

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ШУНТИРУЮЩИЕ РЕАКТОРЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЕНЭС РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

АВТОРЫ:

А.М. МАТИНЯН,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

М.В. ПЕШКОВ,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

В.Н. КАРПОВ,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Н.А. АЛЕКСЕЕВ,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

В.А. ПАДАЛКО,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

А.В. АНТОНОВ,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

П.Ю. БУЛЫКИН,
ОАО «АЙДИС ГРУПП»,
МОСКВА

В настоящее время во всем мире растет интерес к управляемым шунтирующим реакторам (УШР). Так например, в электрической сети 420 кВ Норвегии в 2012–2013 гг. было установлено

восемь УШР, а в 2016 г. — еще два реактора. В Дании в 2013–2015 гг. было установлено семь УШР в сетях 400 кВ. Также в 2013–2015 гг. было поставлено четыре УШР в США для установки в сетях 345 кВ и 143 кВ.

Ключевые слова: управляемые шунтирующие реакторы; управляемые шунтирующие реакторы трансформаторного типа (УШРТ); УШР с устройством регулирования напряжения под нагрузкой (РПН).



Внешний вид УШРТ на ПС 220 кВ «Светлая»

ВВЕДЕНИЕ

Шунтирующие реакторы (ШР) необходимы для поддержания режимов работы электрических сетей на линиях сверхвысокого напряжения (СВН), работающих в режимах передачи мощности менее натуральной, они ограничивают повышение напряжения. Однако для передачи по той же линии мощности вплоть до натуральной необходимо уменьшение степени компенсации зарядной мощности [1]. Изменение степени компенсации линии может быть осуществлено различными способами: 1) путем включения или отключения ШР; 2) посредством косвенной компенсации — установки параллельно с неуправляемыми ШР регулируемых синхронных компенсаторов (СК); 3) за счет использования управляемых шунтирующих реакторов (УШР). Первый способ не получил широкого распространения из-за перенапряжений, возникающих при коммутациях реактора. Второй способ широко применялся на линиях СВН в СССР (а затем и в России) до момента создания и внедрения более экономичных (за счет отсутствия косвенной компенсации) управляемых ШР [1].

Помимо ограничения напряжений и увеличения предела передаваемой по линии мощности УШР позволяют [1–3]:

1. предотвращать режимы работы синхронных генераторов, сопровождающиеся глубоким потреблением реактивной мощности;
2. повышать статическую и динамическую устойчивость энергосистемы;
3. сокращать количество коммутаций батарей статических конденсаторов и уменьшать количество переключений устройств РПН трансформаторов.

Перечисленные выше задачи решаются путем использования так

называемых шинных УШР — реакторов, подключаемых по схеме, приведенной на рис. 1а. При подключении к линии (рис. 1б) УШР специальной конструкции могут быть решены еще четыре дополнительные задачи [4–7]:

1. снижение квазиустановившихся перенапряжений на линии при ее одностороннем включении на холостой ход;
2. предотвращение появления аperiodической составляющей в токах сетевых обмоток УШР и токах линейного выключателя при опробовании ЛЭП напряжением;
3. уменьшение тока подпитки дуги короткого замыкания в цикле ОАПВ (однофазного автоматического повторного включения);
4. предотвращение резонансного повышения напряжения, потенциально возможного в неполнофазных режимах работы компенсированной УШР линии при степени компенсации, близкой к 100%.

В настоящее время в России практическое применение нашли два типа УШР — управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы (УШРП) [2, 9] и управляемые тиристорными вентилями шунтирующие реакторы (УШРТ) [3–9] в то время, как за рубежом в основном применяются УШР, конструктивно близкие к трансформатору с устройством РПН. Различия в принципах управления УШР обуславливают различия в быстродействии реакторов. Так, время изменения мощности от холостого хода до номинального режима в УШРТ составляет порядка 0,03 с, у УШРП — обычно около 0,3 с, а в УШР на базе устройства РПН время переключения от технологического минимума (50% от номинальной мощности) до номинального режима составляет приблизительно 300 с.

КОНСТРУКЦИЯ И ФУНКЦИИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ УПРАВЛЯЕМЫХ ТИРИСТОРНЫМИ ВЕНТИЛЯМИ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА

Принцип работы быстродействующих управляемых тиристорными вентилями шунтирующих реакторов трансформаторного типа (УШРТ) основан на изменении величины и длительности прохождения тока через реактор в каждом периоде промышленной частоты за счет фазоимпульсного управления тиристорными вентилями. Теоретические основы функционирования УШРТ (конструкции Г.Н. Александрова) изложены в учебном пособии [3], а опыт пилотного внедрения УШРТ в 2009 г. приведен в работе [10]. Описываемый реактор был выполнен без расщепления вентильных обмоток и для фильтрации высших гармоник токов применялась компенсационная обмотка, к которой подключались фильтро-компенсирующие устройства малой мощности.

В 2012 г. АО «НТЦ ФСК ЕЭС» был разработан технический проект УШРТ 500 кВ новой конструкции, не требующей использования фильтров высших гармоник и обеспечивающей улучшенный гармонический состав потребляемого из сети тока реактора за счет использования расщепленных вентильных обмоток (рис. 2). Электромагнитная часть (ЭМЧ) УШРТ 500 кВ выполнена

в виде трех отдельных фаз, каждая из которых включает стержневой магнитопровод, разнесенные по стержням две секции сетевой обмотки (СО1 и СО2) и расщепленную надвое вентильную обмотку (ВО1 и ВО2). На первом стержне размещены секция сетевой обмотки СО1 и вентильная полуобмотка ВО1, на втором — секция сетевой обмотки СО2 и вентильная полуобмотка ВО2. Между стержнями магнитный поток замыкается через торцевые яра. Вентильные полуобмотки ВО1а, ВО1б и ВО1с соединяются по схеме «треугольник», а вентильные полуобмотки ВО2а, ВО2б и ВО2с — по схеме «звезда». Вентильная часть (ВЧ) УШРТ состоит из двух групп по три тиристорных вентиля (ТВ) в каждой. Тиристорные вентили обеих групп соединяются по схеме «треугольник».

В настоящее время изготовлено оборудование УШРТ с расщепленными вентильными обмотками на классы напряжения 110 кВ, 220 кВ и 500 кВ (табл. 1), а в эксплуатацию в электрических сетях России введены три реактора, в том числе на таком ответственном объекте, как приемная сторона Крымского энергомоста, — ПС 220 кВ Кафа.

В 2016 г. АО «НТЦ ФСК ЕЭС» по заказу ПАО «ФСК ЕЭС» была выполнена модернизация системы управления УШРТ для выполнения им функций линейного реактора, а также проведены исследования режимов работы линейного УШРТ и сетевого оборудования.

В результате проведенных исследований установлено следующее:

1. УШРТ с расщепленными вентильными обмотками, соединенными в звезду и треугольник, позволяет уменьшать ток подпитки и сокращать среднестатистическое время горения дуги однофазного замыкания фазы ЛЭП

ТИПЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ УШР К СЕТИ

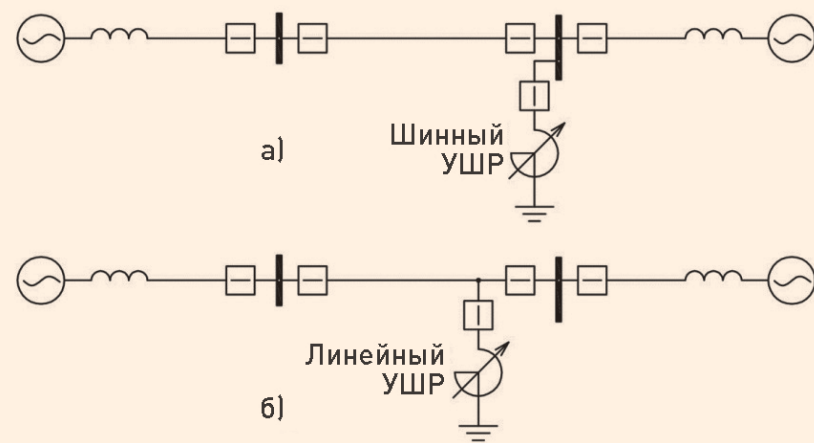


Рис. 1

на землю. Оснащение линии электропередачи подобным линейным УШРТ и релейной защитой линии, способной детектировать погасание дуги замыкания фазы ЛЭП на землю, позволяет сократить время цикла ОАПВ (рис. 4) [5]. Для линий 500 кВ среднестатистической длины 280 км использование УШРТ способно обеспечить уменьшение тока подпитки дуги в цикле ОАПВ с 50 до 15 А (рис. 3–4), что соответствует сокращению расчетного времени цикла ОАПВ с 1,11 до 0,46 с с вероятностью 95%. Применение УШРТ рассмотренной конструкции повышает эффективность ОАПВ и надежность работы энергосистемы.

2. Быстрое переключение между режимами работы УШРТ обеспечивает предотвращение развития резонанса напряжений (рис. 5) в неполнофазном режиме работы ЛЭП, возникающем после погасания дуги при степени компенсации линии, близкой к 100% [6].
3. Фазоимпульсное управление тиристорными вентилями УШРТ позволяет осуществлять включение УШРТ без апериодической

составляющей в токах реактора и ВЛ (рис. 6). Использование УШРТ на линиях (вместо ШР) позволяет устранить причину повреждения линейного выключателя в нормированном цикле «включение — отключение» без применения специальных дополнительных мер, таких как управляемая коммутация или использование предвключенных резисторов [7].

4. Высокое быстродействие УШРТ обеспечивает перевод реактора в режим холостого хода из любого рабочего режима (в том числе из режима с током меньше по величине, чем минимально допустимое по ГОСТ Р 52565-2006 значение 80 А) менее, чем за период промышленной частоты, что позволяет избежать опасных перенапряжений на выключателе реактора, вызванных срезом тока. Осциллограмма переходных процессов при срезе максимально возможного тока холостого хода УШРТ восстанавливающегося на контактах выключателя напряжения не превышают нормированного переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) выключателя

показана на рис. 7, из которой видно, что успешное отключение выключателя гарантируется [8]. В результате при отключении тока холостого хода реактора выключатель УШРТ должен лишь соответствовать требованиям действующего ГОСТ Р 52565-2006.

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УШРТ

Перечисленные выше особенности УШРТ с расщепленными вентильными обмотками делают его перспективным в части использования в качестве линейного реактора. В настоящее время инвестиционной программой ПАО «ФСК ЕЭС» уже предусмотрено применение двух линейных УШРТ с расщепленными

вентильными обмотками. Первый объект — это ПС 500 кВ «Моздок-2», второй — ПС 500 кВ «Усть-Кут». Электромагнитную часть УШРТ для указанных объектов производит ООО «Тольяттинский трансформатор» и АО «Электрозавод» соответственно. Общие сведения об изготовленных УШРТ с расщепленной ВО приведены в табл. 1.

В рамках подготовки к вводу линейного УШРТ в эксплуатацию разработаны программа и методика сетевых испытаний и регламент опытно-промышленной эксплуатации УШРТ для пилотного объекта «ВЛ 500 кВ Невинномысск — Моздок с ПС 500 кВ «Моздок»». Сетевые испытания УШРТ проводятся, в частности, для проверки корректности работы УШРТ с устройствами РЗА с функцией адаптивного ОАПВ в условиях промышленной эксплуа-

тации и эффективности применения УШРТ для снижения длительности паузы ОАПВ.

К настоящему моменту компанией ООО НПП «ЭКРА» в рамках соглашения о сотрудничестве с АО «НТЦ ФСК ЕЭС» на цифровой модели реального времени RTDS проведены испытания взаимодействия линейного УШРТ мощностью 180 Мвар напряжением 500 кВ с расщепленными вентильными обмотками с релейной защитой линии с функцией адаптивного ОАПВ. В результате исследования установлено, что адаптивное ОАПВ, основные и резервные защиты линии, реализованные в шкафах ШЭ2710 582 (ДФЗ), ШЭ2710 591 (ДЗЛ), ШЭ2710 538 (НДЗ) и ШЭ2710 521 (КСЗ), работают правильно на линиях, оснащенных линейным УШРТ 500 кВ с расщепленными вентильными обмотками, а выбор уставок защит должен проводиться согласно действующим методикам.

УШР ЗА РУБЕЖОМ

Попытки создания за рубежом различных типов управляемых шунтирующих реакторов предпринимались компанией BBC (в настоящее время входит в состав ABB Inc.). Известно, что в 1955 г. был изготовлен управляемый подмагничиванием реактор мощностью 100 Мвар на напряжение 10 кВ, а в 1970-е гг. — управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа (аналог УШРТ). Тем не менее широкого распространения за рубежом в XX в. УШР не получили из-за неприемлемых потерь, вибраций и ряда других технологических проблем [2].

Однако, как отмечено в докладе экспертов из компании ABB на сессии СИГРЭ 2014 г., в настоящее время за рубежом наблюдается возобновление интереса к УШР [11]. В частности, в электрической сети 420 кВ

ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА УШРТ С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ВО

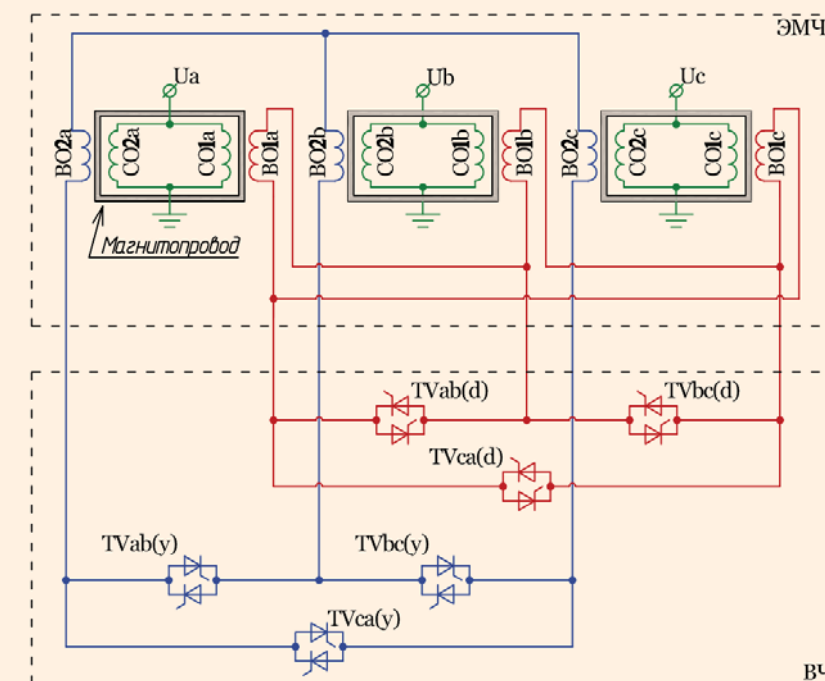


Рис. 2

Норвегии в 2012–2013 гг. было установлено восемь УШР, а в 2016 г. — еще два реактора. В Дании в 2013–2015 гг. было установлено семь УШР в сетях 400 кВ. Также в 2013–2015 гг. было поставлено четыре УШР в США для установки в сетях 345 и 143 кВ [12]. Необходимо отметить, что перечисленные выше УШР конструктивно представляют собой неуправляемый шунтирующий реактор с отпайками, позволяющими изменять мощность реактора с помощью устройства РПН.

Особенностью подобной конструкции УШР являются низкое быстродействие, узкий диапазон регулирования (по сравнению с УШР российского производства) и ступенчатое (не непрерывное) изменение мощности. Время изменения мощности от нижнего предела (50% мощности) до верхнего предела (100% мощности) может достигать 5 мин. [13].

УШР, регулируемые с помощью устройства РПН, в настоящее время начинают предлагать такие компании, как Siemens [14], Trench [13], Hyosung [14]. Компания NREnergy (Китай) предлагает УШР трансформаторного типа конструктивно более близкий к УШРТ, но отличающийся принципом улучшения гармонического состава токов реактора [16]. Стоит также отметить компанию Afritech, предлагающую УШР на базе электромагнитной части Запорожского трансформаторного завода [17]. Необходимо, однако, отметить, что в настоящее время существуют риски применения УШРП, обусловленные тем, что электромагнитная часть данных реакторов производится на Запорожском трансформаторном заводе (Украина).

Зарубежные производители в качестве основных областей применения УШР указывают:

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОАПВ ОТ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ

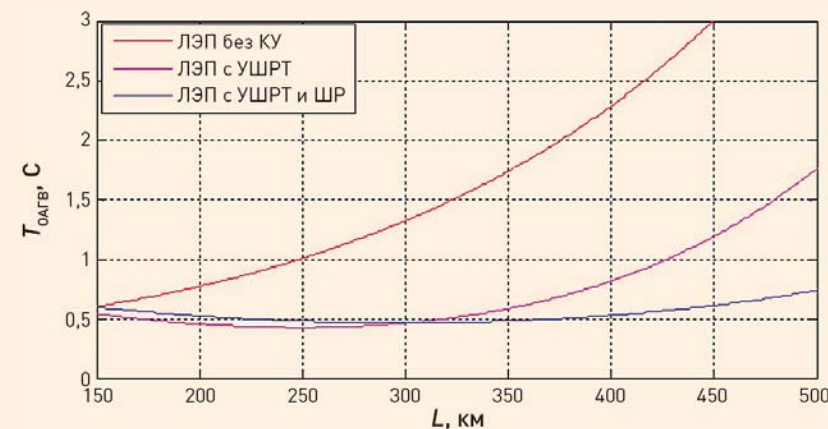


Рис. 3

РАБОТА УШРТ В ЦИКЛЕ ОАПВ ЛИНИИ 500 КВ ДЛИНОЙ 280 КМ

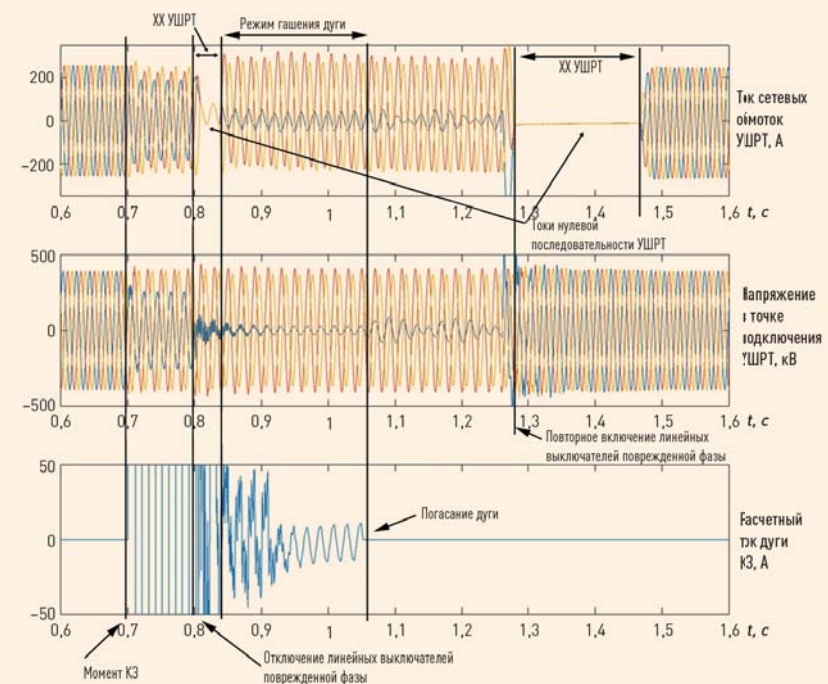


Рис. 4

ОСЦИЛЛОГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЕ ЛЭП В ЦИКЛЕ ОАПВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМАХ УПРАВЛЕНИЯ УШРТ

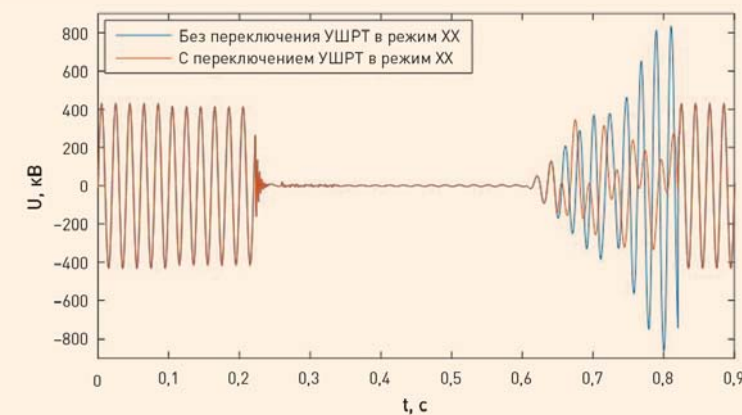


Рис. 5

ОСЦИЛЛОГРАММЫ ТОКОВ В ТВ УШРТ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ ИЗМЕНЕНИИ УСТАВКИ УГЛА УПРАВЛЕНИЯ

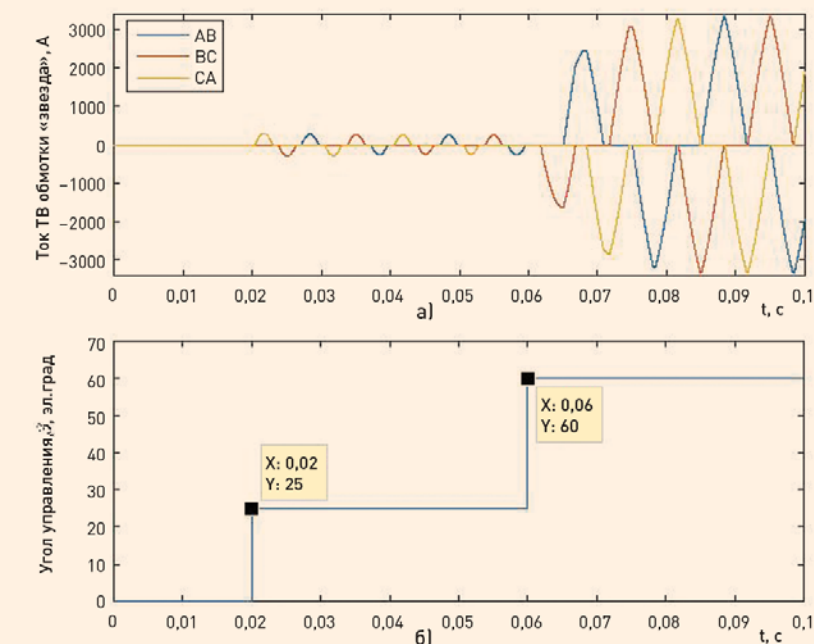


Рис. 6

1. стабилизацию напряжения в сети с распределенной генерацией [12, 13];
2. стабилизацию напряжения переменных нагрузок, питаемых протяженными воздушными или кабельными линиями [12, 13, 15];
3. снижение потерь в сетях [14];
4. увеличение пропускной способности ЛЭП [14, 16];
5. компенсацию тока подпитки дуги для повышения эффективности АПВ [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

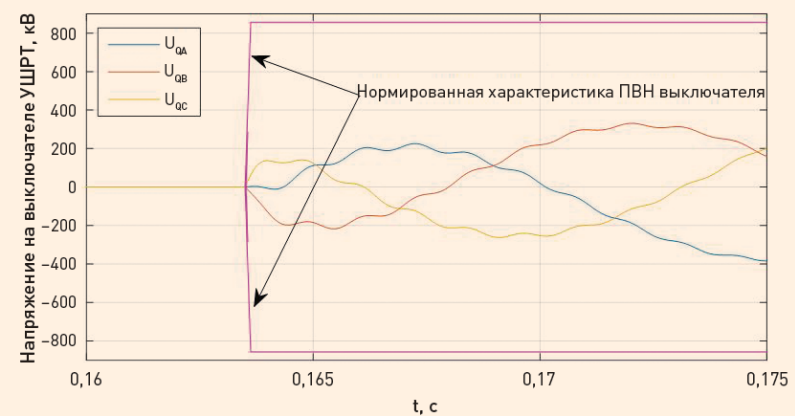
В настоящее время в мире наблюдается возобновление интереса к УШР. Накопленный опыт ПАО «ФСК ЕЭС» в области применения УШР является передовым в мире, а российские быстродействующие УШР обладают техническими преимуществами (более широкий диапазон регулирования мощности, большее быстродействие и больший спектр решаемых задач) по сравнению с зарубежными аналогами и потенциально могут быть востребованы на мировом рынке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения. Теоретические и практические основы. Т. 2. / Под ред. А.Ф. Дьякова // М.: НТФ «Энергопрогресс» корпорации «ЕЭЭК», 2012.
2. М.В. Дмитриев, А.С. Карпов, Е.Б. Шескин и др. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы / Под. ред. Г.А. Евдокунина. СПб.: Родная Ладога, 2013.
3. Г.Н. Александров, В.П. Лунин. Управляемые реакторы / Учеб. пособие. СПб.: ЦПКЭ, 2005.
4. В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. А.М. Матинян, М.В. Пешков, В.Н. Карпов, Н.А. Алексеев. Применение УШРТ с расщепленными обмотками для сокращения време-

- ни цикла ОАПВ линий 500 кВ // Электрические станции. 2016. № 8. С. 39–45.
- А.М. Матинян, М.В. Пешков, В.Н. Карпов, Н.А. Алексеев. Особенности УШРТ, обеспечивающие предотвращение резонанса напряжений в цикле ОАПВ линии // Электрические станции. 2016. № 11. С. 36–40.
 - А.М. Матинян, М.В. Пешков, В.Н. Карпов, Н.А. Алексеев, З.Е. Пугаченко. Особенности УШРТ, способствующие безопасному опробованию ЛЭП 500 кВ // Электрические станции. 2017. № 1. С. 33–37.
 - А.М. Матинян, М.В. Пешков, В.Н. Карпов, Н.А. Алексеев, Ю.А. Горюшин. Моделирование процесса отключения выключателем малых индуктивных токов УШРТ // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2017. № 2. С. 16–20.
 - А.Г. Долгополов, В.Н. Ивакин. Управляемые шунтирующие реакторы. Обзор и сравнительные характеристики // Новости электротехники. 2013. № 6. С. 30–35.
 - В.С. Чуприков, Д.С. Мологин. Реализация пилотного проекта CSRT (УШРТ) в энергосистеме Nortede Angola // Энергоэксперт. 2010. № 1. С. 14–20.

ОСЦИЛЛОГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕ УШРТ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ РЕАКТОРА ИЗ РЕЖИМА ХОЛОСТОГО ХОДА СО СРЕЗОМ ТОКА



ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗГОТОВЛЕННЫХ УШРТ С РАСЩЕПЛЕННОЙ ВО

№	Наименование объекта	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная мощность, Мвар	Длительность эксплуатации	Заказчик
1	ПС 110 кВ «Быстринская»	110	25	Ввод в 2017 г.	ПАО «ГМК «Норильский никель»
2	ПС 220 кВ «Светлая»	220	2 × 50	В эксплуатации с 2014 г.	ПАО «ФСК ЕЭС»
3	ПС 220 кВ «Кафа»	220	100	В эксплуатации с 2016 г.	ПАО «ФСК ЕЭС»
4	ПС 220 кВ «Пихтовая»	500	63	Ввод в 2017 г.	ПАО «Роснефть»
5	ПС 500 кВ «Моздок-2»	500	180	Поставка на объект в 2017 г.	ПАО «ФСК ЕЭС»
5	ПС 500 кВ «Усть-Кут»	500	180	Поставка на объект в 2017 г.	ПАО «ФСК ЕЭС»

Таблица 1

- C. Bengtosoan, K. Ryen, O.A. Rui, T. Olsson. Variable Shunt Reactors: Applications and System Aspects // CIGRE 2014.
- Shunt Reactors. Optimizing transmission voltage system / Zahra Norouzin // ABB Transformer and Reactors. Sep 6, 2016. [Режим доступа]: http://3rd.transfo.ir/editor_file/itce16-norouzin.pdf.
- Регулируемые шунтирующие реакторы для компенсации реактивной мощности [Режим доступа]: http://www.trenchgroup.com/en/Products-Solutions/Coil-Products/Variable-Shunt-Reactors/node_727.
- Variable Shunt Reactors for flexible grids [Режим доступа]: <http://www.energy.siemens.com/br/en/power-transmission/transformers/reactors/reactors.htm#content=Variable%20shunt%20reactors>.
- Shunt Reactors [Режим доступа]: http://www.hicoamerica.com/catalogs/HICO_shunt%20reactors%20catalog_%201504_single%20page_low%20res.pdf.
- PCS-9578 Controllable shunt reactor [Режим доступа]: <http://www.nrec.com/en/product/PCS-9578.html>.
- Transformers and electrical reactors [Режим доступа]: http://www.afriteksa.co.za/Transformers_Electrical_Reactors.php.



Великолукский завод электротехнического оборудования ЗАО «ЗЭТО» занимается разработкой и производством высоковольтного оборудования для электроэнергетики, нефтегазового комплекса, добывающей и перерабатывающей промышленности, железных дорог, метрополитена, муниципального, сельского хозяйства и других отраслей.

ПРОДУКЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗАО «ЗЭТО»:

- Разъединители наружной установки с фарфоровой изоляцией от 10 до 1150 кВ на токи 200-4000 А и с полимерной изоляцией от 10 до 220 кВ на токи 1000-3150 А с приводами.
- Разъединители полупантографного типа на 330-750 кВ, на ток 3150 А и пантографного типа на 110-500 кВ, на токи 2000-3150 А.
- Разъединители внутренней установки от 10 до 35 кВ переменного тока 1000-12500 А.
- Разъединители внутренней установки на 1,5 кВ постоянного тока 40-50 кА.
- Шинные опоры на номинальное напряжение от 35 до 1150 кВ.
- Заземлители наружной и внутренней установки от 10 до 750 кВ.
- Ограничители перенапряжений нелинейные от 0,38 до 500 кВ.
- Разрядники от 0,5 до 220 кВ.
- Комплекты ошиновки жесткой для ОРУ 110-750 кВ.
- Комплектные блочно-модульные распределительные устройства 35-220 кВ.
- Газонаполненные колонковые выключатели типа ВГТ-110, 220 кВ.
- Газонаполненные баковые выключатели ВТБ-110 кВ.
- Газонаполненные трансформаторы тока серии ТОГФ-110-500 кВ.
- Газонаполненные трансформаторы напряжения ЗНОГ-110, 220 кВ.
- Комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией КРУЭ-110 кВ.
- Подстанции трансформаторные 10/0,4 кВ мощностью от 25 до 600 кВА.
- Устройства комплектные распределительные КРУ ЗЭТО на 6(10) и 20 кВ.
- Предохранители-разъединители выхлопного типа ПРВТ-10 кВ.
- Полимерные изоляторы: опорные 10-220 кВ; подвесные линейные 35-500 кВ.
- Низковольтное оборудование.
- Электрооборудование для метрополитена.

Предприятие сертифицировано в соответствии с требованиями международных стандартов менеджмента качества ISO 9001-2008 и экологического менеджмента ISO 14001-2004.

182113, Россия, Псковская обл., г. Великие Луки, пр. Октябрьский, 79
Тел.: +7(81153) 6-37-32, 6-38-39, факс: +7(81153) 6-38-45
info@zeto.ru | marketing@zeto.ru
www.zeto.ru | www.zeto.pf

www.facebook.com/zao.zeto
www.vk.com/zao.zeto

Делаем мир ярче