

DOI: 10.34831/EP.2023.96.21.004

УДК 621.316.761.2

Обеспечение качества электроэнергии в энергосистемах, примыкающих к Транссибу и БАМу. Опыт разработки и внедрения компенсирующих устройств

АКСЕНОВ В. В., канд. техн. наук, ТОО «Усть-Каменогорский конденсаторный завод», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

ДЕМИН А. И., канд. физ.-мат. наук, АО «Нидек АСИ ВЭИ», Москва

ЧУПРИКОВ В. С., канд. техн. наук

ООО «Усть-Каменогорский конденсатор», Москва

chuprikov_vs@ukkm.ru



В. В. Аксенов



А. И. Демин



В. С. Чуприков

Приведена оценка существующего качества электроэнергии в энергосистемах, примыкающих к Транссибу и БАМу. Рассмотрены причины значительных искажений формы, посадок и несимметрии питающего напряжения и примеры их негативного влияния на работу нагрузок промышленных предприятий. Обоснована необходимость нормализации параметров качества электроэнергии путём установки на тяговых электроподстанциях быстродействующих пофазно-управляемых устройств компенсации реактивной мощности типа СТК и СТАТКОМ. Приведены примеры реализованных проектов по нормализации параметров качества электроэнергии.

К л ю ч е в ы е с л о в а: качество электроэнергии, компенсация реактивной мощности, электромагнитная совместимость, тяговая нагрузка, искажения напряжения, устройства компенсации, статический тиристорный компенсатор, СТАТКОМ.

Наличие потоков реактивной мощности в электрической сети вызывает ухудшение таких показателей качества электроэнергии (ПКЭ) как отклонения, посадки и провалы напряжения. А если она ещё и разная по фазам и резко-переменная по времени, то к ним добавляются несимметрия и колебания напряжения. Поэтому именно реактивная мощность является главным фактором, искажающим напряжение в сети, а устройства её компенсации (УК), кроме того, улучшают качество электроэнергии. Устройства компенсации реактивной мощности осуществляют ещё одну важную функцию в обеспечении требуемого качества напряжения — фильтрацию высших гармоник тока на-

грузки. Тем не менее, несмотря на доступность применения наиболее эффективных быстродействующих УК типа СТК¹ и СТАТКОМ², качество электроэнергии в сетях ЕНЭС, особенно на востоке России, остаётся на низком уровне, а из восьми нормированных ГОСТ 32144–2013 [1] его показателей повсеместно выдерживается только один — отклонение частоты сети.

Далее в статье показано, к каким последствиям приводит пренебрежение решением вопросов компенсации реактивной мощности нагрузок и обеспе-

¹ СТК — статический тиристорный компенсатор.

² СТАТКОМ — статический компенсатор реактивной мощности.

чения нормативного качества электроэнергии.

Оценка качества электроэнергии в энергосистемах, примыкающих к Транссибу и БАМу.

Причины значительных искажений формы и наличия несимметрии и провалов питающего напряжения

Существенную долю нагрузки магистральных сетей Сибири и Дальнего Востока, идущих вдоль Транссиба и БАМа, составляют тяговые подстанции Российской железной дороги. Например, доля суммарной установленной мощности трансформаторов 220/110 кВ тяговых подстанций в Амурской энергосистеме составляет 38,2 % суммарной мощности трансформаторов 220 кВ на всех подстанциях энергосистемы, что обуславливает существенное отрицательное влияние резкопеременной однофазной тяговой нагрузки на качество электроэнергии в примыкающей сети и является причиной высокого уровня несимметрии и несинусоидальности напряжения.

Вторым отрицательным фактором, усугубляющим влияние тяговой нагрузки на качество напряжения, является большая протяжённость линий электропередачи и их удалённость от источников электроэнергии, что определяет низкую мощность КЗ на шинах питающих подстанций и, соответственно, высокую чувствительность напряжения к искажающим факторам (рис. 1 — генерирующие станции отмечены чёрными квадратами).

Искажения напряжения, вызванные работой тяговых подстанций, распространяются по всей примыкающей энергосистеме и вызывают сбои в работе и аварийные отключения чувствительного технологического оборудования потребителей.

Именно поэтому устройства компенсации реактивной мощности, а они одновременно обеспечивают и нормализацию качества электроэнергии, должны устанавливаться непосредственно на шинах такой нагрузки, чтобы не допускать проникновения искажений напряжения в магистральные, а потом и распределительные сети, где с ними бороться практически невозможно!



Рис. 1. Схема основных электрических сетей 110 – 500 кВ энергосистем востока России

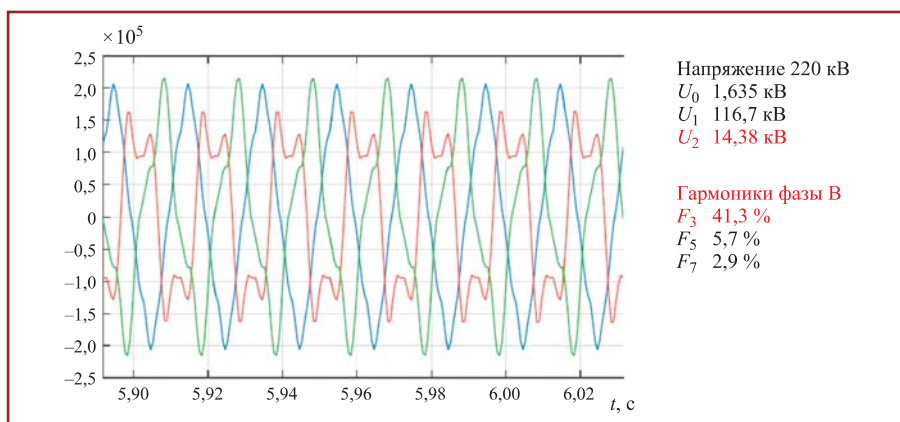


Рис. 2. Форма фазных напряжений на шинах 220 кВ ПС «Могоча» и параметры его качества

В противном случае, а именно это имеет сейчас место на нашем востоке, каждое промышленное предприятие должно самостоятельно решать вопрос обеспечения нормативного качества электроэнергии на своей локальной подстанции для обеспечения надёжной работы чувствительных к качеству напряжения нагрузок [2].

Приведём показательное сравнение: если энергосистему представить как связанную систему рек и озёр, электроэнергию — как воду, которую потребляют и затем сбрасывают обратно стоящие по берегам промышленные предприятия, а устройства компенсации — как фильтры или очистные сооружения, то становится понятным: только установка фильтров на выходе каждого крупного потребителя воды обеспечит её нормальное качество во всём бассейне. А если хоть один потребитель сбросит свои неочищенные стоки, то страдать от грязной воды будут все прилегающие предприятия, и каждое из них своими силами должно будет решать вопрос фильтрации заборной воды.

Необходимость нормализации параметров качества электроэнергии для ликвидации негативного влияния искажений напряжения на работу нагрузок промышленных предприятий

К чему приводит отсутствие устройств компенсации реактивной мощности на тяговых подстанциях Транссиба и БАМа?

Тяжёлая ситуация с качеством напряжения в сети сложилась на подстанции 220/110 кВ «Сковородино» МЭС Востока, от которой отходит несколько линий к тяговым подстанциям Транссиба. Согласно отчёту Департамента оперативно-технологического управления ОАО «ФСК ЕЭС» от 2015 г. «...Качество напряжения на шинах 110 кВ по показателям K_{2U} и K_U не соответствовало требованиям ГОСТ в течение всего периода измерений. Значения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} за сутки с вероятностью 95 % могут достигать 4,5 – 5 %, а кратковременно до 9 – 10 % при предельной норме 4 %. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U за сутки с вероятностью 95 % могут достигать

6,0 – 6,5 %, а кратковременно до 13,3 – 15,4 % при предельной норме 3 %».

В результате электрическое оборудование запитанных от этой сети насосно-перекачивающих станций (НПС) нефтепроводов ПАО «Транснефть» и горно-металлургических предприятий региона подвергается воздействию искажений напряжения, что приводит к его отключениям и повреждениям. Например, на НПС-21 нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» только с 2011 по 2015 г. было зафиксировано 40 аварийных остановов. Вопрос о надёжном электроснабжении НПС-21 неоднократно обсуждался на совещаниях в ПАО «Россети», но, как показано далее, был решён самим потребителем (ПАО «Транснефть»).

В ещё более худшем положении оказалась Забайкальская энергосистема. Приведём выдержку из отчёта Проектно-изыскательского института электрификации железных дорог и энергетических установок «Трансэлектропроект»³: «В настоящее время в Забайкальском крае имеется небольшое число источников генерации, из них мощностью более 100 МВА обладают только Читинская ТЭЦ-1, Харанорская ГРЭС и Краснокаменная ТЭЦ. Вся остальная электрическая энергия в край поступает транзитом от объединённой энергосистемы (ОЭС) Сибири через Республику Бурятию по линиям 220 кВ.

Забайкальская энергосистема не имеет устойчивой связи с ОЭС Востока, так как они не синхронизированы по частоте, вследствие чего она находится в так называемом «энергетическом тупике».

С сентября 2015 г. существенно ухудшились ПКЭ в части несимметрии напряжения. Обратная последовательность напряжения 220 кВ может достигать 20 % и сохраняется длительно от одной до десятков минут, что может вызвать сбои в работе алгоритмов релейной защиты и автоматики. На сегодняшний день связь энергосистем Сибири и Востока через вставку постоянного тока (ВПТ) на подстанции Могоча не обеспечила ожидаемый результат ввиду нестабильной работы преобразовательного комплекса. Специфика энергосистемы усугубляется ещё и тем, что в Забайкальском крае слабо развиты районные распределительные сети, которые удалены от источников генерации. В связи с этим тяговые подстанции являются основным источником электрической энергии для небольших населённых пунктов и предприятий горной промышленности.»

³ Отчёт Проектно-изыскательского института электрификации железных дорог и энергетических установок «Трансэлектропроект». Мероприятия по качеству электроэнергии, № 6826-1/274553-КЭ. 2022 г.

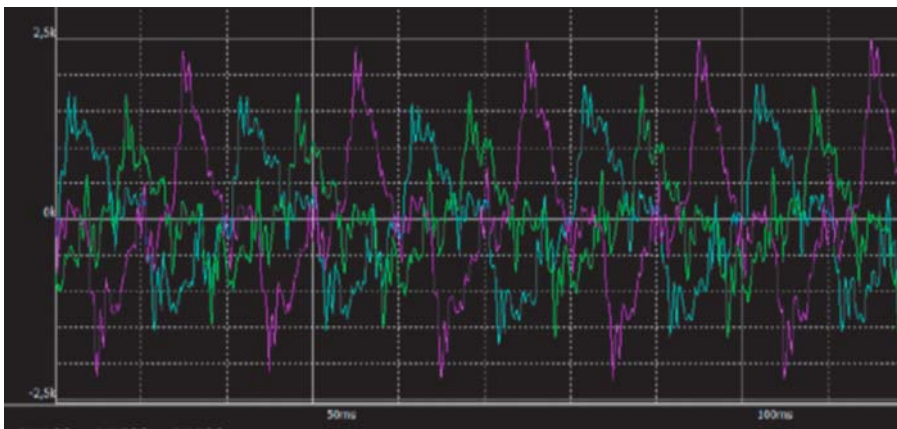


Рис. 3. Форма фазных токов инвертора ВПТ

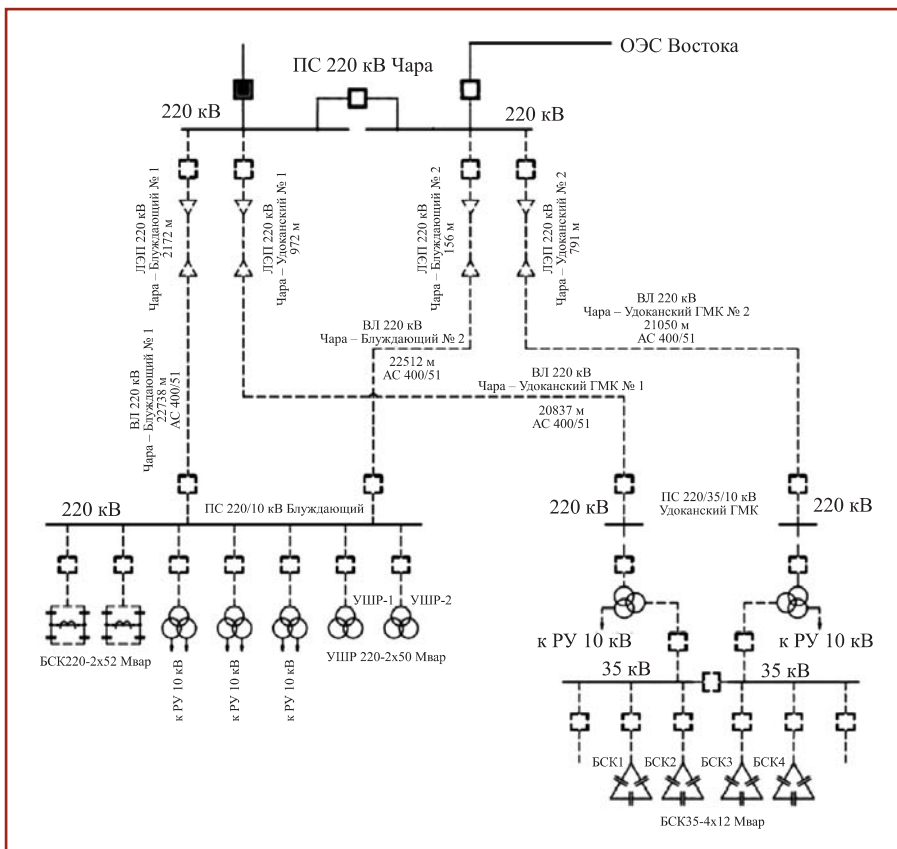


Рис. 4. Схема внешнего электроснабжения Удоканского месторождения

Подстанция Могоча отличается крайне искажённой формой напряжения на шинах 220 кВ. На рис. 2 показана форма фазных напряжений и приведены измеренные значения основных параметров качества напряжения⁴. Наличие гармонических искажений и несимметрии напряжения в примыкающей сети 220 кВ,

⁴ Дроздов А.В. Эксплуатация вставки постоянного тока на основе преобразователей напряжения в условиях значительных искажений питающего напряжения // Докл. на науч.-практ. конф. «Опыт и перспективы применения силовой электроники и электропередач постоянного тока для повышения надежности электрических сетей и реализации международных проектов». Москва, 2017.

которые во много раз превышают допустимые по ГОСТ значения, явилось основной причиной того, что ВПТ Забайкальского преобразовательного комплекса не смогла достичь проектной пропускной способности 200 МВт и установить связь двух асинхронных энергосистем — Забайкальской и Амурской.

Высокое значение обратной последовательности напряжения и уровня высших гармоник в питающей сети 220 кВ привело к двукратному росту тока ВПТ (рис. 3), что далее вызвало ограничение активного тока. Поэтому преобразователи напряжения ВПТ были переведены в режим компенса-

ции реактивной мощности и стабилизации напряжения в примыкающей сети.

На руднике «Александровский» в том же Могочинском районе Читинской обл. только за период с 2014 по 2017 г. произошло 1137 остановов в работе золотоизвлекательной фабрики по причине плохого качества электроэнергии. Затраты на восстановление испорченного оборудования составили 40 млн руб., объём недополученной выручки превысил 250 млн руб. [3].

Большие проблемы наблюдаются при освоении Удоканского медного месторождения. На рис. 4 приведена схема внешнего электроснабжения его производств. Источником питания двух подстанций: ПС 220/35/10 кВ «Удоканский ГМК» и ПС 220/10 кВ «Блуждающий» является ПС 220 кВ «Чара» ОЭС Востока, к которой присоединены тяговые подстанции БАМа.

Наличие широкого спектра высших гармоник в напряжении питающей сети 220 кВ, уровень которых более чем в 5 раз превышает допустимые по ГОСТ значения (см. таблицу), привело к тому, что содержание только 5-й гармоники в токе БСК-35 кВ, установленных на ПС «Удоканский ГМК», составило 57 % от тока частоты сети, а их полный ток превысил 1,3 номинального значения. В результате уставки токовых защит этих БСК⁵ пришлось увеличить до уровня 1,45 номинального тока, а все установленные конденсаторы работают практически при предельной токовой нагрузке, что неминуемо сократит срок их службы.

Подобные проблемы наблюдаются и в БСК-220 кВ ПС «Блуждающий». Необходимо отметить крайне низкую мощность КЗ на шинах 220 кВ этой подстанции: 319 МВА в максимальном режиме и 266 МВА в минимальном, при том что максимальная мощность присоединения ГМК «Удокан» к сетям ПАО

⁵ БСК — батарея статических компенсаторов.

Максимальный измеренный уровень содержания высших гармоник в напряжении сети 220 кВ (ПС 220 кВ «Чара»)

Номер гармоники	Измеренные значения, %		Нормативные значения, %	
	$K_{U(n)в}$	$K_{U(n)нб}$	$K_{U(n)нд}$	$K_{U(n)нд}$
2	2,88	4,34	0,5	0,75
3	10,06	12,99	1,5	2,25
4	0,43	1,24	0,3	0,45
5	9,18	11,03	1,5	2,25
6	0,13	0,31	0,2	0,3
7	4,45	5,67	1	1,5
8	0,09	0,13	0,2	0,3
9	2,04	2,68	0,4	0,6
10	0,11	0,12	0,2	0,3
11	1,02	1,27	1	1,5
12	0,1	0,1	0,2	0,3
13	1,96	2,12	0,7	1,05

«ФСК ЕЭС», согласно ТУ, составляет 146 МВт. То есть в системе электроснабжения комбината отношение минимальной мощности КЗ к потребляемой мощности нагрузки составляет 1,82, при том что в Европе это соотношение стараются обеспечить на уровне не менее 10.

Другой пример — ПС «Юрты», стоящая в кольце тяговых подстанций на протяжении 110 кВ (Тайшетский район Иркутской обл.) При разработке проекта установки двух БСК ТОО «Усть-Каме-ногорский конденсатор» поставили задачу определить воздействия искажений напряжения в примыкающей сети на нагрузку конденсаторов токами высших гармоник. Результаты измерений ПКЭ на шинах 110 кВ показали почти трёхкратное превышение допустимых значений коэффициентов гармонических составляющих напряжения, причём в широком спектре — от 3-й до 37-й гармоники. В результате расчётов выяснилось, что суммарный ток высших гармоник в БСК, поступающий из сети 110 кВ, составляет 87 % тока первой гармоники! Что вынудило нас заложить для этих БСК конденсаторы специальной усиленной конструкции, существенно более дорогостоящих, чем стандартные.

В последнее время регулярно проводятся конкурсы на разработку и поставку так называемых устройств повышения качества электроэнергии от различных компаний, проектирующих новые производства в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Чувствительное технологическое электрооборудование, в основном мощные частотно-регулируемые приводы иностранных производителей, не может надёжно работать при существующем качестве электроэнергии, что вынуждает потребителей самим заниматься решением вопроса повышения качества питающего напряжения.

Например, компания ООО «Мангазеея Золото» для нормализации параметров качества электроэнергии на ПС «Наседкино», расположенной в 50 км от ПС «Могоча», объявила конкурс на установку СТАТКОМа. Согласно опросному листу ПАО «МРСК Сибири» максимальное измеренное значение коэффициента искажения синусоидальности напряжения составляет 20,97 % при норме 3 %, а максимальное измеренное значение дозы фликера Pst — 11,57 % при норме 1,38 %.

Русская медная компания осваивает Малмыжское месторождение, расположенное на правом берегу р. Амур в 275 км от г. Хабаровска. Для повышения качества электроэнергии системы электроснабжения безредукторных приводов мельниц требуется установка аналогичных устройств.

Таким образом, каждый новый потребитель в регионе вынужден сам решать вопрос нормализации ПКЭ, испорченных железнодорожной нагрузкой. Важно отметить, что установка рассмотренных УК на локальных под-

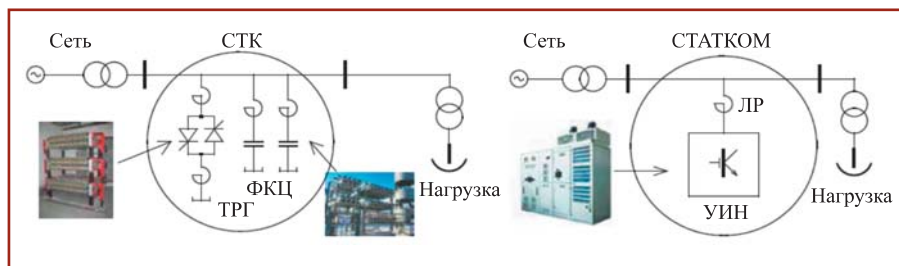


Рис. 5. Включение СТК и СТАТКОМа для компенсации вредного влияния резкопеременной нагрузки

станциях практически не влияет на качество электроэнергии в питающей высоковольтной сети и не облегчает работу других потребителей.

Из изложенных примеров можно сделать вывод, что для повышения надёжности работы электрооборудования различных предприятий в районах, примыкающих в Транссибу и БАМу, необходимо принять меры по улучшению ПКЭ в магистральных и распределительных сетях ОЭС Востока путём обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) тяговой нагрузки с питающей сетью. Именно процесс преобразования несимметричного несинусоидального тока нагрузки с существенной долей реактивной составляющей в симметричный синусоидальный активный ток и является, в понимании авторов статьи, обеспечением подобной ЭМС. Именно такое преобразование осуществляют рассмотренные далее многофункциональные устройства компенсации.

Актуальность обсуждаемой проблемы подтверждается проведением совещания в Минэнерго РФ 23.05.2018 г. по теме «О применении устройств компенсации реактивной мощности, в том числе с независимым пофазным управлением, для нормализации качества электроэнергии на тяговых подстанциях сети 220 кВ» и рядом принятых на нём административных решений.

Наиболее распространённые типы устройств компенсации, их отличительные особенности

Для компенсации не только потребляемой реактивной мощности, но и других факторов вредного влияния нагрузки на параметры качества питающего напряжения, включая несимметрию и высшие гармоники тока, существует два широко распространённых в мире типа быстродействующих пофазно-регулируемых многофункциональных полупроводниковых устройств: СТК и СТАТКОМ. Они обычно включаются между нагрузкой и питающей сетью (рис. 5) и, по аналогии с охраной окружающей среды, являются своего рода «очистными системами» для энергетической среды, предотвращая негативное влияние нагрузки на качество электроэнергии в питающей сети и снижая активные потери в линиях электропередачи и на оборудовании подстанций [4].

Статический тиристорный компенсатор путём быстродействующей пофазной компенсации реактивной мощности несимметричной резкопеременной нагрузки и пассивной фильтрации её токов высших гармоник косвенным образом превращает искажённые токи фаз нагрузки в более-менее симметричные активные токи сетевых трансформаторов. При этом СТК может выполнять и балансирование нагрузки по активной мощности за счёт регулирования своей реактивной мощности (принцип Штейнметца) [5].

Более совершенное УК, появившееся в конце 90-х годов в связи с развитием мощных IGBT-приборов — статический компенсатор типа СТАТКОМ, представляющий собой автономный инвертор напряжения, подключаемый к сети через фазные линейные реакторы. Система управления СТАТКОМа построена таким образом, чтобы путём регулирования мгновенного значения своего выходного напряжения в каждой фазе независимо формировать требуемое значение тока, т.е. по физическому принципу СТАТКОМ — это пофазно-регулируемый источник тока (мощности). При этом в зависимости от решаемой задачи его система управления может быть реализована как по принципу векторного управления, так и по принципу контроля мгновенного значения сетевого тока для реализации функции активной фильтрации. Примеры работы СТК и СТАТКОМа приведены на рис. 6.

Если источниками реактивной мощности в СТК являются пассивные элементы: конденсаторы и реакторы, то в СТАТКОМах реактивная мощность генерируется активными элементами путём формирования тока соответствующей фазы.

Фактически рассматриваемые УК превращают любую электрическую нагрузку в чисто активную и симметричную по фазам.

Таким образом, можно утверждать, что существующие быстродействующие УК реактивной мощности типа СТК и СТАТКОМ могут обеспечить ЭМС любой промышленной нагрузки с питающей сетью и гарантировать нормативные ПКЭ в точке передачи электрической энергии согласно ГОСТ 32144–2013.

Установка СТК и СТАТКОМов на тяговые подстанции электрифицированных

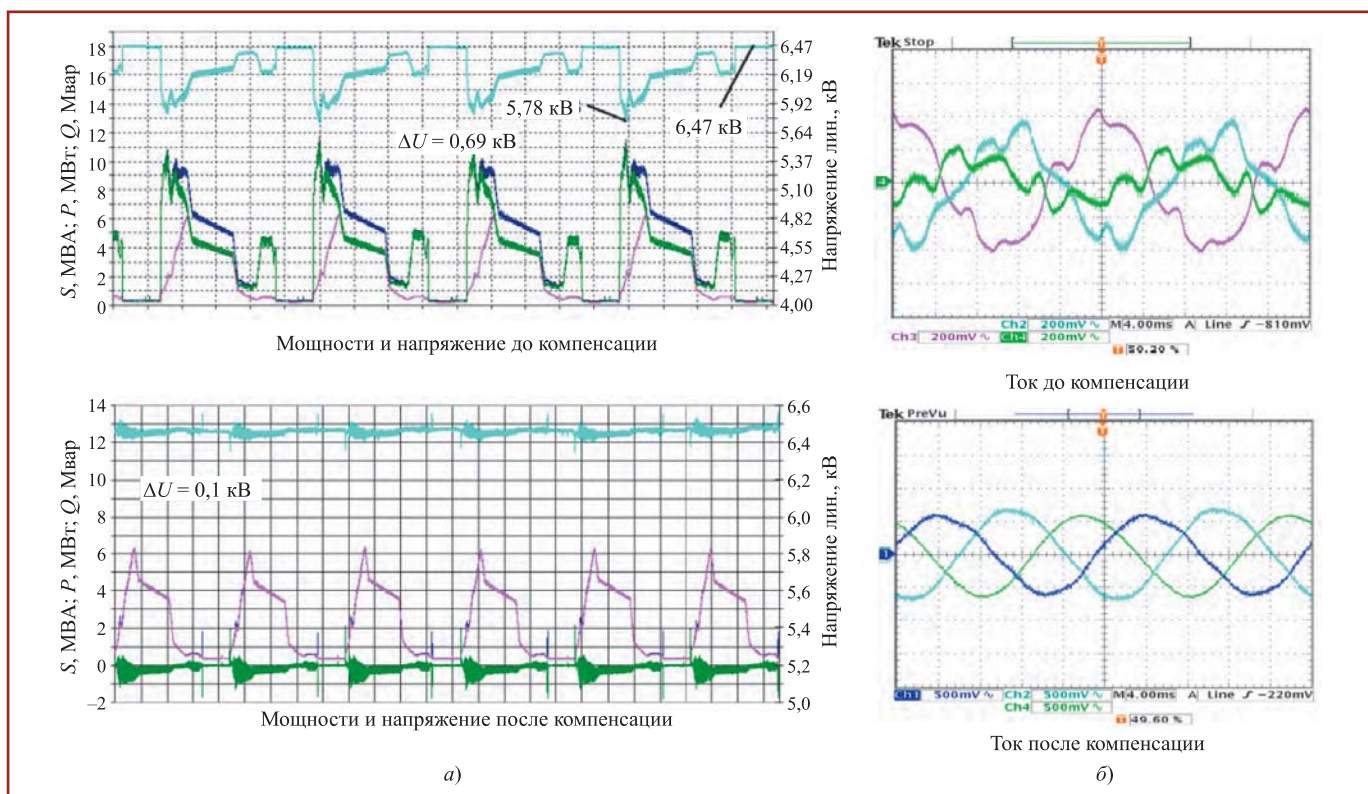


Рис. 6. Примеры работы СТК (а) и СТАТКОМа (б)

железных дорог будет способствовать приведению ПКЭ в примыкающих сетях к требованиям ГОСТ [2, 6]. К сожалению, такое предложение пока остаётся невостребованным.

Параметры выпускаемых устройств компенсации типа СТК и СТАТКОМ. Зоны применения по классам напряжения и мощностям

В мире первые СТК появились в конце 70-х годов прошлого века и предназначались для компенсации отрицательного влияния на сеть самой вредной из существующих электрических нагрузок — дуговых сталеплавильных печей (ДСП). За прошедшие годы мощность электротеплых трансформаторов выросла с 40 – 60 МВА до 150 – 200 МВА, а мощность СТК с 80 – 120 Мвар до 320 Мвар. Постоянное совершенствование технологий и конструкции силового оборудования СТК и разработка новых более совершенных алгоритмов его управления сделали СТК наиболее распространённым средством компенсации как для промпредприятий, так и для сетевых подстанций, где они применяются как устройство FACTS для регулирования напряжения.

Первые два отечественных СТК разработки ВЭИ (напряжение 35 кВ, мощность 160 Мвар) были изготовлены в 1985 году и работают до сих пор. Только на металлургических предприятиях РФ и стран СНГ установлено 28 СТК напряжением 10 и 35 кВ производства ВЭИ — АО Ансальдо-ВЭИ — АО Нидек АСИ ВЭИ суммарной мощностью 2995 Мвар. Также они работают и на

подстанциях промышленных предприятий с мощной переменной нагрузкой, и на сетевых подстанциях ПАО «ФСК ЕЭС».

Статические компенсаторы типа СТАТКОМ, появившиеся конце 90-х годов, — более совершенные и ещё более многофункциональные, чем СТК, средства обеспечения ЭМС нагрузки с сетью. В первую очередь за счёт большего быстродействия и возможности работать во всех четырёх квадрантах, т.е. кроме регулирования реактивной мощности они одновременно могут осуществлять и перекачку активной мощности между фазами для балансирования несимметричных или однофазных нагрузок.

На начальном периоде внедрения вследствие высокой удельной стоимости, достигавшей 100 – 150 евро/квар, применение СТАТКОМов ограничивалось устройствами низкого напряжения, реализованными на базе однофазных инверторов, и отдельными проектами установок высокого напряжения с применением повышающих трансформаторов. С увеличением объёмов производства и снижением цены полупроводников сфера применения СТАТКОМов постоянно расширялась.

Важным фактором роста их использования стало применение схем многоуровневых инверторов напряжения по технологии ММС, что дало возможность реализовывать устройства высокого напряжения без применения трансформаторов, а также использовать функцию активной фильтрации токов высших гармоник нагрузки. В настоящее время АО

«Нидек АСИ ВЭИ» осуществляет производство в России бестрансформаторных СТАТКОМов на напряжение 6 – 13,8 кВ мощностью от 2,5 до 30 МВА.

По совокупности технико-экономических показателей зона применения СТАТКОМов — это все устройства класса 6 и 10 кВ для нагрузок любого типа (СТК на эти напряжения в несколько раз больше по занимаемой площади). Существуют примеры применения СТАТКОМов на напряжение 35 кВ для дуговых сталеплавильных печей и сетевых подстанций мощностью пока до 70 Мвар. Для каждого конкретного случая применения СТАТКОМов и СТК нужно проводить сравнение экономических показателей вариантов УК с учётом стоимости потерь и обслуживания, которые для СТАТКОМов выше, чем для СТК! Устройства компенсации мощностью 100 Мвар и выше — зона применения СТК, в данном диапазоне они намного дешевле СТАТКОМов.

Реализованные проекты применения устройств компенсации для нормализации ПКЭ

Кроме большого числа успешно реализованных проектов по обеспечению ЭМС с сетью дуговых сталеплавильных печей и других нелинейных промышленных нагрузок, авторы также занимались вопросом нормализации ПКЭ на локальных подстанциях.

Поскольку МЭС Востока в течение нескольких лет пытались, но так и не решили вопрос нормализации ПКЭ на ПС 220/110 кВ «Сковородино», ПАО «Транснефть» приняло наше предло-



Рис. 7. Общий вид двух СТК на подстанции НПС-21 «Сковородино»

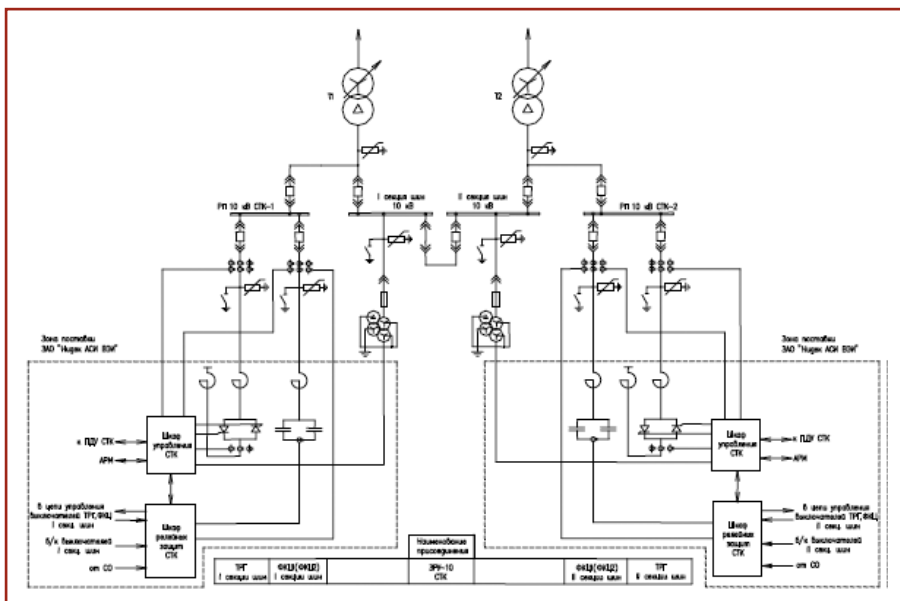


Рис. 8. Схема ПС 110/10 кВ «Сковородино» с установкой СТК

жение о локальном решении вопроса — доведения ПКЭ до требуемых по ГОСТу значений непосредственно на шинах 10 кВ подстанции 110/10 кВ НПС-21 «Сковородино», питающей электроприводы магистральных насосов, путём установки двух СТК мощностью ± 10 Мвар на две секции шин 10 кВ (рис. 7, 8).

Оборудование СТК 10 кВ было смонтировано на подстанции и в ноябре 2017 г. введено в промышленную эксплуатацию. Работа СТК обеспечила стабилизацию напряжения на двух секциях шин 10 кВ, снижение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности до 0,5 %, снижение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения до 1,5 %. За счёт достигнутого повышения каче-

ства электроэнергии аварийные отключения электродвигателей магистральных насосов практически прекратились [5].

Приведённый пример показывает, что даже при существенных искажениях напряжения во внешней питающей сети можно обеспечить электроснабжение локальной чувствительной нагрузки электроэнергией с высокими показателями качества путём установки СТК непосредственно на шины нагрузки (рис. 9).

В 2021 г. два бестрансформаторных СТАТКОМа напряжением 6 кВ и мощностью 4 МВА были установлены на Новокузнецком металлургическом комбинате (НКМК) для обеспечения ЭМС нагрузки с сетью. Диапазон плавного регулирования реактивной мощности

с учётом фильтра 3-й гармоники мощностью 4 Мвар составил 0–8 Мвар. Оборудование каждого СТАТКОМа, включая фильтр, смонтировано в отдельном контейнере с габаритами (длина \times ширина \times высота) 12 192 \times 2438 \times 3491 мм, весом 24 000 кг (рис. 10).

Кто виноват и что делать?

Кто виноват в сложившейся ситуации с качеством электроэнергии в электрических сетях востока России? Доступные устройства компенсации есть, а качество электроэнергии никому не годится!

Однозначно, это не ПАО РЖД или его филиал «Трансэнерго», в чью зону ответственности входит присоединение к магистральным сетям всех тяговых подстанций и обеспечение их электрической энергией. Его задача — обеспечить электроэнергией транзит грузов, а для решения вопросов нормализации качества напряжения в питающей сети у него нет никакого СТИМУЛА, а конкретно законодательного акта, принуждающего к применению устройств компенсации. ГОСТ 32144–2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» есть, а законодательный акт о последствиях его нарушения отсутствует. Именно его отсутствие и является причиной плохого качества электроэнергии в наших сетях.

Как подобные вопросы решаются за рубежом? — Исключительно государственной системой тарифов и штрафов, которые по определению являются не наказанием, а экономическим стимулом к применению устройств компенсации реактивной мощности, когда потребителю выгоднее установить устройство компенсации, чем регулярно платить штрафы за его отсутствие! В Китае всё ещё проще — директива ЦК КПК вынудила практически все средние и крупные предприятия установить на своих подстанциях СТК, а затем и СТАТКОМы, из-за чего число выпускаемых и установленных УК данного типа на два порядка превышает их число в РФ.

Пытаясь привлечь к данной теме наших законодателей, в 2014 г. авторы участвовали в организации двух заседаний Круглого стола секции «Качество и экономия электроэнергии» Консультативного Совета при Председателе Комитета Государственной Думы по энергетике на темы: «Компенсация реактивной мощности — ключ к повышению эффективности работы электроприёмников и снижению потерь в электрических сетях» и «О координации услуг, совершенствовании нормативно-правовой базы и разработки отечественного производства по компенсации реактивной мощности в России». По итогам этих обсуждений никаких реальных шагов сделано не было. Да и сейчас вряд ли стоит ожидать быстрого решения этого на самом деле острого вопроса.

В отсутствие штрафных санкций на федеральном уровне вопрос об установке устройств компенсации, обеспе-

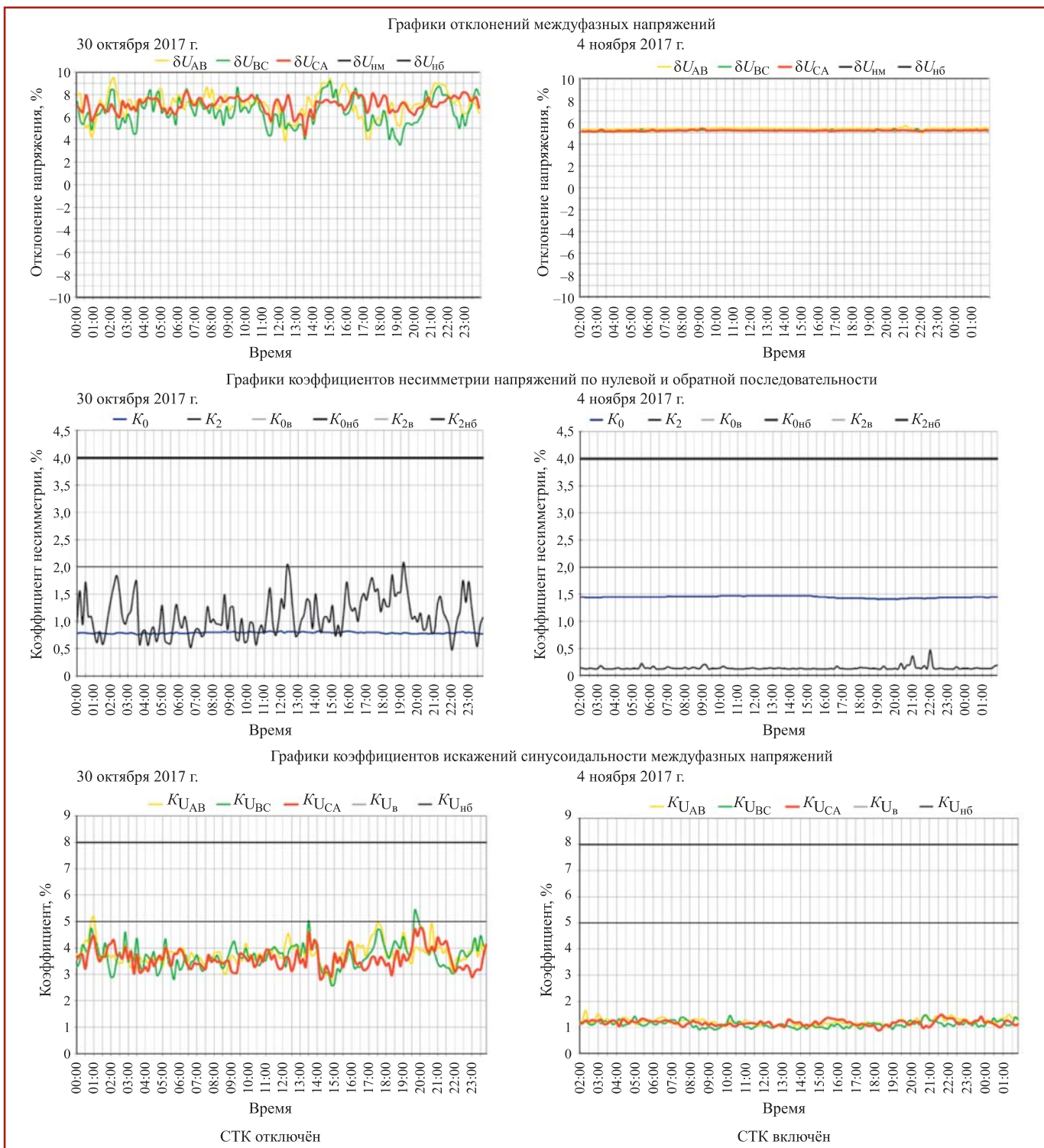


Рис. 9. Графики показателей качества электроэнергии на шинах 10 кВ подстанции НПС-21 при отключённом и включённом СТК

чивающих соблюдение регламентируемых ГОСТом норм качества электрической энергии в точке передачи электрической энергии к тяговым подстанциям, должен стимулироваться договорами о технологическом присоединении трансформаторных подстанций. В договорах о присоединении прописываются соответствующие требования. Вот выдержка из подобного договора для тяговой подстанции 220 кВ «Тарбагатай»:

«3.3. В случае наличия нагрузок, искажающих форму кривой электрического тока и вызывающих несимметрию напряжения в точках присоединения, установить в электрических сетях Заявителя:

3.3.1. Фильтрокомпенсирующие и симметрирующие (в пофазном исполнении) устройства, исключающие ухудшение качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ 32144 – 2013 в точках присоединения к электрическим сетям ПАО

«ФСК ЕЭС» (места и тип исполнения уточнить при проектировании).»

И далее:

«4.1. Заявитель выполняет мероприятия, указанные в п. 1, с учётом требований разделов 2 и 3 настоящих технических условий, включая разработку проектной и рабочей документации. Заявитель обязан согласовать задание на проектирование, проектную и рабочую документацию с филиалом ПАО



Рис. 10. Два СТАТКОМа 6 кВ, 0 – 8 Мвар в контейнерном исполнении на площадке Новокузнецкого металлургического комбината

«ФСК ЕЭС» — МЭС Сибири и Филиалом АО «СО ЕЭС Забайкальское РДУ».

Казалось бы, при соблюдении всеми сторонами договора этих требований качество электроэнергии в сетях, питающих тяговую нагрузку, должно быть в норме? Однако на практике НИ НА ОДНОЙ тяговой подстанции не установлено подобное устройство компенсации. Потому что в этих договорах нет никаких штрафных санкций за НЕВЫПОЛНЕНИЕ требований по обеспечению качества электроэнергии! А с учётом стратегического значения перевозок грузов по железной дороге в государственном масштабе нет и речи о возможности отключения тяговой подстанции по причинам внесения ею искажений напряжения в питающей сети.

Что может сдвинуть сложившуюся ситуацию с мёртвой точки? Ответ очевиден: нужно прописать в Технических условиях на присоединение к электрическим сетям обязательное наложение штрафа за нарушение этого пункта в размере 50 % стоимости УК и выше в год. Тогда срок окупаемости УК составит меньше двух лет, а его установка станет экономически выгодной потребителю, в данном случае «Трансэнерг».

Необходимость установки УК касается не всех тяговых подстанций, а только тех, в которых соотношение между мощностью КЗ в точке присоединения к суммарной мощности тяговой нагрузки меньше критического значения.

Рассмотренные в настоящей статье вопросы детально обсуждались на Рабочем столе «Низкое качество электроэнергии в электрических сетях 35 – 220 кВ, питающих электрифицированные железные дороги совместно с потребителями общего пользования. Технологии его нормализации», проведённого в рамках Международного форума «Электрические сети» (МФЭС) 22 ноября 2022 года. Решение Круглого стола приведено в приложении.

Выводы и предложения

1. Отсутствие на тяговых подстанциях ПАО РЖД устройств компенсации, в первую очередь в энергосистемах, примыкающих в Транссибу и БАМу, приводит к существованию отдельных районов с перманентно плохим качеством электроэнергии, негативно влияющим на остальных потребителей.

2. Выпускаемые в РФ быстродействующие пофазно-регулируемые полупроводниковые устройства компенсации типа СТК и СТАТКОМ позволяют обеспечить электромагнитную совместимость с питающей сетью переменной железнодорожной нагрузки и нормализовать показатели качества электроэнергии в точке передачи электрической энергии тяговым подстанциям согласно ГОСТ 32144–2013, но остаются пока невостребованными из-за отсутствия экономических стимулов к их применению.

3. Решение задачи повышения качества напряжения, испорченного удалённой тяговой нагрузкой, возможно путём установки устройств типа СТК и СТАТКОМ непосредственно на шины нагрузки потребителя. Но нормализация параметров качества питающего напряжения для локальной нагрузки практически не влияет на качество электроэнергии в примыкающей высоковольтной сети.

4. Наиболее эффективным решением проблемы низкого качества электроэнергии в магистральных сетях, примыкающих к Транссибу и БАМу, является установка на тяговых подстанциях ПАО РЖД трёхфазных компенсирующих устройств с пофазным управлением типа СТК и СТАТКОМ. Для стимулирования их применения в договорах о присоединении тяговых подстанций к электрической сети необходимо указать не только требование об их установке, но и обязательное наложение штрафа за нарушение этого пункта

в размере, обеспечивающем нормативный срок окупаемости УК.

5. Высокое качество электроэнергии в сетях ЕНЭС может быть обеспечено только при условии стимулирования применения современных средств компенсации реактивной мощности на государственном уровне, требующего принятия соответствующих законов, формирующих тарифную политику Российской Федерации в этой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2014.

2. Чуприков В. С. Нормализация параметров качества электроэнергии в сетях ЕНЭС за счёт применения быстродействующих пофазно-регулируемых полупроводниковых устройств компенсации реактивной мощности // Энергоэксперт. 2020. № 4. С. 40 – 46.

3. Луяшин П. Д. В сентябре 2017 года остановлен рудник Александровский в Забайкалье. <https://zolotodb.ru/article/11727>.

4. Чуприков В. С. Компенсация реактивной мощности — ключ к повышению передаточной способности электрических сетей // Энергоэксперт. 2008. № 4. С. 20 – 24.

5. Аксенов В. В., Чуприков В. С. Устройства симметрирования напряжения в электрических сетях: принцип работы, опыт внедрения и перспективы применения // Энергоэксперт. 2019. № 3. С. 10 – 15.

6. Чуприков В. С., Демин А. И., Фомин А. В. Обеспечение электромагнитной совместимости тяговых подстанций и систем внешнего электроснабжения за счет применения статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности // Материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Энергоэффективность и энергосбережение». Москва, 19 – 20 марта 2013 г.

Приложение

РЕШЕНИЕ

круглого стола

«Низкое качество электроэнергии в электрических сетях 35 – 220 кВ, питающих электрифицированные железные дороги совместно с потребителями общего пользования. Технологии его нормализации» в рамках Международного форума «Электрические сети» (МФЭС), Москва, 22 – 25 ноября 2022 г.

Круглый стол «Низкое качество электроэнергии в электрических сетях 35 – 220 кВ, питающих электрифицированные железные дороги совместно с потребителями общего пользования. Технологии его нормализации» проходил 22 ноября 2022 года в Москве (павильон № 57 ВДНХ).

В круглом столе, организованном ТОО «Усть-Каменогорский конденсаторный завод» (УККЗ) и его московским представителем ООО «Усть-Каменогорский конденсатор» при информальном партнёрстве с журналом «Энергоэксперт», приняли участие более 40 представителей электросетевых компаний, потребителей электроэнергии и производителей устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ) и повышения качества электроэнергии (КЭ), научных и проектных организаций.

В ходе мероприятия были рассмотрены технические и нормативно-правовые аспекты проблемы низкого КЭ в электрических сетях, питающих электрифицированные железные дороги совместно с потребителями общего пользования, и возможности его нормализации (приведения параметров к нормам ГОСТ 32144–2013), в том числе:

- анализ текущего положения с КЭ в электрических сетях, питающих Транссиб и БАМ;
- оценка негативного влияния искажений напряжения на потребителей;
- существующие технологии и опыт применения устройств компенсации негативного влияния резкопеременных нагрузок на питающую сеть и показатели КЭ;
- типы и мощности отечественного оборудования УКРМ и нормализации КЭ;
- правовые аспекты стимулирования потребителей, в том числе «Трансэнерго» — филиала ОАО «РЖД», к применению технических средств, обеспечивающих нормативное КЭ в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей.

Модератором мероприятия выступил к.т.н., генеральный директор ТОО «УККЗ» В. В. Аксенов. В обсуждении проблем, заявленных в программе круглого стола с докладами, сообщениями и выступлениями приняли участие: В. В. Аксенов, В. С. Чуприков, С. В. Павленко, Н. А. Ершов, А. И. Демин, С. И. Гусев, Ю. А. Демельев, Д. Н. Ярош, Л. И. Коверникова, Н. Л. Новиков, Р. Г. Шамонов, В. Э. Вороничий.

По результатам дискуссии на круглом столе сделаны следующие выводы:

1. Отсутствие на тяговых подстанциях (ТПС) ОАО «РЖД» УКРМ и нормализации КЭ, в первую очередь в дефицитных энергорайонах Забайкальской, Амурской и Хабаровской энергосистем, **приводит к регулярным нарушениям нормативных требований по показателям КЭ, характеризующим искажения синусоидальности, несимметрию и колебания напряжения.**

2. Искажения тока и напряжения, многократно превышающие предельные значения по ГОСТ 32144–2013, вызванные работой тяговых подстанций, **распространяются по электрическим сетям на сотни километров от искажающей нагрузки и вызывают нарушения в работе и повреждения оборудования прочих потребителей.**

3. Выпускаемые в РФ быстросействующие пофазно-регулируемые полупроводниковые УКРМ типа СТК и СТАТКОМ позволяют обеспечить электромагнитную совместимость временной железнодорожной нагрузки

с питающей сетью и нормализовать показатели качества электроэнергии в точках передачи электрической энергии тяговым подстанциям согласно ГОСТ 32144–2013, но **остаются пока неустойчивыми** из-за отсутствия экономических стимулов к их применению. Устанавливаемые на ряде подстанций ПАО «ФСК ЕЭС» управляемые шунтирующие реакторы выполняют исключительно системные функции и влияют на КЭ только в части снижения отклонений напряжения.

Электросетевые компании, прежде всего ПАО «ФСК ЕЭС», разрабатывают и реализуют мероприятия по компенсации искажений на своих подстанциях. При этом возникает необходимость установки УКРМ экстраординарно большой мощности, что не позволяет обосновать целесообразность подобных затрат при утверждении инвестиционных программ в регулирующих органах. В результате каждое «неискажающее» промпредприятие для обеспечения надёжной работы чувствительных к качеству напряжения нагрузок **вынуждено самостоятельно решать** вопрос доведения КЭ до норм ГОСТ путём установки УКРМ непосредственно на собственных объектах.

4. Нормализация показателей качества питающего напряжения для локальной нагрузки практически **не влияет на качество электроэнергии в примыкающей высоковольтной сети, а, следовательно, и в электроустановках других неискажающих потребителей.**

5. В энергорайонах, расположенных вблизи источников электроэнергии, отличающихся высокими уровнями мощности короткого замыкания (МКЗ), проблем с низким КЭ в связи с наличием электротяги, как правило, не возникает в нормальных режимах (исключение вызывают ремонтные режимы электросетей). Примером являются западносибирские и центральносибирские участки Транссиба. В частности, ВЛ 500 кВ Иркутск–Чита, построенная в 90-е годы вдоль Транссиба, повысила МКЗ в регионе его прохождения, что во многом обеспечивает отсутствие здесь проблем с КЭ. То же можно сказать об эффекте нормализации КЭ на Дальнем Востоке в результате строительства в 2000-е годы сети ВЛ 500 кВ для выдачи мощности Бурейской ГЭС. Развитие электрических сетей 220–500 кВ Восточной Сибири и Дальнего Востока безусловно будет способствовать росту МКЗ и снижению уровней искажений. **Однако и это не позволит обеспечить нормированное КЭ с учётом планов по увеличению тяговых нагрузок в регионе на 2 ГВт.**

6. Как показывают расчёты, наиболее эффективным решением проблемы низкого КЭ в магистральных сетях, примыкающих к Транссибу и БАМу, является установка на тяговых подстанциях ОАО «РЖД» трёхфазных компенсирующих устройств с пофазным управлением типа СТК и СТАТКОМ. Для стимулирования их применения в договорах об присоединении тяговых подстанций к электрической сети и договорах об электроснабжении существующих ТПС было бы целесообразно указать не только требование об их установке, но и **предусматривать систему**

скидок и надбавок за пользование электроэнергией за исполнение этого пункта в размере, обеспечивающем нормативный срок окупаемости УКРМ. В этом может помочь нормирование в части обременения технических условий на подключение искажающих нагрузок к сети в зависимости от отношения МКЗ в точке присоединения к установленной мощности нагрузки, как это делается в энергокомпаниях за рубежом.

7. В рамках разработки и практической реализации этапов Федерального проекта «Развитие железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона железных дорог» для достижения его целей и решения поставленных задач необходимо разработать и внедрить **Программу установки на ТПС ОАО «РЖД» УКРМ и других средств обеспечения КЭ в районах Забайкалья, Восточной Сибири и Дальнего Востока.**

8. Высокое КЭ в электрических сетях может быть обеспечено только **при условии стимулирования применения современных УКРМ потребителями** на государственном уровне, что требует принятия соответствующих законов, формирующих тарифную политику Российской Федерации в этой области.

9. Для стимулирования обеспечения нормативных значений показателей КЭ необходимо разработать и ввести в действие удовлетворяющие современным требованиям следующие нормативные документы:

- правила присоединения «искажающих» потребителей к сети общего пользования по условиям влияния на КЭ и режим потребления реактивной мощности;
- правила применения и шкала скидок и надбавок к тарифам на электроэнергию за качество электроэнергии и компенсацию реактивной мощности;
- методики определения долевого вклада «искажающих» потребителей в суммарное нарушение КЭ, размера и стоимости возмещения убытков от низкого КЭ на рынках электроэнергии;
- технический регламент «Требования к качеству электрической энергии» с формами и правилами подтверждения соответствия этим требованиям в точках поставки электроэнергии;
- правила и порядок непрерывного мониторинга показателей КЭ на границах между сетевыми компаниями и потребителями (в первую очередь, в узлах присоединения к магистральным электрическим сетям оптовых потребителей электроэнергии с мощными искажающими нагрузками, в частности, тяговых подстанций РЖД);
- отраслевой стандарт «Методика оценки системного экономического эффекта от установки и применения регулируемых УКРМ различных типов в магистральных и распределительных электрических сетях»;
- отраслевой стандарт «Методика оценки влияния БСК на уровни гармонических составляющих токов и напряжений при присоединении к магистральным и распределительным электрическим сетям, питающим мощные нелинейные нагрузки».