

Модифицированная серия управляемых шунтирующих реакторов и источников реактивной мощности

УДК 621.311:621.316

В статье рассмотрены известные на сегодня конструкторские исполнения управляемых шунтирующих реакторов (УШР). Авторами предложена новая модифицированная серия УШР с подмагничиванием, ее конструктивные особенности и расширенные функциональные возможности. Указаны недостатки существующих конструкций, послужившие причиной для модификации УШР с подмагничиванием. Отдельно подробно рассмотрены негативные влияния нелинейностей характеристик тока и напряжения на качество электрической сети в точке подключения УШР как с подмагничиванием, так и управляемых тиристорами. Показано, что в предложенной модифицированной серии УШР с подмагничиванием искажения формы тока и напряжения не превышают требуемых нормативных значений. Кроме того, предложена новая серия источников реактивной мощности с независимым регулированием фаз, обеспечивающая нормативное качество электроэнергии сети, питающей несимметричную нелинейную нагрузку.

Брянцев А.М.,

д.т.н., профессор, председатель наблюдательного совета ООО «ЭСКО»

Брянцев М.А.,

член правления Clever Reactor SIA

Макарова М.А.,

заместитель генерального директора по развитию ООО «ЭСКО»

Ключевые слова:

качество электроэнергии, управляемые шунтирующие реакторы, управляемый подмагничиванием шунтирующий реактор, управляемый тиристорными вентилями шунтирующий реактор, нелинейные искажения тока и напряжения, источники реактивной мощности с независимым регулированием фаз, симметрированные электрических режимов трехфазной сети

Keywords:

power quality, automatic voltage control, reactive power compensation, controlled shunt reactor, magnetically controlled shunt reactor, thyristor-controlled shunt reactor, harmonic distortion of current and voltage, magnetic static var compensator, reactive power source with independent phase regulation, symmetric regimes of three-phase grid

ВВЕДЕНИЕ

С начала промышленного производства и по настоящее время управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы (УШРп) пользуются устойчивым спросом с постоянно расширяющимся рынком сбыта [1]. В электрических сетях РФ и других стран эксплуатируется более сотни УШРп мощностью от 10 до 180 Мвар, напряжением от 10 до 500 кВ. Установленная мощность УШРп всех типов составляет около 9 Гвар (таблица 1), в том числе источников реактивной мощности (ИРМ) на базе УШРп и батарей конденсаторов. Наибольшее применение УШРп находят в электрических сетях Сибирского и Дальневосточного регионов РФ. Сегодня УШРп изготавливают заводы: «Запорожтрансформатор» (Украина) — на рисунке 1, ETD TRANSFORMATORY (Чехия) — на рисунке 2 и «Электрозавод» (Россия). Как по конструкции, так и по электрической схеме УШРп имеют существенные различия. УШРп производства Запорожского трансформаторного завода имеют три конструктивных модификации УШР напряжением 35–500 кВ [2, 3, 4]. Завод ETD TRANSFORMATORY производит УШРп напряжением 6–35 кВ с совмещенной обмоткой пере-

ОБОРУДОВАНИЕ



Табл. 1. Производство УШРп и ИРМ на их базе с 1998 г.

Тип УШР	Класс напряжения, кВ	Всего УШР, шт / Мвар	УШР в составе ИРМ, шт / Мвар
10 000/10	10	6 / 60	6 / 60
10 000/35	35	4 / 40	4 / 40
25 000/35	35	11 / 275	125
25 000/110	110	31 / 775	10 / 250
63 000/110	110	1 / 63	- / -
25 000/220	220	2 / 50	1 / 25
60 000/220	220	1 / 60	1 / 60
63 000/220	220	7 / 441	- / -
100 000/220	220	20 / 2 000	1
180 000/330	330	4 / 720	1 / 180
100 000/400	400	7 / 700	7 / 700
180 000/500	500	18 / 3 240	- / -
ИТОГО:		112 / 8 424	36 / 1 540

менно-постоянного тока [5, 6]. В конструкции и схеме УШРп 180 Мвар 500 кВ производства «Электрозащит» использованы технические решения, отличающиеся от конструкций реакторов «Запорожтрансформатор» и ETD TRANSFORMATORY [7, 8, 9].

Кроме УШРп последние годы активно осваивается производство и применение шунтирующих реакторов, управляемых тиристорами (УШРт). Опыт эксплуатации УШР обоих типов показал, что в определенных случаях их нелинейные параметры могут негативно сказываться на качестве напряжения в точке их подключения и прилегающей сети.

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ

В силу нелинейности регулировочных характеристик изменение потребляемой мощности управляемых шунтирующих реакторов сопровождается искажениями форм тока и напряжения обмоток. Такие искажения негативно сказываются на качестве напряжения электрической сети. В качестве примера, характерного для сети 220 кВ с использованием УШР мощностью 30 Мвар, проанализированы графики изменения тока и напряжений обмоток управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора [10]. УШРп подключен к центру питания через электрическую сеть с мощностью короткого замыкания (КЗ), равной 10-кратной номинальной мощности реактора, что характерно для большинства подстанций Сибири и Дальнего Востока, где установлены УШРп (рисунок 3). Расчетная модель УШРп соответствует варианту исполнения, описанному в патенте РФ № 2447529 [10].

Несмотря на то что напряжение центра питания строго синусоидально, а искажения формы тока относительно невелики (примерно на половине диапазона регулирования мощности УШРп незначительно превышают требования отраслевого стандарта ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.180.03.198-2015),



Рис. 1. УШР на базе РТУ-100000/220 на ПС «Хабаровск»



Рис. 2. УШР на базе РТУ-10000/10 на ПС «Кумколь» (Республика Казахстан)

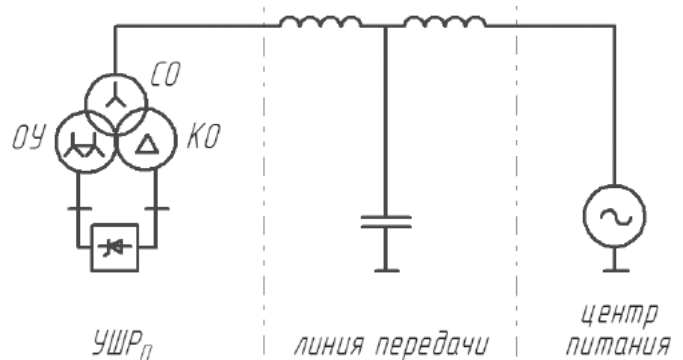


Рис. 3. Принципиальная однолинейная схема подключения УШРп к центру питания через линию электропередачи

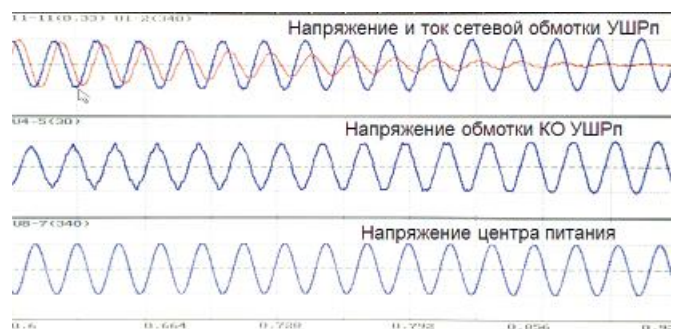


Рис. 4. Моделирование искажений формы напряжений и тока в диапазоне регулирования мощности УШРп

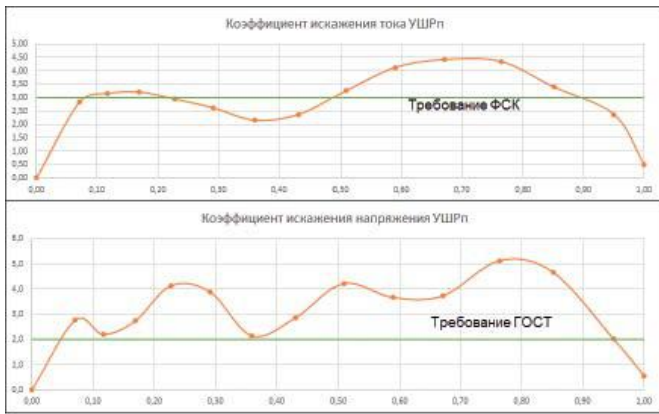


Рис. 5. Коэффициенты искажения форм тока и напряжения в УШРп

искажения напряжений как компенсационной, так и сетевой обмоток превышают требования ГОСТ 32144-2013 во всем диапазоне регулирования (рисунки 4 и 5).

Та же качественная картина имеет место и при подключении к электрической сети шунтирующего реактора, управляемого тиристорами, с расщепленными вентильными обмотками (рисунок 6). Расчетная модель УШРт соответствует варианту исполнения, описанному в патенте РФ № 2518149 [11]. Различие заключается в том, что, несмотря на относительно небольшие по условиям стандарта организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.180.03.198-2015 искажения тока, нарушения формы синусоидальности напряжения вентильных обмоток и сетевой обмотки при установке УШРт имеют место в большей части диапазона регулирования и носят более выраженный характер, чем при установке УШРп (рисунки 7 и 8).

В рассмотренных случаях нарушения качества напряжения электрической сети обусловлены искажениями, возникающими в обмотках низкого напряжения (обмотках НН) управляемых шунтирующих реакторов обоих типов. Вследствие трансформаторной связи искажения формы напряжения обмоток транслируются непосредственно в электрическую сеть. В УШРп в электрическую сеть передаются и резонансно усиливаются искажения, возникающие в напряжении компенсационной обмотки, а в УШРт искажения напряжения в электрической сети вызываются искажениями напряжения вентильных обмоток, и также передаются и резонансно усиливаются в прилегающей электрической сети.

Таким образом, из приведенных выше примеров расчетов, касающихся частных случаев, следует весьма важное принципиальное обобщение, заключающееся в том, что в УШР обоих типов недостаточно устранить нелинейные искажения в их сетевых токах, необходимо обеспечить исключение нелинейных искажений и в напряжении обмоток: вентильных — в УШРт, компенсационных — в УШРп.

В УШРп [10] данная проблема решается заменой компенсационной обмотки на трансформаторную обмотку НН с подключением к ней широкополосного фильтра высших гармоник (ФВГ) (рисунок 9).

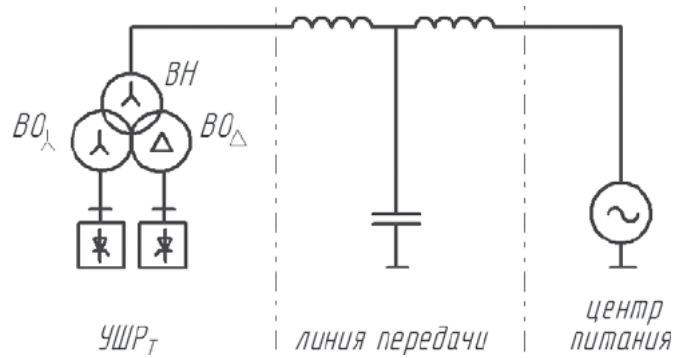


Рис. 6. Принципиальная однолинейная схема подключения УШРт к центру питания через линию электропередачи

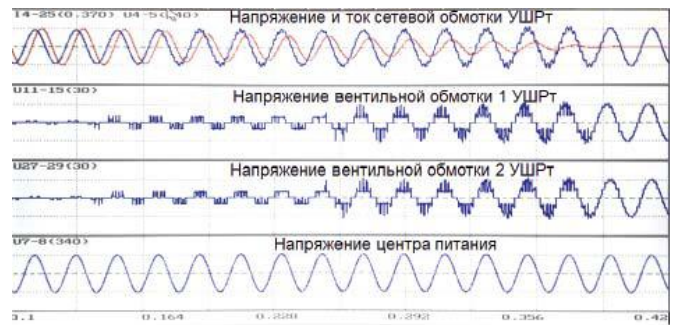


Рис. 7. Моделирование искажений форм напряжений и тока во всем диапазоне регулирования мощности УШРт

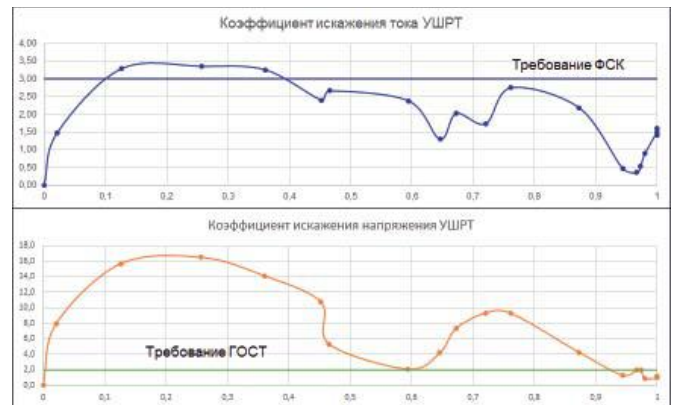


Рис. 8. Коэффициенты искажений тока и напряжения в УШРт

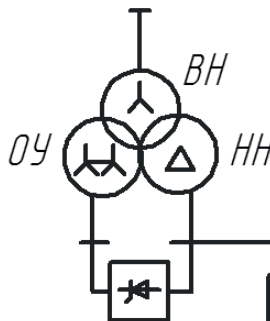


Рис. 9. Схема УШРп с подключением к обмотке низкого напряжения фильтром высших гармоник

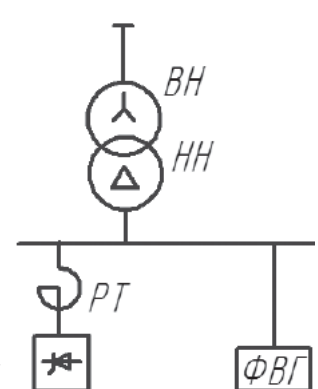


Рис. 10. Схема УШРп с подключением к обмотке НН фильтром высших гармоник и токоограничивающим реактором, включенным последовательно с тиристорным ключом

В УШРт для достижения того же эффекта использования только одного фильтра оказывается недостаточным. Дополнительно требуется изменить схему и конструкцию обмоток трансформатора, а также подключить последовательно с вентиляльными ключами токоограничивающие реакторы (например, как это показано на рисунке 10). Следует подчеркнуть, что вариант исполнения УШРт по рисунку 10 имеет принципиально иное техническое решение в сравнении с вариантом УШРт по патенту РФ № 2518149 [11].

В результате изменения схем и комплектующих УШРп (рисунок 9) и УШРт (рисунок 10) форма тока и напряжения обмоток становится практически синусоидальной во всем диапазоне регулирования мощности (рисунки 11 и 12). Идентичность регулировочных характеристик двух различных по схеме и принципу действия вариантов УШР объясняется тем, что при соблюдении определенных соотношений параметров УШРп по рисунку 9 и УШРт по рисунку 10 эти варианты могут проявлять свойство дуальности. Критерии подобия, при которых достигается идентичность регулировочных характеристик, описаны в публикациях [12, 13].

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УШР МОДИФИЦИРОВАННОЙ СЕРИИ

Модифицированная серия управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов (УШРм) в отличие от прототипов имеет единую конструкцию, электрическую схему и состав оборудования во всем диапазоне мощностей 4–330 Мвар и классов напряжения 6–750 кВ (рисунок 13). В тоже время при разработке УШРм сохранены следующие основные функции УШРп:

- высокоточная автоматическая стабилизация напряжения в точке подключения с отклонением от установленного значения не более 0,3% [6];
- безынерционный, менее, чем за 0,02 с, выход на номинальную мощность при подключении к сети [2];
- параметрический наброс/сброс мощности при аварийных возмущениях напряжения сети [14];
- переход из любого текущего режима в режим фиксированного значения потребляемой мощности на время паузы ОАПВ [15].

Принципиальным отличием УШРм является использование широкополосного фильтра высших гармоник, позволяющего улучшить форму тока и напряжения обмоток [16]. В любом из УШРм в пределах рабочего диапазона регулирования мощности коэффициент искажений формы тока не превышает 1,5–2% от номинального значения, а синусоидальность напряжения обмоток соответствует требованиям ГОСТ 32144-2013.

В модифицированной серии УШРм полностью устранено негативное влияние параметров нелинейности на качество напряжения в точке подключения. Также в отличие от прототипов конструкция УШРм содержит полноценную вторичную обмотку трансформаторного типа, а обмотка управления (регулирующая обмотка) выполняется с глухо заземленной

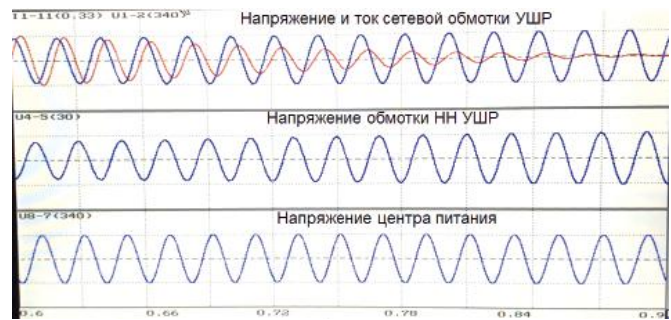


Рис. 11. Моделирование формы напряжения и тока в диапазоне регулирования мощности при изменении схемы и включении ФВГ в состав комплектующих УШРт и УШРп

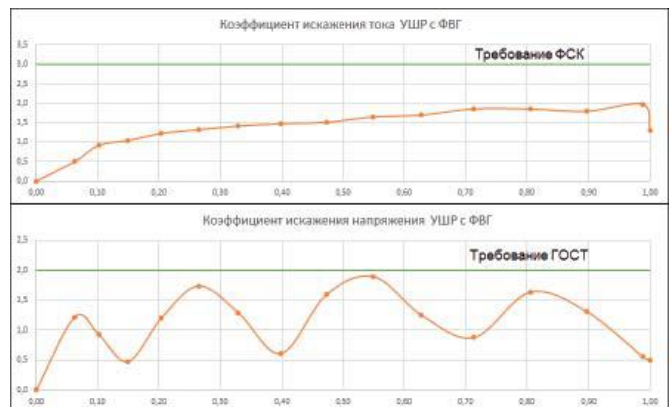


Рис. 12. Коэффициенты искажений тока и напряжения при изменении схемы и включении ФВГ в состав комплектующих УШРт и УШРп

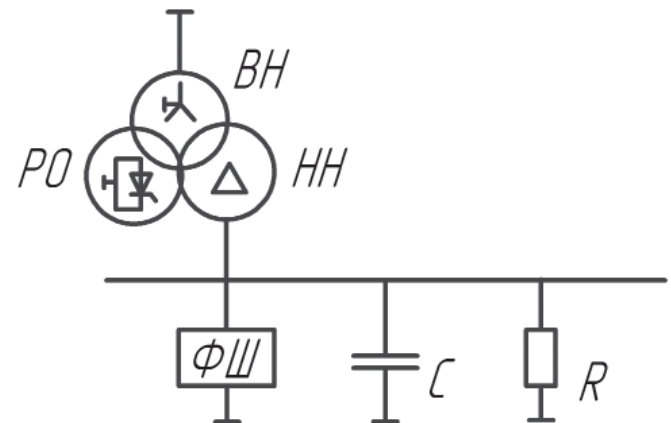


Рис. 13. Принципиальная однолинейная схема УШРм, содержащая обмотки высокого (ВН) и низкого напряжения (НН), регулировочную обмотку (РО) с подключенными к обмотке НН с широкополосным фильтром высших гармоник (ФШ), емкостной нагрузкой С и сетью общего назначения R

средней точкой [17]. При разработке УШРм использовано не менее десятка патентов и полезных моделей РФ и других стран.

Применение в конструкции УШРм новых элементов с определенными взаимными соотношениями и изменение критериев оптимизации параметров комплектующего оборудования позволило расширить функциональные возможности в части:

- длительности перегрузки (превышение номинального значения мощности) в 1,4 раза с сохранением

синусоидальности формы тока и напряжения вторичной обмотки в диапазоне регулирования мощности [18];

- плавного регулирования мощности от номинального потребления (индуктивный режим) до номинальной выдачи (емкостной режим) за счет подключения ко вторичной обмотке емкостной нагрузки за время, не превышающее 0,2–0,3 с [19];
- отбора мощности от вторичной обмотки в электрическую сеть общего назначения, вплоть до номинального значения мощности первичной обмотки [1].

Таким образом, технические характеристики УШРм соответствуют требованиям стандарта ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.180.03.198-2015 на управляемые шунтирующие реакторы.

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ УШРм ДЛЯ СИММЕТРИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Техническими решениями модифицированной серии УШРм предусмотрена возможность независимого управления мощностью фаз во всем диапазоне регулирования [17]. В итоге возникает перспектива применения источников реактивной мощности на базе УШРм в электрической сети с несимметричной нелинейной нагрузкой, например, в схемах электроснабжения электрифицированной железной дороги.

В качестве примера на рисунке 14 показан один из возможных вариантов подключения источников реактивной мощности с независимым регулированием мощности фаз (ОИРМ) к обмоткам трехфазного трансформатора с нелинейной двухфазной нагрузкой по схеме Штайнмеца [20]. Фрагменты результатов расчета напряжений и токов в обмотке НН трансформатора и двухфазной нелинейной нагрузки Н1, Н2 при наличии и отсутствии ОИРМ показаны на рисунке 15. Как видно из результатов расчета, подключение ОИРМ к обмотке НН (3хОИРМнн) трансформатора обеспечивает симметрию и ликвидацию нелинейных искажений его фазных напряжений и токов (рисунок 15). Причем, несмотря на то что форма токов нагрузок Н1, Н2, (рисунок 16) и токов фаз 3хОИРМнн (рисунок 17) имеет явно выраженные искажения, это никак не сказывается на синусоидальности напряжений и токов обмоток НН. Если же 3хОИРМнн отключается, нагрузки Н1, Н2 вызывают несимметрию и искажения напряжений и токов в обмотке НН трансформатора (рисунок 15).

Источник реактивной мощности ОИРМ, подключенный параллельно обмотке ВН трансформатора, (3хОИРМвн) выполняет те

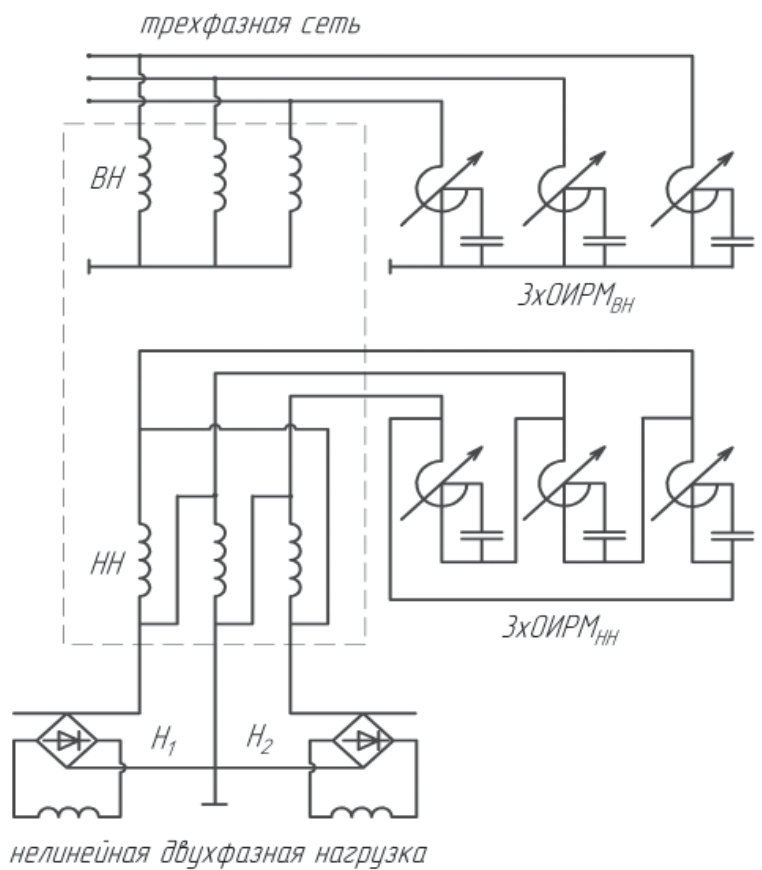


Рис. 14. Принципиальная схема подключения ОИРМ к трехфазной электрической сети, питающей нелинейную двухфазную нагрузку

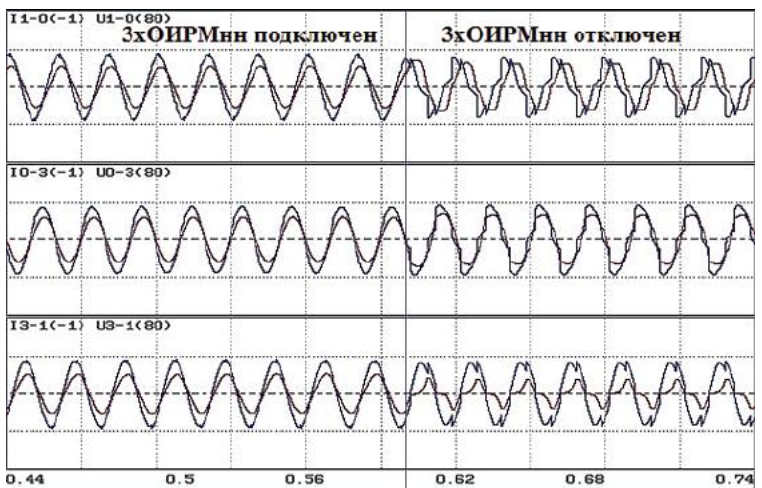


Рис. 15. Токи и напряжения в обмотке НН трансформатора

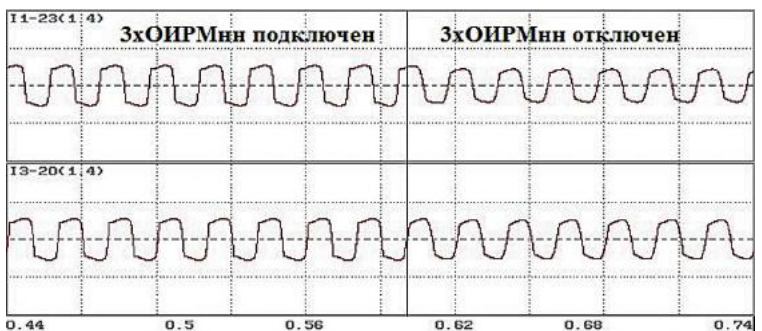


Рис. 16. Токи в нелинейной двухфазной нагрузке Н1, Н2

же функции снижения несимметрии и нелинейных искажений, вызываемых подключенной нелинейной двухфазной нагрузкой, но уже по отношению к внешней сети.

В заключение следует отметить важное обстоятельство, что наряду с известными положительными эффектами применение ОИРМ позволяет также минимизировать переток реактивной мощности из внешней сети в нелинейную двухфазную нагрузку (рисунок 15), благодаря чему повышается возможность использования трансформатора для передачи активной мощности из трехфазной сети. Применительно к схемам электроснабжения электрифицированной железной дороги с учетом существующих параметров внешней сети и подстанций, характерных для Байкало-Амурской магистрали, повышение пропускной способности тяговых трансформаторов может достигать 15–20%.

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УШРМ И ИРМ НА ИХ ОСНОВЕ

Предварительное участие в торгах на закупку УШР напряжением 110, 220 и 500 кВ показало высокую конкурентоспособность УШРм по сравнению с аналогами в части функциональных возможностей, потерь и стоимости оборудования. Как устройство, обладающее функцией статического компенсатора реактивной мощности электромагнитного типа, или как устройство, обладающее функцией симметрирующего трансформатора с независимым регулированием мощности фаз, модифицирован-

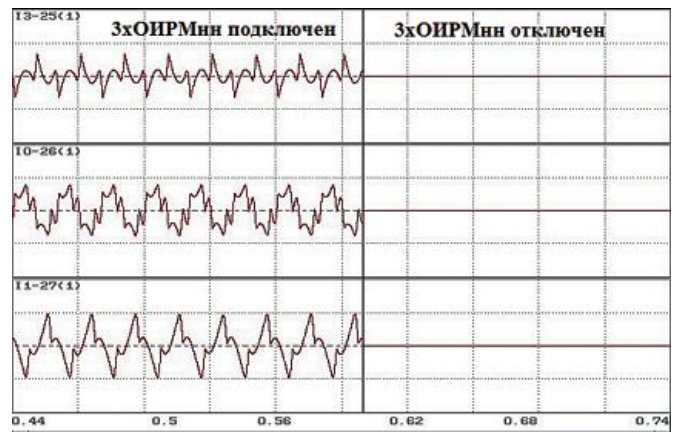


Рис. 17. Токи фаз 3x OIРMнн

ная серия управляемых шунтирующих реакторов прямых аналогов не имеет.

ВЫВОДЫ

1. Существующие типы УШР могут вызывать появление высших гармоник напряжения, уровень которых значительно превышает требования ГОСТ 32144-2013 как в точке подключения, так и в прилегающей сети.
2. Предложенные авторами схемы и конструкции позволяют устранить недостатки, присущие обим типам УШР.
3. Источники реактивной мощности с независимым регулированием фаз обеспечивают нормативное качество электроэнергии трехфазной сети, питающей нелинейную несимметричную нагрузку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базылев Б.И., Зазимко К.Г., Макарова М.А., Смолвик С.В. Опыт применения управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов в сетях различных классов напряжения // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2016, № 3. С. 28–33.
2. Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Лурье А.И., Евдокунин Г.А., Бики М.А., Уколов С.В., Авдонин А.Г., Шипицын В.П. Результаты эксплуатации управляемого подмагничиванием трехфазного шунтирующего реактора // Электрические станции, 2001, № 12. С. 44–50.
3. Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Лурье А.И., Зильберман С.М., Бики М.А., Уколов С.В. Трехфазный шунтирующий управляемый реактор мощностью 100 МВ А, 220 кВ на подстанции «Чита» МЭС Сибири // Электротехника, 2003, № 1. С. 22–30.
4. Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Лурье А.И. Впервые в сети 500 кВ введен в эксплуатацию новый управляемый подмагничиванием шунтирующий реактор мощностью 180 МВ А // Электричество, 2006, № 8. С. 65–68.
5. Брянцев А.М. Электрический трехфазный реактор с подмагничиванием. Патент № 2418332 РФ.
6. Базылев Б.И., Брянцев М.А., Дягилева С.В., Лурье А.И., Негрышев А.А. Источник реактивной мощности на подстанции 35 кВ Ванкорского нефтяного месторождения // Электротехника, 2012, № 3. С. 59–62.
7. Брянцев А.М. Электроиндукционное устройство. Авторское свидетельство СССР № 1164795 // Открытия. Изобретения, 1985, № 24.
8. Брянцев А.М. Основные уравнения и характеристики магнитно-вентильных управляемых реакторов с сильным насыщением магнитной цепи // Электротехника, 1991, № 2. С. 24–28.
9. Makarevich L., Mastryukov L., Ivakin V. etc. Controlled shunt reactor 500 kV 180 MVA with new design. Filed experience at NELYM substation / SIGRE-A2_206_2014.
10. Брянцев А.М. Трехфазный управляемый подмагничиванием реактор. Патент № 2447529 РФ.
11. Булыкин П.Ю., Крайнов С.В., Федосов Л.Л. Управляемый реактор с трехстержневым магнитопроводом. Патент № 2518149 РФ.
12. Брянцев А. М., Макаров П. Н. Дуальная модель трехфазного управляемого реактора. Патент № 128039 РФ.
13. Брянцев А.М. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы как элемент электроэнергетической системы / Управляемые подмагничиванием электрические реакторы. Сб. статей. 2-е дополненное издание. М.: «Знак», 2010. С. 5–10.
14. Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Липатов Ю.А., Лурье А.И., Маклецова Е.Е. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы для сети 35–500 кВ // Электротехника, 2003, № 1. С. 5–13.
15. Брянцев А.М., Долгополов А.Г. Способ гашения дуги однофазного замыкания на землю в пау-

- зе ОАПВ линии электропередачи с шунтирующим трехфазным реактором. Патент № 2341858 РФ.
16. Брянцев А.М. Статический компенсатор реактивной мощности. Патент № 2510556 РФ.
17. Брянцев А.М. Трехфазный управляемый подмагничиванием реактор. Патент № 2451353 РФ.
18. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 528 с.
19. Брянцев А.М., Базылев Б.И., Лурье А.И., Райченко М.О., Смоловик С.В. Управляемые ферромагнитные устройства с предельным насыщением в системах компенсации реактивной мощности и стабилизации напряжения высоковольтных сетей // Энергоэксперт, 2013, № 5. с. 40–46.
20. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Иванова Е.С. Анализ схем симметрирования на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока // Системы. Методы. Технологии, 2013, № 4(20). С. 68–73.

REFERENCES

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.
9. Makarevich L., Mastryukov L., Ivakin V. etc. Controlled shunt reactor 500 kV 180 MVA with new design. Filed experience at NELYM substation / SIGRE–A2_206_2014.
- 10.
- 11.
- 12.
- 13.
- 14.
- 15.
- 16.
- 17.
- 18.
- 19.
- 20.