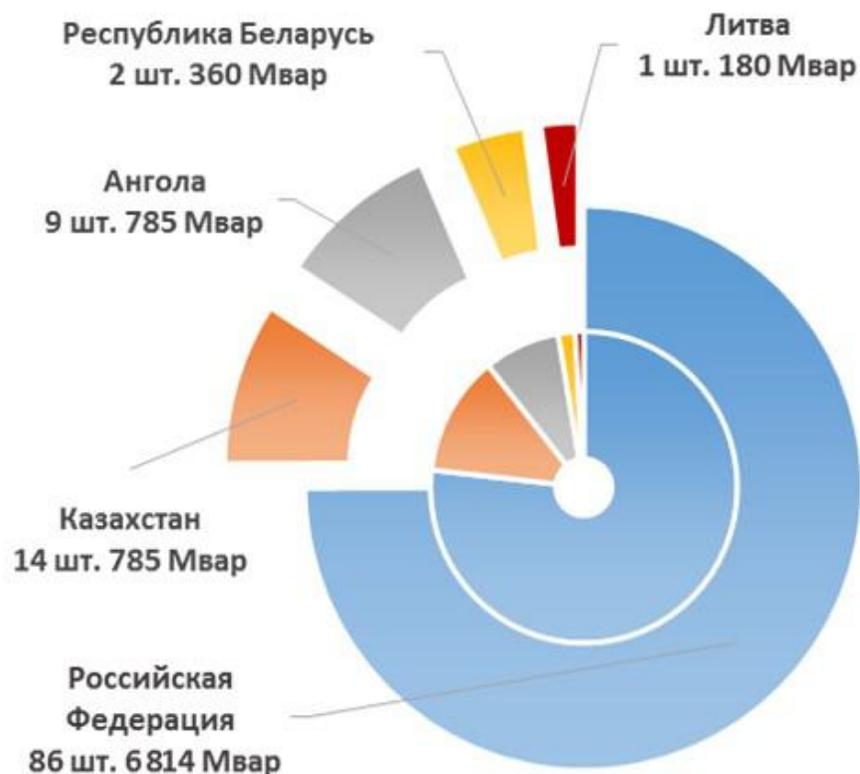
Объем и география поставок УШР (ИРМ) электромагнитного типа 10-500 кВ.

За последние годы УШР и ИРМ подтвердили свою эффективность на 87 объектах (от Заполярья до экватора)

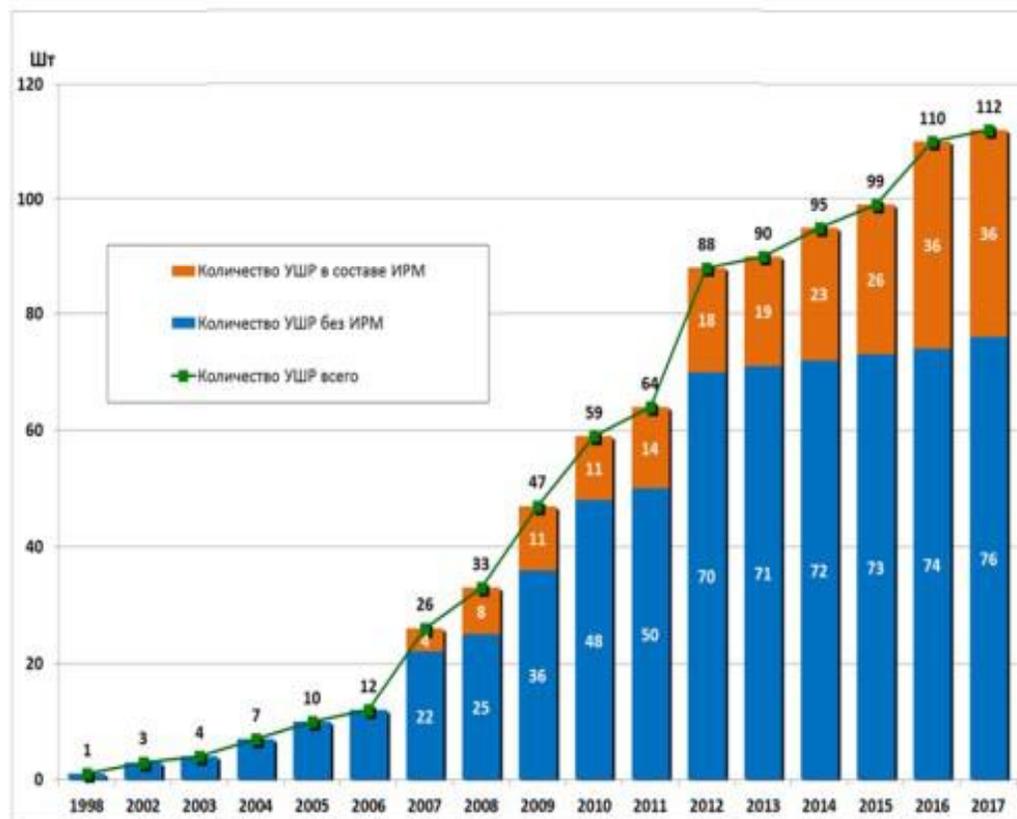
Находятся в эксплуатации:

- УШР/ИРМ (10-35 кВ) – 21 шт.
- УШР/ИРМ (110-220 кВ) – 62 шт.
- УШР/ИРМ (330-500 кВ) – 29 шт.

Всего УШР/ИРМ (10-500 кВ) – 112 шт.



Итого: 8402 Мвар.





Области применения УШРТм/ИРМм, потенциальная потребность.

Назначение УШРТм/ИРМм:

Нормализация качества электроэнергии электрической сети по показателям:

- медленные отклонения напряжения dU ;
- искажения формы напряжения K_u ;
- несимметрия трехфазного напряжения K_{2u} ;
- оптимизация тангенса угла нагрузки $tg\phi$.

Основные технико-экономические показатели УШР (10-500) кВ:

- диапазон плавного регулирования мощности в симметричном режиме (0,01-1,3) $Q_{ном}$;
- быстродействие в нормальных режимах работы сети 0,3-1,0 с;
- быстродействие при пусковых и аварийных режимах, менее 0,02 с;
- удельная полная масса: 1,5-3 кг/квар;
- удельные потери холостого хода: 0,1-0,5 Вт/квар;
- удельные номинальные потери: 4-8 Вт/квар.

Общая потенциальная потребность

- В разы превышает объем эксплуатирующихся в настоящее время УШРТм/ИРМм.

Частично освоенные области применения:

- стабилизация напряжения и нормализация тангенса угла нагрузки в опорных углах магистральных линии электропередач и распределительной сети различного назначения, в том числе, схем электроснабжения предприятий нефтегазового комплекса и перерабатывающих отраслей;
- исключение режимов недовозбуждения и оптимизация выдачи реактивной мощности генераторов электростанций в электрическую сеть мегаполисов и крупных промышленных энергорегионов.

Перспективные области применения:

- формирование автономных центров высокоточной стабилизации напряжения с режимом близким к режиму «шины бесконечной мощности» и восстановлением качества электроэнергии в любой выбранной точке электрической сети независимо от графика нагрузки;
- устранение негативного влияния колебаний напряжения внешней сети на работу генераторов электростанций возобновляемых источников энергии с неустойчивым графиком выдачи мощности;
- плавно-ступенчатое регулирование напряжения подстанции (вместо обычных шунтирующих реакторов с суточным или более частым графиком коммутационных переключений).



Организация промышленного производства и эксплуатации УШРТм/ИРМм.

УШРТм/ИРМм - по ГОСТ 15.005-86 относится к категории единичной/мелкосерийной продукции собираемой на месте установки в составе конкретного производственного объекта [5].

Этапы изготовления УШРТм/ИРМм:

- производство ЭМЧ (фаз реактора);
- производство БСК (батареи конденсаторов);
- производство КВУ (полупроводниковое устройство);
- производство САУ (шкаф системы управления);
- изготовление УШРТм/ИРМм (сборка, наладка, доводка, испытания, передача в эксплуатацию) .

Головной образец - по ГОСТ Р 15.301-2016, первый образец УШРТм/ИРМ разрабатывается и изготавливается на особых условиях оговорённых Соглашением между Заказчиком, Разработчиком и Изготовителем [6].

Соглашение, кроме прочего, включает в себя, положения касающиеся:

- разработки, изготовления, опытно-промышленной эксплуатации, аттестации головного образца УШРТм / ИРМм;
- разработки общих технических требований к серии УШРТм/ ИРМм;
- разработки методических рекомендаций к применению;
- инженерного / авторского сопровождения последующего производства и эксплуатации УШРТм/ ИРМм;
- подготовки / переподготовки кадров производственного и эксплуатационного персонала Заказчика



**Выписка из Протокола № 12 от 06.06 2022 г.
заседания Президиума Научно-технического совета ПАО «РОССЕТИ».**

РЕШИЛИ:

1. Рекомендовать ПАО «Россети» подготовить в адрес ДЗО ПАО «Россети», профильным проектным институтам и отечественным производителям информационные письма о функциональных возможностях, номенклатуре и областях применения статических компенсаторов.

2. Рекомендовать ООО «Электросетевые компенсаторы» совместно с АО «НТЦ ФСК ЕЭС» направить в ПАО «Россети» подробную информацию об электросетевых объектах ДЗО ПАО «Россети», где по мнению проектных институтов заказчиков оборудования необходима установка статических компенсаторов с функциями восстановления качества электроэнергии по показателям:

- медленные отклонения напряжения;
- несимметрия трехфазного напряжения;
- несинусоидальность напряжения.

3. Рекомендовать ООО «Электросетевые компенсаторы» совместно с АО «НТЦ ФСК ЕЭС» сформировать в установленном порядке заявку в Программу НИОКР ПАО «Россети» для выполнения работы по определению мест первоочередной установки и номинальных параметров статических компенсаторов для восстановления качества электроэнергии

4. Рекомендовать ООО «Электросетевые компенсаторы» совместно с АО «НТЦ ФСК ЕЭС» сформировать и направить в адрес ПАО «Россети» предложения по актуализации нормативных правовых актов, определяющих требования по установке статических компенсаторов.



Литература:

1. Коверникова Л И, Тульский В Н, Шамонов Р. Г., Качество электроэнергии в ЕЭС России./ Электроэнергия. Передача и распределение, 2016, N2(35), с. 41-51.
2. ГОСТ 32144 -2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Брянцев А. М., Поздняков С. В., Селезнев Н. А. Магнитно-вентильные управляемые реакторы с пофазным регулированием мощности./ Электричество, 2021, N12, с 4-14.
4. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы./Сб. статей под редакцией проф. д.т.н А .М. Брянцева. 2-е дополненное издание, Москва, ЗНАК, 2010.
5. ГОСТ 15.005-86. Создание изделий единичного и мелкосерийного производства собираемых на месте установки.
6. ГОСТ Р 15.301-2016 Порядок разработки и постановки продукции на производство.



Спасибо за внимание!

Контактная информация:

ООО «Электросетевые компенсаторы» (ООО «ЭСКО»)

111401, Москва, 1-я Владимирская, д.33, стр.1

телефон: +7 (495) 995-52-28

факс: +7 (495) 995-52-29

email: info@eskomoscow.com

web: www.eskomoscow.com