



Сборник трудов
Международной научно-практической
конференции

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

23-25 ноября 2016 г.



Proceedings of the International Conference

POWER QUALITY MANAGEMENT

November 23-25, 2016

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ 2016



9 785905 486142



**Международная научно-практическая
конференция**

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

**Сборник трудов
23–25 ноября 2016
Москва**

International Conference

POWER QUALITY MANAGEMENT

Proceedings

**November 23–25, 2016
Moscow, Russia**

УДК 621.3:658.56

ББК 31.29

C231

Управление качеством электрической энергии: сборник
С231 трудов Международной научно-практической конференции. (Москва, 23–25 ноября 2016 г.). — М. : ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2017. — 300 с. : ил.

ISBN 978-5-905486-14-2

Публикуемые в настоящем сборнике доклады отражают актуальные проблемы управления качеством электроэнергии: дают отчетливое представление о достигнутых результатах, решаемых задачах и целях, которые стоят перед инженерами, исследователями и руководителями электроэнергетического комплекса в последние годы в области обеспечения качества электроэнергии. В сборнике читатель найдет ответы на многие поставленные вопросы — от подходов к построению современных систем мониторинга до методов определения причин снижения качества электроэнергии.

УДК 621.3:658.56

ББК 31.29

ISBN 978-5-905486-14-2



© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2017

© Авторы, 2017

ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Р. Р. Карымов, В. В. Сысоев, В. Б. Чобан
Сетевые компенсаторы реактивной мощности, Россия
rinat.karymov@faramax.com

Аннотация. В настоящем докладе рассмотрены аспекты применения управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов для обеспечения баланса реактивной мощности на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог 27,5 кВ переменного тока. Показано, что возникающие при работе этих устройств искажения синусоидальности формы кривой напряжения не приводят к перегрузке существующих фильтрокомпенсирующих устройств токами гармоник, а также не превышают допустимых значений, установленных действующими нормативными документами. В докладе также представлены результаты экономической оценки, подтверждающие высокую экономическую эффективность этого технического решения.

Ключевые слова: управляемый подмагничиванием шунтирующий реактор, качество электроэнергии, гармоники тока, гармоники напряжения, тяговая подстанция.

Введение

Динамичное развитие железных дорог, в том числе высокоскоростных, приводит к значительному повышению доли тяговой нагрузки в составе нагрузки энергосистемы. К специфике тяговой нагрузки можно отнести высокое реактивное электропотребление, колебательный, неравномерный в течение суток характер нагрузки, значительное искажение синусоидальности формы привою тока и напряжения вследствие использования мощных преобразователей на электровозах.

В настоящее время тяговые подстанции (ТП) переменного тока напряжением 27,5 кВ в странах бывшего СССР в основном оснащены нерегулируемыми устройствами компенсации реактивной мощности на базе конденсаторных батарей (КБ). Это техническое решение затрудняет выполнение требований энергоснабжающих организаций

(ЭСО) по потреблению и регулированию реактивной мощности на подстанциях с большими колебаниями нагрузки. Кроме того, такие компенсирующие устройства (КУ) не позволяют осуществлять регулирование напряжения на шинах ТП, которое в значительной степени влияет на надежность работы электроподвижного состава так как при значительных понижениях напряжения, уменьшаются не только скорости движения поездов, но и пропускная и провозная способность участка [1].

Техническое решение на базе УШР

Решением проблемы управляемой компенсации реактивной мощности является применение регулируемых КУ. К настоящему времени для этих целей разработаны одноступенчатые и многоступенчатые регулируемые КУ [2], мощность которых изменяют коммутацией секций КБ. Общими недостатками таких КУ являются значительные броски токов и напряжений при коммутации секций КБ, что ограничивает коммутационный ресурс выключателей и снижает надежность этих устройств, а также дискретное изменение генерируемой КБ реактивной мощности. В качестве перспективных рассматриваются КУ с использованием управляемых реакторов с вращающимся магнитным полем, включаемых параллельно с КБ через общий выключатель [3]. Однако технологическая сложность изготовления и низкое напряжение рабочей обмотки затрудняют создание реакторов такого типа с приемлемыми технико-экономическими показателями. В тоже время аналогичные по функциям устройства, так называемые источники реактивной мощности (ИРМ), созданные на базе управляемых шунтирующих реакторов (УШР) магнитно-вентильного типа [4] уже более двух десятков лет успешно применяются в электрических сетях 35 – 500 кВ энергосистем ряда стран для регулирования напряжения и баланса реактивной мощности. Применение таких устройств на тяговых подстанциях позволит не только обеспечивать выполнение требований ЭСО по потреблению реактивной мощности, но и регулировать напряжение в контактной сети, способствовать снижению потерь активной мощности. В этой связи представляет большой научный и практический интерес использовать ИРМ и на тяговых подстанциях переменного тока.

Проведенные расчеты по выбору параметров и конструктивного исполнения однофазного УШР для ТП напряжением 27,5 кВ показа-

ли принципиальную возможность создания реактора для электрифицированных железных дорог переменного тока на требуемую мощность. При этом основное конструктивное отличие этих реакторов от УШР, применяемых в энергосистемах, состоит в том, что устройства фильтрации гармоник тока, генерируемых УШР в сеть, включаются параллельно с УШР. С одной стороны, это связано с тем, что необходимо снижать значения гармоник токов и напряжений, генерируемых электровозами, а с другой, тем, что мероприятия по снижению высших гармоник, применяемые в трехфазных установках (например, соединение в треугольник компенсационной обмотки), не могут быть использованы в однофазных УШР. Поскольку КУ на тяговых подстанциях работают только в режиме выдачи реактивной мощности, то для этого можно использовать фильтрокомпенсирующее устройства (ФКУ), которые обеспечивают одновременно фильтрацию высших гармоник тока и выдачу реактивной мощности в сеть на основной частоте. Так как УШР и электровозы (ЭВ) являются источниками нечетных гармоник, представляется целесообразным использовать уже освоенные промышленностью ФКУ для контактной сети переменного тока 25 кВ.

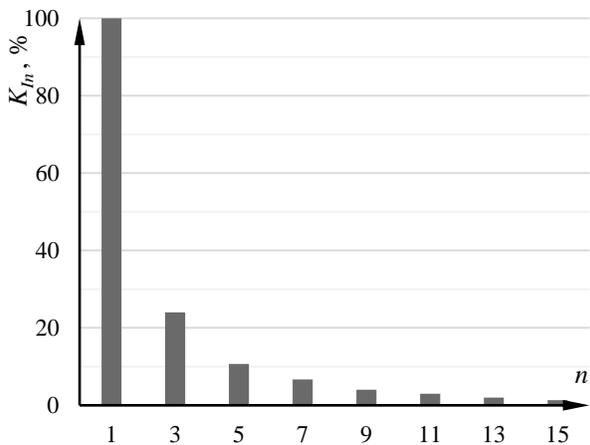
Целью исследования является проведение сравнительного анализа двух вариантов КУ с оценкой перегрузки КБ ФКУ и несинусоидальности напряжения на шинах 27,5 кВ и на КБ ФКУ:

1 вариант — применение на ТП двух нерегулируемых КУ стандартного исполнения типа КС2-1,05-75 в виде ФКУ с воздушными реакторами. ФКУ имеет следующие параметры [2]: номинальное напряжение 33,6 кВ; номинальная мощность на основной частоте 3650 квар; $C_{\text{ФКУ}}$ составляет 13,54 мкФ; $L_{\text{ФКУ}}$ составляет 89 мГн; резонансная частота ФКУ — 145 Гц.

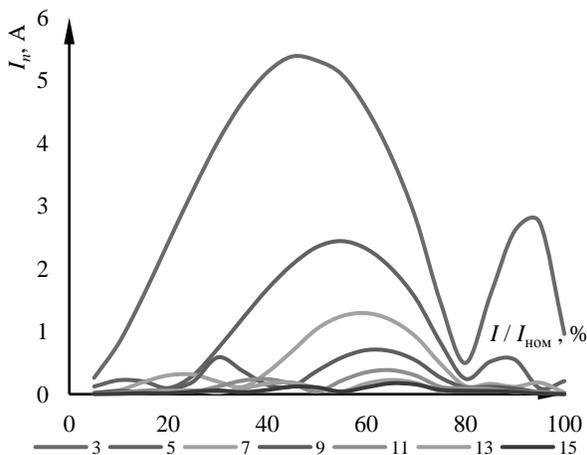
2 вариант — применение на ТП двух ИРМ в составе ФКУ (с параметрами, соответствующими первому варианту) с параллельно включенным УШР. В такой схеме УШР осуществляет плавное регулирование генерируемой ФКУ реактивной мощности на основной частоте. УШР имеет следующие параметры: номинальная мощность 3600 квар; номинальное напряжение 27,5 кВ; диапазон потребляемой реактивной мощности составляет 5 – 100% $S_{\text{ном}}$.

При проведении расчетов диапазон изменения эквивалентного индуктивного сопротивления системы принимается в диапазоне от 2 до 25 Ом [2], что соответствует мощности трехфазного короткого замыкания на шинах 27,5 кВ в диапазоне 30 – 378 МВА. Наибольшие

уровни гармоник в установившихся режимах на шинах 27,5 кВ наблюдаются при максимальном эквивалентном сопротивлении (минимальной мощности) системы, поэтому в дальнейших расчетах стационарных режимов значение эквивалентного индуктивного сопротивления системы принято равным 25 Ом (что соответствует минимальной мощности системы).



а)



б)

Рис. 1. Спектральный состав тока ЭВ и УШР в различных режимах работы

Принятые в расчетах спектры токов электровоза и УШР мощностью 3,6 Мвар в различных режимах потребления реактивной мощности приведены на рис. 1. Значения гармоник, генерируемых электровозом приняты в соответствии с [2], а для УШР спектр тока рассчитан в программе NRAST [3] на основании данных о конструкции магнитной системы и обмоток реактора.

Оценка влияния УШР на работу ФКУ в однофазной контактной сети 25 (27,5) кВ

Проведенные расчеты показали, что наличие параллельно с ФКУ включенной индуктивности УШР приводит к возникновению резонанса токов с резонансными частотами в диапазоне от 12 до 49 Гц. Однако в виду наличия активных сопротивлений ФКУ и УШР опасных резонансных явлений не выявлено.

Сравнительный анализ результатов расчета схем с ФКУ и ИРМ произведен по:

– Коэффициенту перегрузки конденсаторов по току $K_{пер I} = I / I_{ном}$,

где I — действующее значение тока, протекающего через конденсаторы ФКУ, $I_{ном}$ — номинальный ток конденсаторной батареи. Допустимое значение $K_{пер I}$ — не более 1,3.

– Коэффициенту перегрузки конденсаторов по напряжению $K_{пер U} = U / U_{ном}$,

где U — действующее значение приложенного к конденсаторам ФКУ напряжения, $U_{ном}$ — номинальное напряжение конденсаторов ФКУ. Допустимое значение $K_{пер U}$ — не более 1,1.

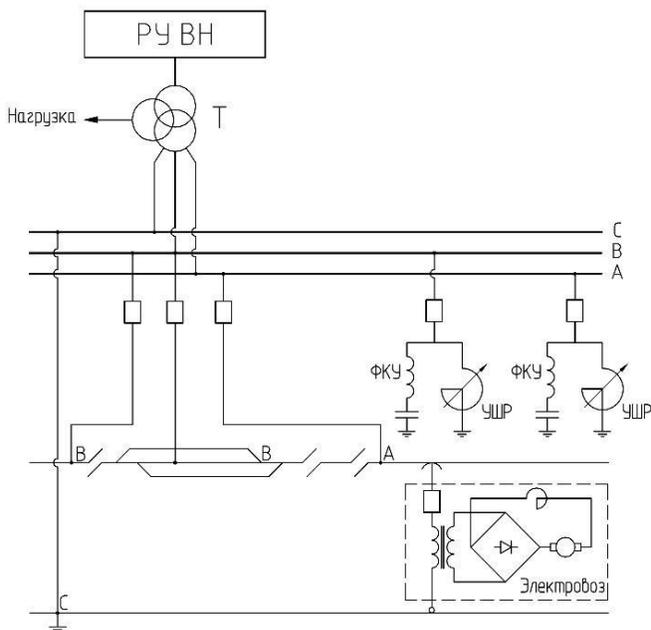
– Значению K_U на шинах 27,5 кВ. Допустимое значение K_U на шинах подстанции составляет 6%.

– Значению K_I тока в КБ. Допустимое значение K_I для используемых конденсаторов составляет 30%.

Расчеты гармоник проведены с учетом изменений индуктивного сопротивления УШР с использованием следующих допущений:

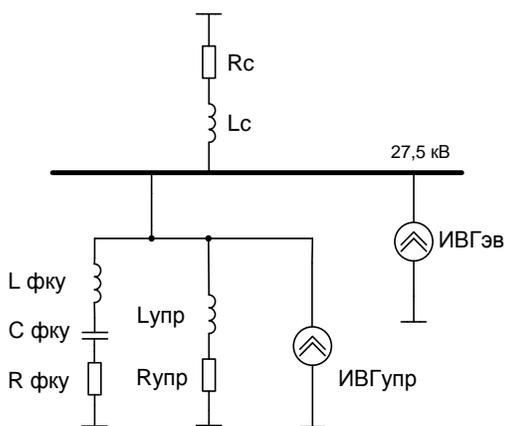
– сопротивления элементов токам высших гармонических составляющих прямой и обратной последовательностей одной частоты принимаются одинаковыми;

– частотные характеристики индуктивного сопротивления УШР получены расчетным путем в программном комплексе NRAST [5];



а)

Система



б)

Рис. 2. Схемы тяговой подстанции переменного тока 27,5 кВ:

а) однолинейная схема подстанции с установленными ИРМ; б) схема замещения для расчета гармоник тока и напряжения; R_c и L_c — активное сопротивление и индуктивность системы; $R_{ФКУ}$, $C_{ФКУ}$ и $L_{ФКУ}$ — активное сопротивление, ёмкость и индуктивность ФКУ; $R_{УШР}$ и $L_{УШР}$ — активное сопротивление и индуктивность УШР

– режим каждой гармонической составляющей рассматривается независимо от режима другой, и при оценке суммарной величины гармоник используется принцип суперпозиции.

На рис. 2 а) показана схема электрических соединений ТП 27,5 кВ, а на рис. 2 б) — эквивалентная схема замещения для расчета гармоник токов и напряжений.

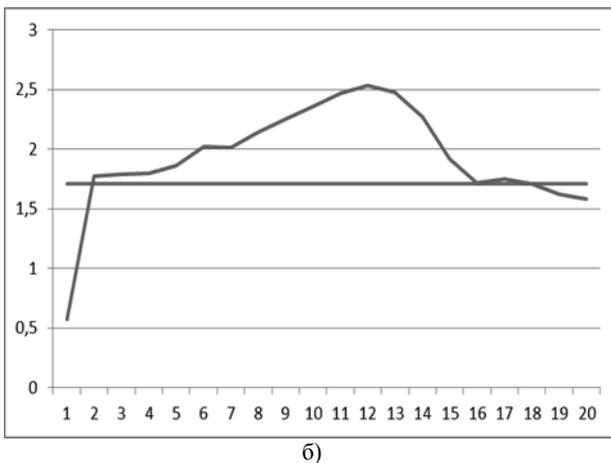
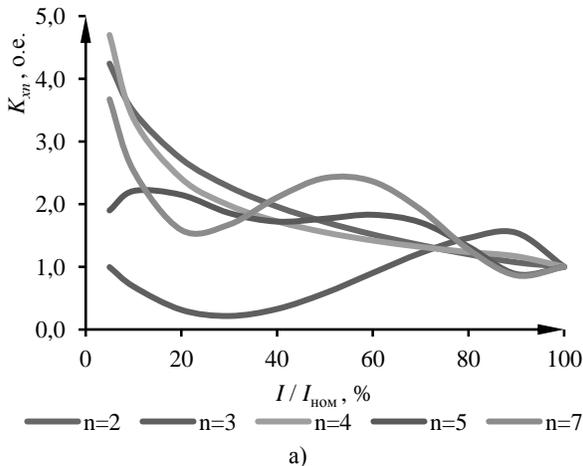


Рис. 3. Зависимости K_{xn} при различной нагрузке УШР (а) и значения K_U на шинах 27,5 кВ (б)

На рис. 3 а) показаны зависимости коэффициента изменения индуктивного сопротивления УШР $K_{xn} = x_n / x_1$ для различных гармоник

при различных коэффициентах загрузки по отношению к сопротивлению на частоте основной гармоники. Расчеты проведены с использованием программных средств NRAST и LTSpice [5]. Результаты расчетов K_U на шинах 27,5 кВ в установившемся режиме (по оси абсцисс показана нагрузка УШР в % от номинального тока) представлены на рис. 3 б).

Анализ полученных результатов показывает, что в режиме полной компенсации реактивной мощности с использованием ФКУ в составе ИРМ при 5% загрузке УШР значение K_U на шинах 27,5 кВ составляет 0,57 %, что в 3 раза меньше, чем в случае использования ФКУ без УШР, когда расчетное значение K_U равно 1,7%. При нулевой генерации реактивной мощности в сеть (УШР загружен на 100%) K_U на шинах 27,5 кВ составляет 1,6%. Для варианта с ИРМ диапазон изменения K_U составляет 0,57 – 2,53 % (в 2 раза ниже допустимого значения 6%). В тоже время при полном отсутствии средств компенсации реактивной мощности значение K_U на шинах 27,5 кВ составляет 7,3%, что превышает нормируемое значение 6%. Помимо этого, при отключенном ФКУ в 1 варианте наблюдаются также превышение допустимых значений коэффициентами 3-й и 5-ой гармоник напряжения: $K_{U(3)} = 5,7\%$ ($K_{U(3)\text{доп}} = 3\%$), $K_{U(5)} = 3,1\%$ ($K_{U(5)\text{доп}} = 3\%$). Таким образом, для регулирования потребления реактивной мощности на ТП ФКУ необходимо периодически коммутировать, однако отключение ФКУ может приводить к нарушениям требований стандарта по качеству электроэнергии [7] по показателям несинусоидальности напряжения.

Расчеты показали, что в обоих вариантах схемы компенсации реактивной мощности на ТП значения коэффициентов перегрузки $K_{\text{пер} I}$ и $K_{\text{пер} U}$ не превышают единицы: $K_{\text{пер} I} = 0,845$ для 1 варианта и 0,85 – 0,88 для 2 варианта; $K_{\text{пер} U} = 0,94$ для 1 варианта и 0,94 – 0,95 для 2 варианта.

Значения THD_I БК в обоих вариантах не превышают допустимых значений 30%: 3,2% для 1 варианта и 3,4 – 7,3% для 2 варианта.

Таким образом, использование ИРМ обеспечивает плавное регулирование генерируемой/потребляемой реактивной мощности при соблюдении требований стандартов по качеству электроэнергии. Кроме этого, ИРМ позволяет при необходимости обеспечивать регулирование напряжения на шинах 27,5 кВ ТП на основной частоте, снижая нагрузку на РПН силовых трансформаторов ТП.

Оценка экономической эффективности применения УШР

Расчет эффективности произведен путем оценки экономических показателей для варианта внедрения ИРМ без учета стоимостных показателей ФКУ, то есть учитывается только разница между вариантами 1 и 2. Внедрение ИРМ предполагается на ТП переменного тока электрифицированного железнодорожного транспорта в электрических сетях «Узбекэнерго» (Республика Узбекистан). Исходные данные для экономических расчетов представлены в таблице.

Таблица. Исходные данные для оценки экономической эффективности схемы компенсации реактивной мощности с помощью ИРМ

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Стоимость двух однофазных УШР 27,5 кВ единичной мощностью 3600 квар	\$ 720 000	Среднесуточное потребление активной мощности тяговой подстанции	9130 кВт
Ежегодное увеличение тарифа на электроэнергию	4%	Тариф на электроэнергию в Узбекистане (на 2016 год) [9]	\$ 0,063 / кВт·ч
Норматив ежегодных отчислений на ремонт УШР	2,9%	Потери активной мощности в ФКУ (из расчета 3 Вт/квар)	14,4 кВт
Норматив ежегодных отчислений на ремонт КРУ	3%	Потери активной мощности в УШР в режиме номинальной мощности	25,2 кВт
Ставка дисконтирования	9%	Расчетный срок службы УШР	30 лет
Число часов использования оборудования	8760	Коэффициент заполнения графика активной мощности	0,05
Часы малых нагрузок [8]	23:00 – 07:00	Надбавка к тарифу на ЭЭ за генерацию реактивной энергии в сеть энергосистемы в часы малых нагрузок [10]	20%

В расчете экономической эффективности ИРМ не учтен ущерб за счет ограничения коммутационного ресурса выключателей ФКУ.

В результате проведенной оценки экономической эффективности схемы компенсации реактивной мощности на ТП переменного тока 27,5 кВ с использованием двух ИРМ (по одному в каждой фазе контактной сети) получены следующие значения основных показателей:

- Чистый дисконтированный доход (NPV) — 1 042 700 \$;
- Внутренняя норма доходности (IRR) — 21,7%;
- Простой срок окупаемости (PP) — 5 лет;
- Дисконтированный срок окупаемости (DPP) — 7 лет.

Выводы

Использование технологии управляемой компенсации реактивной мощности с использованием управляемых подмагничиванием реакторов, относящихся к семейству оборудования FACTS, является перспективным средством обеспечения энергоэффективности в системах электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока.

Библиографический список

1. Звездкин М. Н. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: Учебник для техникумов ж.-д. трансп. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1985. — 263 с.
2. Бородулин Б. М., Герман Л. А., Николаев Г. А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1983. — 183с.
3. Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД). Р 610. Рекомендации по устройствам компенсации реактивной мощности и фильтрации гармонических составляющих тока тяговых подстанций 25 кВ 50 Гц с трехфазными трансформаторами. Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 23 – 26 октября 2007 г., Комитет ОСЖД, г. Варшава. Дата вступления в силу: 26 октября 2007 г. — 11 с.
4. Magnetically Controlled Electrical Reactors. Collection of Articles. 2nd enlarged edition. Ed. Prof. A.M. Bryantsev, Dr. Sc. (Eng). — Moscow: Znack, 2011. — 248 pp.
5. Евдокунин Г., Дмитриев М. Трансформаторы в электрической сети. Моделирование переходных процессов с учетом конфигурации магнитной системы. — Новости Электротехники, № 5 (53), 2008.

6. Amit Kumar Singh, Rohit Singh. Electronics Circuit SPICE Simulations with LTspice: A Schematic Based Approach (Electronics Circuit Simulations) (Volume 1). — CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. — 164 pp.
7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. —
8. Правила пользования электрической и тепловой энергией. Утверждены Постановлением Кабинета Министров Республики Узбекистан от 22.08.2009 года № 245.
9. Тарифы на электроэнергию с 1 апреля 2016 года. Утверждено Министерством финансов Республики Узбекистан. Реестр № 19-03-22-06-РУз-6-2016 от 16 марта 2016 года.
10. Положение о тарифных группах потребителей электрической и тепловой энергии. Утверждено Министерством энергетики и электрификации Республики Узбекистан 23 июня 2000 года.