

**ПРИМЕНЕНИЕ УШРТ 220 КВ 60 МВАР  
ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ  
«NORTE DE ANGOLA»**

Демин Андрей Иванович, исполнительный директор, к.т.н.  
Титаренко Антон Викторович, вед. инженер  
Чуприков Виктор Сергеевич, заместитель генерального директора, к.т.н.  
ЗАО СП «АО Ансальдо-ВЭИ» (г. Москва, Россия),  
[info@ansldovei.ru](mailto:info@ansldovei.ru), тел./факс. +7-495-361-9747

В декабре 2009 г. в энергосистеме Norte de Angola был успешно завершен пилотный проект CSRT, включающий 2 статических тиристорных компенсатора (СТК), выполненных по схеме управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа (УШРТ или CSRT - Controlled Shunt Reactor of Transformer type) мощностью 60 Мвар. Это первое в мире системное использование УШРТ и второе его применение после установки на подстанции Itarsi в Индии в 2001 г. [1], где УШРТ работал в ключевом режиме.

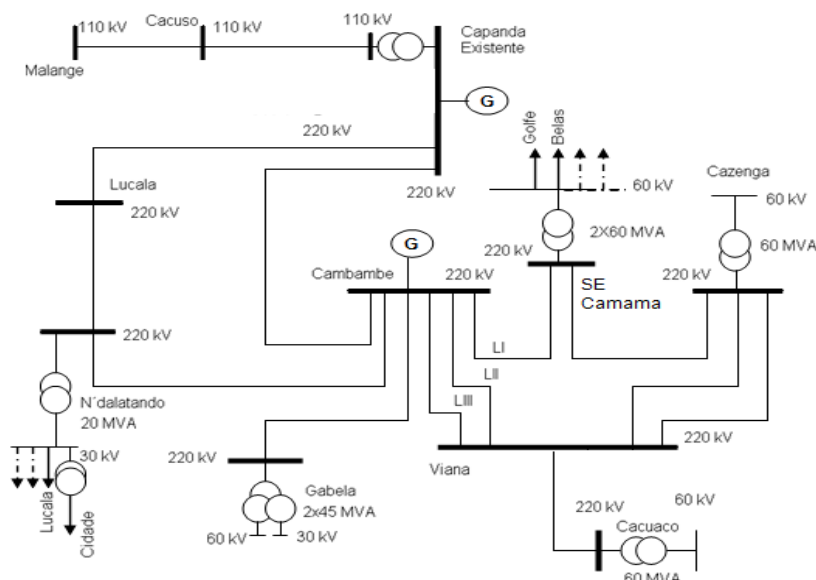


Рис.1. Схема энергосистемы Norte de Angola

Энергосистема, схема которой приведена на рис.1, осуществляет электроснабжение столицы Анголы г. Луанда от гидроэлектростанций Capanda и Cambambe по трем ВЛ-220 кВ LI-LIII длиной около 180 км через подстанцию (ПС) 220/60 кВ Cazenga. Мощность, потребляемая Луандой, составляет около 200

МВт. Две промежуточные ПС 220/60 кВ Viana и Camata, расположенные в 30 км от ПС Cazenga, отбирают около 180 МВт мощности для питания пригородов столицы. Состояние энергосистемы характеризовалось перегрузкой линий реактивной мощностью, пониженным и нестабильным уровнем напряжения в сети и частыми, практически ежедневными, отключениями потребителей.

По предложению проф. Г.Н. Александра для нормализации режимов работы линий 220 кВ и повышения их пропускной способности был разработан проект, включающий установку на шинах 60 кВ всех трех подстанций конденсаторных батарей суммарной мощностью 150 Мвар, а также на шинах 220 кВ ПС Camata и ПС Viana управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа мощностью 60 Мвар каждый. Для реализации проекта, названного CSRT, в декабре 2007 г. был образован международный консорциум в составе трех компаний со следующим распределением работ: ОАО «Запорожтрансформатор» (Украина) – изготовление и поставка электромагнитной части (ЭМЧ) УШРТ, АО Ансальдо-ВЭИ (Россия) – изготовление и поставка регулятора УШРТ, проведение комплексных приемо-сдаточных испытаний всего оборудования и оптимизация режимов работы энергосистемы, Odebrecht (Бразилия) – поставка конденсаторных батарей, рабочее проектирование и монтаж всего комплекса оборудования.

### **Схема и основные параметры УШРТ**

Управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа УШРТ [2], объединяет в себе понижающий трансформатор и управляемый тиристорами реактор обычного СТК. УШРТ имеет следующие преимущества перед традиционными СТК:

- **Возможность исполнения на любой требуемый класс напряжения;**
- **Снижение габаритов, стоимости и потерь в СТК в целом;**
- **Высокая надежность схемы, так как режим КЗ для УШРТ является номинальным.**

Схема УШРТ для рассматриваемого проекта приведена на рис.2. Она состоит из ЭМЧ и регулятора УШРТ. Обмотка высокого напряжения ЭМЧ (сетевая - СО) подключается к шинам 220 кВ подстанции. Вторичная обмотка управления (ОУ) имеет 100% магнитную связь с СО и ток в ней, а значит и в обмотке СО,

регулируется путем изменения угла зажигания тиристорного вентиля (ВТВ), включенного параллельно ОУ.

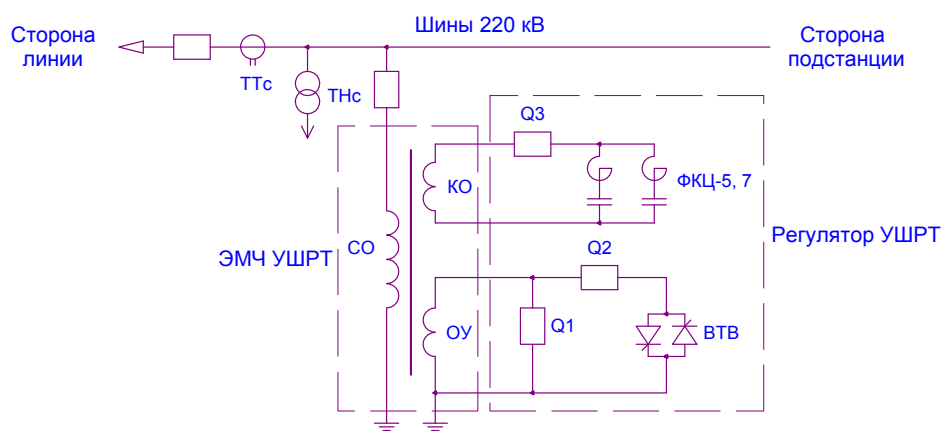


Рис.2. Однолинейная схема УШРТ

Для компенсации токов высших гармоник, генерируемых в ОУ, в УШРТ предусмотрена третья компенсационная обмотка (КО), к которой подключаются ФКЦ малой мощности. При отказе тиристорного вентиля обмотка ОУ может быть шунтирована специальным выключателем Q1, реализуя ступенчатое управление реактивной мощностью УШРТ.

УШРТ имеет следующие основные параметры:

- Номинальная мощность сетевой обмотки при номинальном напряжении и полностью открытых тиристорах - 60 Мвар
- Номинальное напряжение обмотки СО (линейное) - 230 кВ
- Наибольшее длительное напряжение СО (линейное) - 245 кВ
- Наибольшее длительное напряжение обмоток ОУ и КО - 12 кВ
- Номинальный ток тиристорного вентиля - 1900 А
- Генерируемая реактивная мощность ФКЦ - 2,5 Мвар
- Активные потери при номинальной мощности, не более - 560 кВт

### Регулятор УШРТ

Оборудование регулятора УШРТ, изготовленного АО Ансальдо-ВЭИ в сотрудничестве с Ansaldo Sistemi Industriali, в основном размещено в контейнере размером 12 x 2,3 x 3,6 м. В отсеках контейнера смонтированы две ячейки КРУ-18 кВ Q1 and Q2, трехфазный тиристорный вентиль с системой жидкостного охлаждения и система управления УШРТ (рис.3).



Рис.3. Отсеки контейнера: управление, вентиль, КРУ

На рис. 4 приведена фотография общего вида регулятора УШРТ. Агрегат воздушного охлаждения и вводы напряжения 12 кВ от ОУ размещены на крыше контейнера. Маломощные фильтры установлены на открытой площадке рядом с контейнером, выключатель Q3 с двумя разъединителями размещен в отдельном небольшом контейнере.



Рис.4. Общий вид регулятора УШРТ на ПС Самата

Наибольшие изменения по сравнению со стандартными СТК производства АО Ансальдо-ВЭИ претерпел тиристорный вентиль. В данном проекте были использованы фототиристоры типа T1503N производства компании Еврес с параметрами: напряжение 8 кВ, ток 2500 А. Управляемые непосредственно

световым сигналом фототиристоры не требуют наличия питания на высоком потенциале и могут быть включены в любой требуемый момент независимо от величины приложенного напряжения. Тем самым обеспечивается возможность включения вентиля в т.н. «диодном» режиме (т.е. реализации максимальной индуктивности реактора) на первой полуволне восстанавливающегося напряжения при включении линии на холостой ход и, соответственно, выполнение СТК функций обычного шунтирующего реактора, что было теоретически обосновано и промоделировано 20 лет назад [3] и подтверждено в [4]. Помимо светового управления фототиристоры имеют встроенную VOD защиту от перенапряжений и, по сравнению с обычными тиристорами, большую стойкость к  $du/dt$  и  $di/dt$ , что определяет более высокую надежность такого тиристорного вентиля в целом.

Рассматриваемый тиристорный вентиль состоит из трех установленных друг над другом тиристорных модулей, каждый из которых содержит 8 последовательно соединенных тиристорных ячеек (фото на рис. 4). Использование фототиристоров потребовало разработки специального шкафа светового управления, содержащего 48 импульсных полупроводниковых лазеров, выходы которых соединены с управляющими фотоэлементами тиристоров посредством стеклянных световодов с малым декрементом затухания света. Также вентиль оборудован устройствами индивидуального контроля работы тиристоров.

Система управления (СУ) регулятора УШРТ реализована на основе СУ СТК производства Ансальдо-ВЭИ стандартной конфигурации, но имеет и некоторые специфические отличия. Так, в ней реализована связь по волоконно-оптическим световодам со шкафом лазеров, а также она снабжена системой удаленного доступа через Интернет в целях обеспечения контроля за работой УШРТ из Москвы.

### **Приемо-сдаточные испытания**

В ноябре 2009 г. начались пуско-наладочные работы по релейным защитам и автоматике РУ 220 кВ обоих УШРТ и всех 15 КБ на 3 подстанциях, а 4 декабря было подано высокое напряжение на УШРТ, установленный на ПС Viana, и начались его приемо-сдаточные испытания.



Рис.5. УШРТ на ПС Самата

### ***Включение ЭМЧ на холостой ход***

Три включения ЭМЧ в режиме холостого хода показали, что амплитуда тока включения не превышает 100 А, что составляет менее 50% от номинального тока обмотки СО.

### ***Регулировочная характеристика УШРТ***

Были проведены измерения токов обмоток СО и ОУ при изменении угла управления тиристоров от 90 до 0 градусов. В результате было обнаружено, что характеристики УШРТ существенно отличаются от ТРГ, в то время как в [2] предполагалась их полная аналогия, что и было заложено в проект. В частности:

- форма токов фаз ОУ не является срезанной частью синусоиды, а меняется в зависимости от угла управления тиристоров от колоколообразной до треугольной (рис.6);

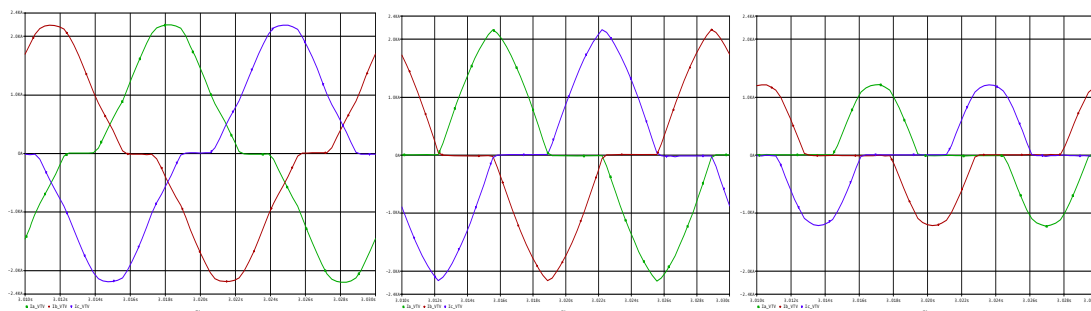


Рис. 6. Осциллограммы токов трех фаз ОУ при углах 15, 30 и 45 градусов

- регулировочная характеристика УШРТ (зависимость тока первой гармоники от угла управления тиристором) имеет совершенно другой вид и состоит практически из трех линейных отрезков различного наклона (рис.7);
- содержание токов высших гармоник в токе ОУ также отличается от ТРГ, особенно это касается 3 гармоника, которая в 2,5 раза больше (рис.7).

Вероятной причиной выявленных отличий является влияние трех фаз обмотки управления друг на друга за счет их магнитной взаимосвязи. Из регулировочной характеристики видно, что ее изломы имеют место при углах управления 60 и 30 градусов, т.е. когда происходят переходы из режима одновременного горения тиристором только в одной фазе ВТВ в горение в двух фазах и из двух фаз в три.

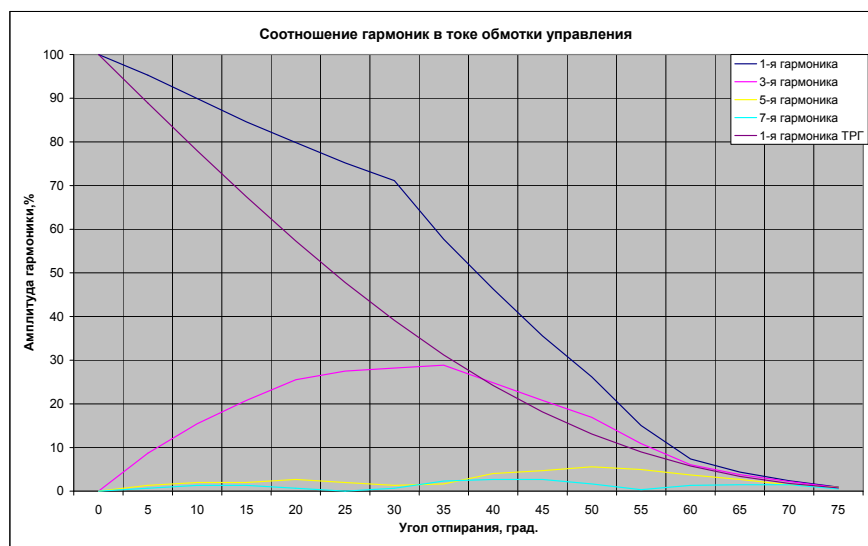


Рис. 7. Зависимость токов первой и высших гармоник ОУ УШРТ и тока первой гармоники ТРГ от угла управления

Тем не менее, спектр тока сетевой обмотки является вполне удовлетворительным, так как компенсационная обмотка, соединенная в треугольник, обеспечивает компенсацию значительной доли гармоник, кратных трем. Например, при угле управления 25 градусов уровень третьей гармоники снижается с 36% в ОУ до 2% в СО.

Для обеспечения линейности характеристики регулятора УШРТ во всем диапазоне изменения углов управления была произведена корректировка программного обеспечения блока фазо-импульсного преобразования в системе управления УШРТ.

### **Отработка режимов регулирования**

Исходное состояние энергосистемы перед подключением КБ и УШРТ: напряжение на шинах 220 кВ подстанций изменялось от 190 до 202 кВ, линии Л1...Л3 работали с мощностью выше натурального значения, полная мощность по линии превышала 130 МВА, а реактивная мощность доходила до 40-45 Мвар.

В качестве основного алгоритма работы системы управления УШРТ был принят режим регулирования напряжения на шинах 220 кВ подстанции. Результаты испытаний на ПС Viana подтвердили хорошее качество поддержания напряжения при изменении нагрузки. Были проведены опыты по определению зависимости быстродействия УШРТ от параметров замкнутого контура регулирования напряжения. На рис. 8 приведены осциллограммы реакции выходного сигнала регулятора на изменение уставки напряжения в режиме малого сигнала (в линейной зоне регулирования) для двух значений постоянной времени интегрального канала: 67 мс и 20 мс.

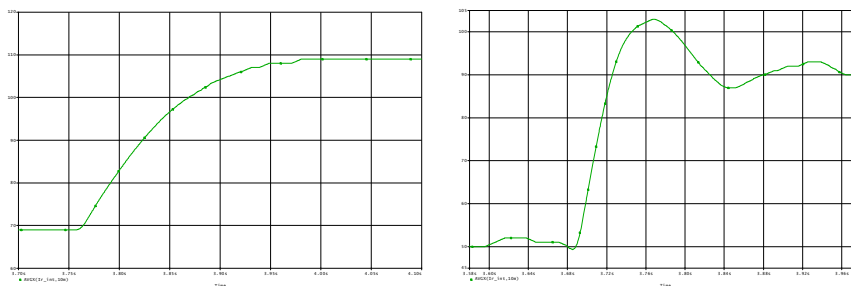


Рис.8. Форма выходного сигнала регулятора при изменении уставки напряжения

Результаты измерений реакции регулятора для разных значений постоянной времени интегрального канала приведены в таблице 1.

Таблица 1

Постоянная времени интегратора, мс	Время отклика (отработка 90% приращения), мс	Коэффициент перерегулирования
100	162	апериодический процесс
67	111	апериодический процесс
50	84	апериодический процесс
33	54	1.05
25	41	1.18
20	32	1.28
17	27	1.35



По результатам испытаний было принято решение оставить постоянную времени интегрального канала равной 33 мс, что обеспечило требуемое согласно технической спецификации на регулятор УШРТ время реакции 60 мс.

При включении второго УШРТ на ПС Самата было необходимо обеспечить распределение нагрузки между двумя устройствами. Введение статизма регулировочной характеристики СУ УШРТ величиной 2% (рис.9) обеспечило практически симметричную, но независимую работу обоих регуляторов при изменении режима энергосистемы.

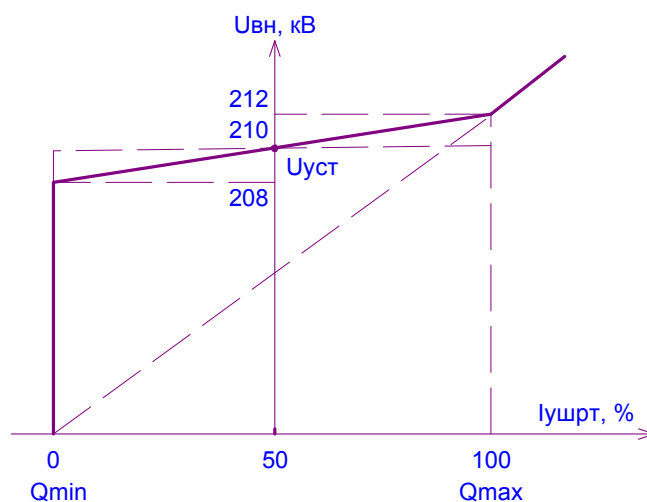


Рис. 9. Регулировочная характеристика СУ УШРТ

На рис. 10 приведен график изменения напряжения на шинах 220 кВ ПС Viana в течение 30 часов при работе регулятора УШРТ с уставкой 210 кВ и статизмом 2% (с работающим УШРТ на ПС Самата с уставкой 212 кВ).

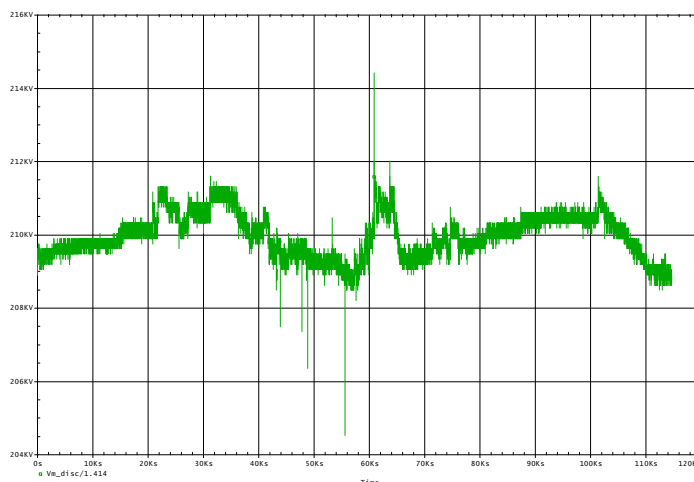


Рис. 10. График изменения напряжения на шинах 220 кВ ПС Viana

Как видно из графика, напряжение практически не выходило из диапазона 208...212 кВ, т.е. УШРТ все время находился в зоне плавного регулирования.

### ***Ограничение перенапряжений с помощью УШРТ***

Помимо контура регулирования напряжения СУ регулятора УШРТ содержит канал ограничения больших отклонений напряжения в точке подключения УШРТ, имеющий высший приоритет. Т.е. при увеличении напряжения выше порогового значения  $U_{max}$  СУ мгновенно переключает УШРТ в режим максимального тока (т.н. диодный режим), а при снижении напряжения ниже значения  $U_{min}$  мгновенно блокирует импульсы управления тиристорами и УШРТ переходит в режим холостого хода. При этом, как было отмечено выше, по эффективности в части снижения коммутационных перенапряжений УШРТ не уступает обычному шунтирующему реактору.

Подтвердить это достоинство УШРТ удалось 11 декабря, когда из-за аварии выключателя на ПС Cazenga полностью отключились все линии 60 кВ, питающие г. Луанду и произошел мгновенный сброс около 200 МВт активной мощности, передаваемой по линиям 220 кВ. Обычно в подобных случаях имело место отключение всех ВЛ-220 кВ вплоть до ГЭС Capanda и Cambambe (см. рис.1) из-за срабатывания защит по перенапряжению, после чего система собиралась в ручном режиме в течение около 2 часов. В данном случае регулятор УШРТ мгновенно переключился в диодный режим ( $Q_{max}$ ), а все КБ, установленные на шинах 60 кВ трех подстанций, отключились. Напряжение на шинах 220 кВ выросло, но только до 232 кВ, что ниже уставок защит, поэтому все линии 220 кВ остались в работе.

На осциллограмме на рис.11 представлен процесс изменения напряжения на шинах 220 кВ ПС Самата от момента начала аварии до полного восстановления нормального режима. Через 12 минут напряжение снизилось до 215 кВ за счет подключения нагрузок на стороне 60 кВ, регулятор УШРТ оставался в положении  $Q_{max}$ . После снижения напряжения до 208 кВ и перехода УШРТ в зону регулирования были поочередно включены все КБ и исходный режим работы линий 220 кВ был восстановлен.

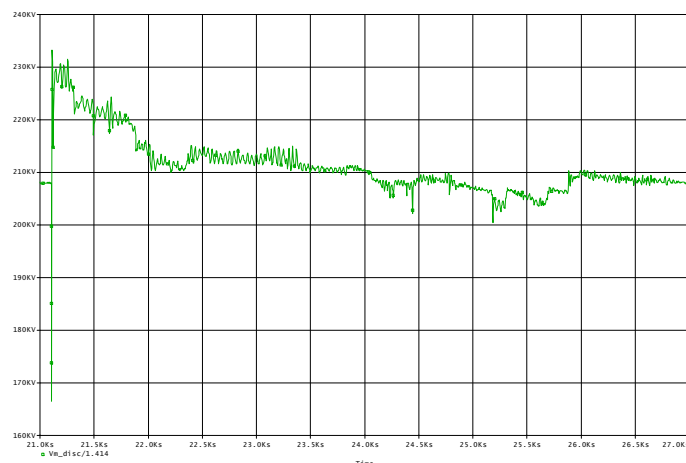


Рис.11. Тренд напряжения на шинах 220 кВ до и после аварии 11.12.09 г.

Таким образом, наличие двух работающих УШРТ обеспечило ограничение напряжения на шинах 220 кВ после сброса нагрузок на ПС Cazenga и предотвратило отключение линий 220 кВ и полный развал энергосистемы, что всегда имело место раньше в аналогичных случаях.

#### **Оптимизация режимов работы энергосистемы**

Со стороны Ансальдо-ВЭИ было предложено провести оптимизацию режимов энергосистемы путем повышения напряжения на стороне 220 кВ ГЭС Capanda и Cambambe. В течение 2 часов пошаговым подъемом напряжения на Capanda с 230 до 236 кВ и Cambambe с 218 до 224 кВ, параллельным повышением уставок регуляторов напряжения обоих УШРТ и переключением РПН трансформаторов 220/60 кВ ПС Samata, Viana и Cazenga был повышен уровень напряжения на этих подстанциях до 216-218 кВ.

В таблице 2 приведены средние рабочие параметры линий 220 кВ для трех режимов: в исходном режиме до включения КБ и УШРТ (режим 1), после их подключения (режим 2) и после проведенной оптимизации (режим 3).

Таблица 2

Режим	1				2				3			
Линия	P, МВт	Q, Мвар	U, кВ	I, А	P, МВт	Q, Мвар	U, кВ	I, А	P, МВт	Q, Мвар	U, кВ	I, А
LI	107	35	194	335	111	-3	209	306	111	5	218	286
LP, LPII	117	38	196	362	118	12	207	332	116	7	216	312

Как следует из таблицы 2, внедрение КБ с УШРТ обеспечило в итоге, при сохранении передаваемой по линиям активной мощности, повышение

напряжения на шинах 220 кВ подстанций на 11% и снижение тока в линиях на 15% с соответствующим уменьшением в них активных потерь.

### **Выводы**

1. Реализация проекта CSRT обеспечила:

- Повышение напряжения на шинах 220 кВ подстанций на 11% и стабилизацию напряжения в пределах  $\pm 2\%$ ;
- Разгрузку трех линий 220 кВ от реактивной мощности суммарно на 130 Мвар и снижение полной мощности в линии в среднем по линии на 5%;
- Снижение активных потерь в трех линиях электропередачи на 30%;
- Увеличение передаточной способности трех линий электропередачи на 50-60 МВт (согласно расчетам) из-за улучшения устойчивости, повышения напряжения и разгрузки линий от реактивной мощности.

2. Было подтверждено высокое быстродействие УШРТ и возможность выполнения им функций шунтирующего реактора.

3. Функционирование УШРТ при непосредственном подключении к шинам высокого напряжения подстанций носит системный характер и намного эффективнее СТК с ограниченными функциями, подключаемых к третичным обмоткам подстанционных автотрансформаторов вместо синхронных компенсаторов, что широко применяется в ФСК ЕЭС.

### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Александров Г.Н. Быстродействующий управляемый реактор трансформаторного типа 420 кВ, 50 МВАр пущен в эксплуатацию. – Электричество, 2002, № 3.

2. Александров Г.Н., Лунин В.П. Управляемые реакторы. // Издание Центра подготовки кадров энергетики. Санкт-Петербург, 2005 г.

3. Чуприков В.С. Управление статическим тиристорным компенсатором для линий электропередачи. // «Электричество», N4, 1990 г.

4. Кадомская К.П., Михайловский Г.Г. Математическое моделирование и эффективность управляемых шунтирующих реакторов высокого напряжения. // «Энергоэксперт», №6, 2009 г.