

Организация комплексного процесса управления качеством электроэнергии — приоритетная задача энергетической стратегии развития России

УДК 621.31

В данной статье дается представление о существующих в электроэнергетике России на современном этапе ее функционирования и развития взаимосвязанных проблемах качества, надежности и экономичности электроснабжения и о комплексном применении современных технических средств их обеспечения и сформулированы предложения по совершенствованию нормативно-правовой базы для эффективного решения задач по обеспечению качества электроэнергии у потребителей.

Воротницкий В.Э.,
д.т.н., профессор,
главный научный
сотрудник АО «НТЦ
ФСК ЕЭС»

Дементьев Ю.А.,
председатель научно-
технического совета,
советник генерального
директора АО «НТЦ
ФСК ЕЭС»

Лазарев Г.Б.,
к.т.н., начальник отдела
электропривода
Департамента
энергоэффективных
технологий в энергетике
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Шакарян Ю.Г.,
д.т.н., профессор,
научный руководитель
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Ключевые слова:
качество электроэнергии,
нормативно-правовая база,
энергоэффективность,
энергобезопасность

Keywords:
quality of electricity,
regulatory, energy
efficiency, energy security

В системе электроснабжения России в настоящее время существуют три наиболее существенные проблемы: качество электроэнергии (КЭ) в узлах присоединения потребителей, не в полной мере соответствующее нормативным требованиям, недостаточный уровень надежности электроснабжения потребителей электроэнергии, присоединенных к распределительным электрическим сетям, завышенные потери электроэнергии. Национальный стандарт ГОСТ 32144-2013 определяет КЭ как «степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей качества электроэнергии». При этом КЭ определяет такую важную характеристику, как электромагнитная совместимость (ЭМС) — способность электрооборудования, электрических аппаратов и приборов функционировать в электромагнитной среде, не создавая недопустимых электромагнитных помех (ЭМП) для другого оборудова-

ния, функционирующего в этой же среде [1]. Весьма часто проблему КЭ многие специалисты рассматривают только как проблему ЭМС, обращая внимание на результаты несоответствия ПКЭ нормативам в виде отключений и повреждений различной аппаратуры, не учитывая ее влияние на надежность и экономичность работы электросетей.

Между тем, КЭ непосредственно связано с энергоэффективностью, так как оно существенно влияет на технико-экономические показатели производителей, поставщиков электроэнергии и ее потребителей. Термин «качество электроэнергии» в 80-х годах прошлого столетия стал одним из ключевых в мировой электроэнергетике, с развитием которой стало очевидным, что решение проблемы КЭ должно носить не частный, а системный, комплексный характер. Это привело, в конечном счете, к необходимости разработки жестких международных требований по оценке свойств и характеристик электроэнергии и установлению системы количественных показателей

ее качества, нормируемых соответствующими стандартами, разработке методов оценки надежности и экономичности электроснабжения потребителей и его оптимизации.

Снижение КЭ (технологические нарушения в сетях, сопровождающиеся ощущаемыми потребителями кратковременными или длительными частичными или полными прекращениями электроснабжения, провалами напряжения, потерями электроэнергии в сетях, приводящими к отклонениям напряжения, гармоническими искажениями, скачками и несимметрией напряжения) влечет за собой значительный экономический ущерб. Так по данным [31, 33, 34], экономический ущерб промышленности в целом деловому сообществу Европейского Союза из-за несоответствующего КЭ составляет около 10 млрд евро в год, в то время как затраты на превентивные меры по его обеспечению не превышают 5% от этой суммы. По оценкам ряда российских специалистов удельный ущерб только от перебоев электроснабжения в отраслях экономики РФ находится в среднем в пределах от 20 до 700 руб./кВт·ч [9, 15]. В период активного формирования Единой электроэнергетической системы КЭ в узлах подключения новых промышленных нагрузок в основном обеспечивалось. Это происходило за счет опережающего развития энергосистем. В более поздний период вопросы КЭ отошли, к сожалению, на второй план.

Необходимость повышения уровня энергоэффективности, энергобезопасности и качества электроснабжения обусловила в последние годы интенсификацию научно-практических работ, направленных на модернизацию и инновационное развитие отрасли [2, 5–10]. При этом особое внимание обращено на новейшие технологии, которые получают в мировой практике все более широкое развитие и применение в электрических сетях. Адаптации характеристик электрооборудования в зависи-

мости от изменяющихся режимов, активное взаимодействие с генерацией и потребителями электроэнергии позволяют создавать эффективно функционирующие энергосистемы. Электрическая сеть при этом из пассивной, обеспечивающей транспорт и распределение электроэнергии, превращается в активную. Ее параметры и характеристики изменяются в зависимости от режимов работы в реальном времени. В этих режимах все субъекты энергетического рынка: генерация, сеть, потребители, принимают активное участие. На достижение этих целей направлена стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации (далее Стратегия), утвержденная распоряжением Правительства РФ от 03 апреля 2013 г. № 511-р. В документе определена основная цель деятельности комплекса на период до 2030 года. Она заключается в долгосрочном обеспечении надежности, качества и доступного энергоснабжения потребителей РФ путем организации максимально эффективной и соответствующей мировым стандартам сетевой инфраструктуры по тарифам на передачу электрической энергии, обеспечивающим приемлемый уровень затрат на электрическую энергию для российской экономики и инвестиционную привлекательность отрасли через адекватный возврат на капитал.

Очевидно, что меры по обеспечению надежности, качества и экономичности электроснабжения потребителей теснейшим образом связаны между собой. Их разработка и внедрение требуют комплексного подхода, основанного на инновационном развитии электрических сетей и современных методов управления ими [4, 5].

Цели настоящей статьи:

- привлечь внимание к необходимости повышения качества электроснабжения потребителей;
- дать представление о существующих в электроэнергетике России на современном

этапе ее функционирования и развития взаимосвязанных проблемах качества, надежности и экономичности электроснабжения и о комплексном применении современных технических средств их обеспечения;

- сформулировать предложения по совершенствованию нормативно-правовой базы для эффективного решения задач Стратегии, и в первую очередь обеспечения КЭ у потребителей.

Проблема КЭ в электрических сетях и у потребителей, которой посвящены фундаментальные монографии и многочисленные статьи, имеет, как показывает их анализ, ряд взаимосвязанных аспектов, рассматриваемых ниже.

Специфика электроэнергетической системы (ЭЭС) РФ по отношению к энергосистемам большинства других стран — низкая территориальная плотность сетей и большая, предопределяющая пониженную надежность и высокие сервисные затраты, средняя протяженность ЛЭП [6–8]. Как показывает анализ, в распределительных сетях России международные показатели надежности SAIDI и SAIFI примерно в 5–10 раз хуже, чем аналогичные показатели в промышленно развитых странах.

Интегральный индекс надежности на границе балансовой принадлежности субъектов электроэнергетики в различных регионах РФ находится на уровне 0,95–0,97, что ниже действующего нормативного ключевого индикатора 0,996.

В соответствии с Энергетической стратегией России до 2030 года, утвержденной Правительством РФ, ключевой индикатор стратегического развития должен быть повышен до значения 0,9997, что позволит существенно снизить возможность существования дефицитов мощности и электроэнергии в ЭЭС. По существу, ставится задача приблизить этот показатель к современным зарубежным нормативам вероятности бездефицитного электроснабжения

(0,999–0,9997). Достижение указанного показателя потребует увеличения удельных инвестиций в повышение надежности с 3,95 до 9,3 миллиона рублей на мегаватт нагрузки [15] и введения экономически обоснованного нормативного уровня надежности электроэнергетических комплексов по регионам и по отдельным крупным потребителям, считая, что оптимальным и экономически обоснованным является тот уровень, при котором инвестиции в повышение уровня надежности не будут превышать вероятного ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям.

Относительные потери электроэнергии в электрических сетях промышленно развитых стран мира по экспертным оценкам, опубликованным в частности в [25], находятся в достаточно широком диапазоне 3–6%. Как отмечается в [23, 24], прослеживается достаточно четкая связь между значением этих потерь и уровнем экономического развития стран, так как экспертная оценка потерь определяется, исходя из ряда показателей, прежде всего ВВП. При этом в странах с более развитой экономикой потери электроэнергии в среднем в 2,5–3 раза ниже, чем в России, и примерно в 6–10 раз ниже, чем в экономически отсталых регионах. Как отмечается в [23], суммарная величина потерь электроэнергии в электрических сетях России в целом оценивается в размере около 120 млрд кВт·ч в год или около 12% от отпуска электроэнергии в эти сети. В [24] приведено приближенное оценочное значение финансового ущерба от потерь электроэнергии в электрических сетях России, который по состоянию на 2016 год усредненно составил 27 млрд долларов. Как показывает анализ структуры потерь в электрических сетях, более 80% суммарных потерь составляют потери электроэнергии в сетях 0,4–110 кВ распределительных сетевых компаний и территориальных сетевых компаний. Особенно велики аб-

солютные и относительные потери в электрических сетях 0,4–10 кВ [23].

В качестве примера на рисунке 1а представлена диаграмма обмена активной электроэнергией между ее продавцом (поставщиком) и покупателем (потребителем). В рассматриваемом примере принято, что продавец имеет симметричную систему генерирования, а покупатель — линейную несимметричную нагрузку (нет нулевой последовательности и нет искажения синусоидальности кривой напряжения). При этом качество электрической энергии по коэффициенту обратной последовательности не соответствует стандарту на КЭ. В этом случае продавец, поставляющий покупателю активную энергию, не получает за нее от покупателя полную плату, поскольку счетчики электрической энергии алгебраически суммируют всю активную энергию, то есть из энергии прямой последовательности вычитают энергию обратной. Между тем эта энергия распространяется по электрическим сетям и попадает к другим покупателям, имеющим симметричную линейную нагрузку. Рисунок 1б иллюстриру-

ет диаграмму, в соответствии с которой покупатель оплачивает согласно показаниям счетчиков электроэнергию не только прямой последовательности, но и обратной. Очевидно, что при расчете за электроэнергию по показаниям счетчиков в первом случае потери несет продавец электроэнергии, а во втором — покупатель. Этот пример свидетельствует о прямой количественной связи КЭ и проблемы энергосбережения. Кроме того, он подтверждает возможность строгой количественной идентификации источника искажений качества.

Развитие современных электрических систем сопровождается ростом удельного потребления реактивной мощности, достигающим 1 квар/кВт, что, как правило, сопровождается снижением возможного и целесообразного использования реактивной мощности генераторов электростанций [24]. Повышенные по отношению к оптимальным перетоки реактивной мощности в электрических сетях увеличивают ток на отдельных участках сети и приводят к соответствующему росту потерь мощности и электроэнергии, снижению передаваемой актив-

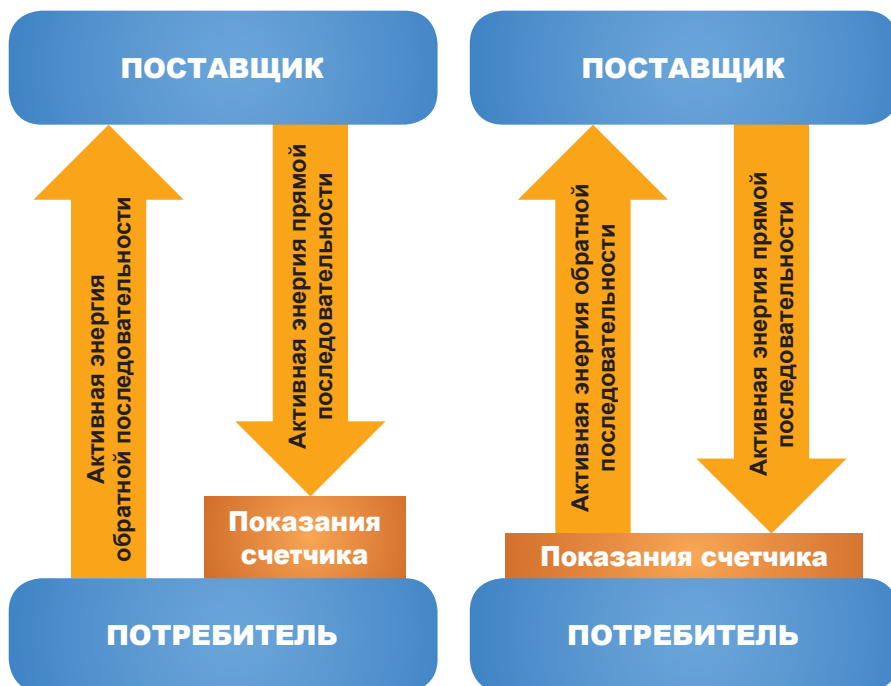


Рис. 1. Диаграмма обмена электроэнергией между поставщиком и потребителем

ной мощности, пропускной и нагрузочной способности линий и трансформаторов, что в конечном итоге негативно сказывается на тарифах на электроэнергию для конечных потребителей и экономике электросетевых предприятий. Потери напряжения, связанные с передачей реактивной мощности, по оценкам, приведенным в [26], составляют примерно 1/3 суммарных потерь напряжения в сетях 6 и 10 кВ и порядка 2/3 — в сетях более высоких напряжений.

Как показывают энергетические обследования, степень компенсации реактивной мощности в отечественной электроэнергетике значительно ниже, чем в промышленно развитых странах. Более того, имеющиеся в электрических сетях, на электрических станциях и у потребителей возможности для согласованного регулирования реактивной мощности и уровней напряжения используются явно недостаточно. Это является одной из основных причин сравнительно высоких относительных потерь электроэнергии на ее передачу, а также недопустимых отклонений напряжения от нормируемых. Имеющиеся в настоящее время нормативные документы [23], позволяющие не только определять места установки компенсирующих устройств и их параметры при разработке проектов развития и реконструкции электрических сетей, присоединения новых потребителей, но и стимулировать установку средств компенсации в системообразующих и распределительных электрических сетях и сетях потребителей электроэнергии, распространяются в большей степени на взаимодействие потребителей и сетевых компаний и в значительно меньшей степени относятся к генерации.

Очевидно, что для компенсации реактивной мощности в ЕЭС России на уровне передовых мировых достижений необходимо введение системной услуги по регулированию реактивной мощности и уровней напряжения,

стимулирующей участие всех субъектов оптового и розничного рынков электроэнергии в этом регулировании, совершенствование и развитие нормативно-правовой базы в части компенсации реактивной мощности.

КЭ, как известно, является одним из важнейших факторов, определяющих нормальное функционирование электрооборудования, приборов и аппаратов с точки зрения таких характеристик напряжения, как частота, симметрия, амплитуда, фаза. Как отмечалось выше, ухудшение КЭ приводит к нарушению ЭМС. При этом, с одной стороны, ухудшаются эксплуатационные характеристики, возникает ускоренный износ электрооборудования в силу восприимчивости значительной его части к неудовлетворительному КЭ, а с другой — происходит соответствующее снижение надежности электроснабжения. При этом, учитывая свойства электроэнергии, очевидно нет необходимости стремиться к приближению ее качества к «идеальному», так как, во-первых, не существует единого универсального способа полного устранения проблем КЭ, во-вторых, это было бы экономически нецелесообразно, поскольку сопряжено со значительными материальными затратами.

Сложность проблемы КЭ обусловлена еще и тем, что она напрямую затрагивает взаимоотношения поставщика электроэнергии (продавца) и ее потребителя (покупателя). Виновником плохого качества электроэнергии может быть как ее поставщик, так и потребитель.

Проблема КЭ, методы и средства его обеспечения носят интернациональный характер. В поисках методов решения проблемы КЭ за рубежом и в РФ вовлечено значительное количество исследовательских организаций и предприятий. Теоретические и практические аспекты проблемы обеспечения КЭ в электрических сетях обсуждаются на международных конференциях и семинарах, им

посвящен целый ряд фундаментальных работ, статей, докладов (см., в частности [1, 4, 6, 9, 10, 23, 25, 28–34]).

В промышленно развитых странах подключение мощных нелинейных нагрузок, искажающих форму кривых тока и напряжения электрической сети, допускается только при соблюдении требований по обеспечению КЭ и при наличии соответствующих технических средств [32–35]. Суммарная мощность вновь вводимой нелинейной нагрузки не должна превышать 3–5% от мощности всей нагрузки электросетевой компании.

Иная картина наблюдается в нашей стране, где подключение потребителей, искажающих напряжение сети, происходит в целом достаточно хаотично. Выдача технических условий на присоединение во многом формальна из-за отсутствия четких методик и недостаточного применения сертифицированных приборов, фиксирующих «кто виноват». При этом промышленностью не выпускаются в требуемом объеме (во многом из-за отсутствия спроса) современные высокотехнологичные технические средства и устройства улучшения показателей КЭ, а у поставщиков и потребителей электроэнергии в целом отсутствуют побуждающие к их применению экономические стимулы. В результате электрические сети России оказались перенасыщенными искажающим оборудованием.

В отдельных регионах сформировались уникальные по своей степени искаженности комплексы электрических сетей энергосистем и потребителей, что существенно обострило проблему электроснабжения потребителей качественной электроэнергией. В качестве примера можно сослаться на [21], где приведен обзор результатов измерений за последние годы ПКЭ в электрических сетях 110 и 220 кВ.

На основе анализа, результаты которого авторы рекоменду-

Табл. 1. Основные характеристики электрической энергии, нормируемые ПКЭ, и наиболее вероятные виновники ухудшения КЭ (ГОСТ 32144-2013)

Характеристики электрической энергии	Показатели качества электроэнергии	Наиболее вероятные виновники ухудшения качества электроэнергии
Отклонение частоты	Отклонение значения основной частоты напряжения от номинального значения	Энергоснабжающая организация
Медленные изменения напряжения	Положительное и отрицательное отклонение напряжения от номинального в точке передачи электроэнергии	Энергоснабжающая организация
Колебания напряжения и фликер	Доза фликера (кратковременная и длительная)	Потребитель с переменной нагрузкой
Несинусоидальность напряжения	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения. Коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения	Потребитель с нелинейной нагрузкой
Несимметрия трехфазной системы напряжений	Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности	Несимметрия в электрической сети энергоснабжающей организации. Несимметричная нагрузка электроприемников потребителя
Провал напряжения	Электромагнитная помеха, определяемая напряжением и длительностью провала напряжения (Приложение А к ГОСТ)	Неисправности в электрических сетях энергоснабжающей организации или в электроприемниках потребителей, подключение мощной нагрузки
Перенапряжения	Электромагнитная помеха, определяемая напряжением и длительностью напряжения (Приложение А к ГОСТ)	Отключения и переключения нагрузки потребителей
Импульсные напряжения	Импульсное напряжение (Приложение Б к ГОСТ)	Молниевые разряды, процессы коммутации в электрической сети или в электроустановке потребителя

ют рассматривать как индикаторы, характеризующие состояние КЭ в распределительных сетях России, сделаны выводы о том, что во многих энергосистемах имеют место систематические нарушения требований действующего стандарта КЭ. Наибольшие уровни несимметрии и искажения синусоидальности напряжения имеют место в электрических сетях, питающих электрифицированные железные дороги переменного тока и таких крупных потребителей электроэнергии, как алюминиевые заводы и предприятия металлургической промышленности. При этом неудовлетворительные значения отклонения напряжений наблюдаются, как правило, в дефицитных энергосистемах с протяженными электрическими сетями и недостаточным количеством средств компенсации реактивной мощности.

Требования к КЭ и характеристикам электроэнергии, показатели которой регистрируются обычно в точках передачи электроэнергии, определены целым рядом действующих нормативно-технических документов, в том числе Федераль-

ными законами, Гражданским кодексом РФ, Техническими регламентами, требованиями государственных стандартов, Технологическими правилами оптового рынка электроэнергии и пр. [11, 12, 16–18, 26, 27]. ГОСТ 32144-2013 нормирует такие определяющие ПКЭ, как несимметрия, пределы гармоник и другие возмущения в точке присоединения электроприемников (таблица 1, более подробно см. в [1, 23, 28, 32–36]).

Обеспечение ПКЭ в электросетевом комплексе в условиях все большего возрастания искажающих факторов требует решения трех принципиальных задач: регулирования реактивной мощности, компенсации несинусоидальности напряжения и фильтрации высших гармоник, симметрирования напряжения. При этом во всех случаях для обеспечения нормируемых ПКЭ мощность короткого замыкания (МКЗ) в узлах подключения нагрузки (электроприемников) является «определяющим и даже критическим фактором» [35]. Очевидно, чем мощнее источник электроснабжения (его МКЗ), тем меньше отклонения параметров

электроэнергии при ее передаче и меньше влияние мощных или резкопеременных нагрузок.

Предотвращение последствий факторов, ухудшающих КЭ, и ограничение их влияния возможно на основе организации комплексного процесса управления КЭ. Это определяет необходимость совершенствования методических, организационных и технических мероприятий, направленных на установление причин и источников нарушений и заключающихся в индивидуальном и централизованном подавлении помех с обеспечением повышенной помехозащищенности чувствительных к искажениям электроприемников (см., например, [1, 32, 34, 37, 38]).

С другой стороны, они должны быть направлены на выполнение существующих стандартов, норм и правил, реализацию конкретных мероприятий по повышению надежности и энергоэффективности электросетевого комплекса страны в соответствии с технической политикой электросетевых компаний. Эти меры в первую очередь должны быть реализованы в се-

тях потребителей электрической энергии, так как именно системы электроснабжения потребителей являются в большинстве случаев основными виновниками ухудшения КЭ.

Как уже отмечалось ранее, при решении проблемы КЭ в электрических сетях необходимо учитывать ее экономические аспекты. С экономической точки зрения может быть не всегда выгодно добиваться улучшения характеристик качества электроэнергии, так как оптимальным решением проблемы может оказаться создание и применение электрооборудования, аппаратов и приборов, менее чувствительных к изменению параметров напряжения в электрической сети. Этот путь достаточно часто используют для обеспечения ЭМС.

Развитие электрических сетей, ужесточение требований к ПКЭ определило интенсификацию работ по совершенствованию существующих и разработкам новых технологий, средств и устройств повышения КЭ. Не вдаваясь в подробный анализ характеристик средств обеспечения КЭ, их достоинств и недостатков (этому вопросу посвящена достаточно обширная библиография, (см., например, [1, 32–36, 39, 40]), отметим, что ни одно из этих устройств не является в общем случае универсальным. Их выбор базируется на технико-экономическом анализе эффективности применения тех или иных средств регулирования напряжения в электрической сети, компенсации реактивной мощности, несимметрии и подавления высших гармоник, который зависит от схемы электрической сети, режима работы и мощности источника ухудшения КЭ, вида создаваемых им ЭМП.

При этом следует иметь в виду, что вследствие так называемого «параметрического эффекта» часто компенсация одной ЭМП может повлиять на уровень другой. Важно, чтобы при выборе средств улучшения КЭ обеспечивалось снижение

уровня ЭМП, вносимых самими источниками помех (электроприемниками). С этой целью эффективным для обеспечения КЭ в целом ряде случаев является применение принципа разделения потребителей [1, 37, 38].

Следует отметить, что ряд конкретных мер по обеспечению КЭ в ЕНЭС нашел отражение в Программе инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» на 2016–2020 годы с перспективой до 2025 года. В раздел «Приоритеты инновационного развития. Инновационные проекты и мероприятия» этой программы включен инновационный проект «Качество электроэнергии», целью которого является построение системы управления качеством электроэнергии на основе ее непрерывного мониторинга в ЕНЭС. При этом целями реализации указанного проекта являются: обеспечение нормативных показателей КЭ в ЕНЭС, повышение эффективности операционных и инвестиционных затрат, связанных с производственными процессами, повышение эксплуатационного ресурса оборудования. В данном контексте Программа предусматривает по результатам корректных замеров и расчетов размещение в сложных схемно-

режимных узлах электрической сети технических средств регулирования, симметрирования и компенсации высших гармоник напряжения.

Прогресс в развитии силовой электроники, разработка новых силовых полупроводниковых приборов (полностью управляемых тиристоров — GTO, IGCT, SGCT, биполярных транзисторов с изолированным затвором-IGBT), постоянное совершенствование их параметров, повышение быстродействия и разрядности сигнальных процессоров для систем управления, новые решения в топологии преобразователей электрической энергии обеспечили в целом качественно новый подход к построению multifunctionальных систем повышения КЭ. Речь идет о технологиях статического тиристорного компенсатора реактивной мощности (СТК), статического компенсатора реактивной мощности с ШИМ-преобразователем напряжения (СТАТКОМ), активного фильтро-симметрирующего устройства (АФСУ) на основе модульного многоуровневого ШИМ-преобразователя (ММС), вставки постоянного тока на преобразователях напряжения



Конденсаторная батарея и реакторы фильтров



Подвесные транзисторные модули вставки постоянного тока на преобразователях напряжения СТАТКОМ на ПС 220 кВ «Могоча»

(ВПТН), систем FACTS. Такие технические средства позволяют комплексно решать задачи компенсации реактивной мощности, колебаний и провалов, симметрирования напряжения, обеспечения нормированного уровня гармоник в сети [1, 32, 36, 39, 40]. В то же время они достаточно сложны, дороги, непривычны в эксплуатации и требуют от персонала при обслуживании соответствующего уровня квалификации.

В последние годы за счет программ НИОКР и инвестиционных проектов с участием ПАО «ФСК ЕЭС» был реализован ряд пилотных проектов с применением в электрических сетях компании средств обеспечения КЭ. В частности, были установлены: СТАТКОМ на ПС 400 кВ «Выборгская» в дополнение к имеющимся на ПС электромашинным синхронным компенсаторам реактивной

мощности и батареям конденсаторов для регулирования баланса реактивной мощности вставки постоянного тока Россия-Финляндия, вставка постоянного тока на преобразователях напряжения (ВПТН) «Могоча» на ПС 220 кВ для объединения на совместную несинхронную работу энергосистем Забайкалья и Приамурья. СТАТКОМ и ВПТН, эквивалентируя в месте установки ЭДС, практически позволяют повысить МКЗ, то есть усиливают энергосистему.

В то же время указанные пилотные проекты носят единичный характер, так как широкому внедрению современных систем повышения КЭ препятствует отсутствие экономических стимулов как у сетевых предприятий, так и у потребителей. Следует также отметить, что достижения последних лет в области электромашиностроения за счет при-

менения современных технологий конструирования и новых материалов, создание в России (ПАО «Силовые машины») и за рубежом мощных синхронных компенсаторов (СК) с воздушным охлаждением позволили по-иному взглянуть на возможности их применения для повышения КЭ в системах электроснабжения [41]. Достоинства СК, устанавливаемых на ПС и работающих в режимах компенсации (выдачи и потребления) реактивной мощности при мало меняющихся нагрузках, общеизвестны [1, 35, 36].

СК обеспечивают поддержание заданного режимами электрической сети уровня напряжения, что фактически эквивалентно повышению МКЗ. Особенно эффективно применение СК в относительно слабых электрических сетях (со сниженной МКЗ), питающих тяговые

подстанции железнодорожного транспорта и однофазные нагрузки. В докладе «Улучшение характеристик энергосистемы при применении синхронных компенсаторов в HVDC-системах с промежуточными отборами», представленном в исследовательский комитет А1 «Вращающиеся машины» СИГРЭ группой итальянских специалистов на основе проведенных исследований, обоснована необходимость выбора вместо СТК для HVDC-подстанции в Сардинии 4-х СК с высоким моментом инерции и воздушным охлаждением, мощностью 175 МВА каждый. По мнению итальянского Системного оператора это позволит гарантировать устойчивое и безопасное регулирование напряжения в местной системе электроснабжения, содержащей большое количество источников возобновляемой электроэнергии, покрывающей почти 110% пиковой нагрузки. Стоит отметить, что при обсуждении доклада отмечено, что в некоторых странах в настоящее время имеет место активный возврат к использованию вращающихся машин для компенсации реактивной мощности. Как показывают исследования и практический опыт, в ряде случаев повышение эффективности обеспечения КЭ может быть достигнуто при применении асинхронизированных синхронных компенсаторов (АСК). Проект применения АСК был реализован в Московской энергосистеме на ПС 500 кВ «Бескудниково», на которой были установлены два АСК мощностью 100 МВА каждый с воздушным охлаждением, устойчиво работающие как в режиме выдачи, так и глубокого потребления реактивной мощности в сети 500 кВ [42].

Стоимость современных многофункциональных устройств компенсации, несмотря на их высокую привлекательность, остается пока весьма значительной, существенно превышая стоимость таких традиционных устройств, как регулирование РПН напряжения трансформаторов на подстанциях, применение

конденсаторных батарей, резонансных фильтров гармоник, управляемых шунтирующих реакторов и т.п., что также в определенной степени тормозит их внедрение. Поэтому в каждом конкретном случае для принятия решения о применении тех или иных устройств компенсации необходимо сопоставление эффекта от мероприятий по улучшению КЭ с неизбежными при этом дополнительными затратами. В то же время трудно представить, что менеджмент электросетевых компаний будет в условиях отсутствия экономических стимулов инициировать включение в инвестиционную программу разработку и внедрение проектов установки дорогостоящих технических средств повышения КЭ. Наиболее реально, что предпочтение будет отдано инвестициям в замену физически изношенного устаревшего электрооборудования на новое, гарантировано обеспечивающее надежность электроснабжения потребителей и снижение эксплуатационных затрат, так как именно по этим показателям в конечном счете оценивается деятельность электросетевых предприятий. Очевидно, что для стимулирования (а в некоторых случаях и принуждения) владельцев источников искажения КЭ (ненадежные электроустановки, несимметричные и несинусоидальные нагрузки и т.п.) к установке технических средств повышения ПКЭ требуется введение на государственном уровне системы скидок и надбавок к тарифам на электроэнергию за искажения КЭ в общей точке присоединения. Применительно к электросетевым компаниям, которые не принимают участия в реализации электроэнергии, мотивирующей может оказаться введение системной услуги по поддержанию рекомендованных значений МКЗ. Для регламентации ответственности электросетевых компаний за КЭ целесообразно принять рекомендованный [43] следующий диапазон МКЗ: в сетях 6–35 кВ — в пределах 150–

1500 МВА; в сетях 110–220 кВ — в пределах 5000–10000 МВА. При этом в качестве инструментов обеспечения опережающего развития узла присоединения по результатам проведенного ТЭО могут выбраны также такие мероприятия, как строительство параллельных ЛЭП или перевод линий на более высокий класс напряжения, увеличение мощности трансформаторов, установка технических средств повышения КЭ и надежности электроснабжения, в качестве которых можно рекомендовать применение статических компенсаторов реактивной мощности, СТАТКОМ, АФСУ и электромашинных синхронных (СК) и асинхронизированных (АСК) компенсаторов с большой кратностью форсировки возбуждения. При оснащении последних маховиком на валу в качестве накопителя энергии можно успешно решать задачи компенсации провалов напряжения и кратковременных перерывов электроснабжения и колебаний частоты.

Задачи обеспечения надежности и качества электроэнергии, экономичности электроснабжения потребителей являются приоритетными направлениями энергетической стратегии развития России на долгосрочную перспективу, носят межотраслевой характер и относятся к проблемам обеспечения энергетической и национальной безопасности страны. Решение этих задач требует совершенствования и развития нормативно-правовой базы, а также проведения соответствующих технических и организационных мероприятий, которые определяются стратегией и технической политикой электросетевых компаний и должны быть основаны на применении современных технологий передачи и распределения электроэнергии и, прежде всего, средств гибкого управления электрическими сетями. Представляется, что совершенствование нормативно-правовой базы в области обеспечения КЭ в первую очередь должно быть направлено

не только на побуждение всех субъектов электроэнергетического рынка целенаправленно осуществлять мероприятия по обеспечению требуемого качества электроэнергии, но и на повышение ответственности потребителей за ухудшение ее показателей.

В многочисленных публикациях последних лет (см., например, [1, 8, 13, 15, 19, 21, 23]) в той или иной степени затрагивались предложения по совершенствованию нормативных документов. Однако, как показывает анализ, рассматриваемые в этих публикациях предложения затрагивают отдельные аспекты проблемы КЭ и не охватывают в целом всей комплексной проблемы КЭ. В то же время достаточно подробно представлены предложения по техническим и организационным мероприятиям обеспечения КЭ, включая ТЭО, проектирование, и реализацию принятых решений [1]. Учитывая комплексный характер проблемы КЭ, представляется целесообразным внесение ряда изменений и поправок в нормативно-правовые акты, национальные стандарты, стандарты организаций, корпоративные регламенты и правила, в том числе:

- внесение в Федеральный закон «Об электроэнергетике» изменений, определяющих ответственность потребителей, приобретающих электрическую энергию для производственных нужд, за поддержание на границах балансовой принадлежности КЭ, обусловленного работой их энергопринимающих устройств, в соответствии с требованиями технических регламентов и иных обязательных требований;
- внесение в Федеральное законодательство условий гражданско-правовой ответственности сторон договора купли-продажи электроэнергии за искажение ПКЭ и обязанностей каждой стороны договора уплачивать неустойку в случае внесения вклада в ухудшение КЭ;

- внесение в Федеральное законодательство требования по обязательности непрерывного контроля КЭ в точка общего присоединения по инициативе любой из сторон (потребителя, энергосбытовой или электросетевой компании);
- внесение поправок в постановление Правительства Российской Федерации от 27.12.2004 г. № 861 «Об утверждении правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии...» в части уточнения обязательств потребителей по обеспечению КЭ при технологическом присоединении и получении услуг на передачу электроэнергии;
- внесение в соответствующие разделы Правил оптового и розничного рынков электроэнергии, а также в постановления Правительства РФ услуги по поддержанию МКЗ в узле присоединения, достаточной для обеспечения нормируемых значений ПКЭ, а также дополнительных требований по распространению на генерирующие компании и потребителей услуги по регулированию реактивной мощности, а также по координации и экономическому стимулированию за оказание этой услуги;
- разработку и утверждение тарифов на потребляемую реактивную мощность, а также коэффициентов к тарифам на электроэнергию, учитывающих влияние потребителей на КЭ;
- внесение изменений в национальный стандарт КЭ в части требований к электроприемникам, содержащим нелинейную нагрузку, по допустимым искажающим токам;
- разработку и утверждение методики, регламентирующей организацию мониторинга КЭ в электрических сетях и выбора мест установки средств измерения ПКЭ;
- разработку и утверждение типовой методики выполнения измерений, контроля и анализа за КЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие электроэнергетики России в последние годы связано с проведением активных работ по инновационной модернизации и реконструкции основного оборудования электрических станций и электросетевого комплекса для повышения эффективности их функционирования. Опыт проведения этих работ показывает, что применение дорогостоящей, обладающей длительными сроками окупаемости новой техники и технологий, наряду с положительным эффектом, имеет и ряд отрицательных последствий. Одним из самых существенных из них является наметившийся в последнее время в отечественной электроэнергетике уход крупных промышленных потребителей электроэнергии из системы централизованного электроснабжения. Отдается предпочтение электроснабжению от собственных источников электроэнергии. Причинами этого являются высокая стоимость электрической энергии, а также неудовлетворительное качество оказания предприятиями электроэнергетики услуг потребителям электроэнергии, в частности:

- несмотря на то, что надежность в сетях ЕНЭС РФ практически соответствует мировому уровню, показатели надежности работы в распределительных электрических сетях РФ в 5–10 раз хуже, чем аналогичные показатели в промышленно развитых странах;
- относительные потери электроэнергии в целом по РФ в 2,5–3 раза выше, чем в промышленно развитых странах. Постоянная работа по осуществлению мер, обеспечивающих снижение потерь, позволила за последние годы добиться определенного прогресса в сетях предприятий электроэнергетики. В то же время потери электроэнергии в сетях других ведомств должным образом не учитываются и в государственном масштабе неизвестны;
- показатели качества электроэнергии в сетях электроснаб-

жения потребителей, расположенных в сбалансированных энергорайонах, в основном соответствуют требуемым. В то же время в электрических сетях потребителей в дефицитных районах с мощными искажающими нагрузками, показатели качества нарушаются, что приводит к прямому ущербу. При этом общий объем ущерба по РФ от невыполнения требований ГОСТ 32144-2013 не подсчитывался. Целенаправленная работа по улучшению КЭ не ведется, что приводит к ухудшению ситуации.

Неудовлетворительное КЭ в энергодефицитных районах имеет место в связи с недостаточной мощностью короткого замыкания (МКЗ) в точках подключения нагрузки. Несмотря на то, что методы расчетов МКЗ, а также методы определения необходимых значений МКЗ для приведения ПКЭ к нормативным значениям разработаны и применяются, представляется целесообразным разработку рекомендаций по МКЗ в узлах присоединения в сетях различных классов напряжения на основе обследования и разработки соответствующей карты. Необходимо также внести в соответствующие разделы Правил оптового и розничного рынков электроэнергии, а также в со-

ответствующее постановление Правительства РФ услуги по поддержанию МКЗ в узле присоединения, достаточной для обеспечения нормируемых значений ПКЭ.

Для мотивации электросетевых компаний целесообразно рекомендовать при согласовании технических условий на технологическое присоединение мощных искажающих потребителей руководствоваться следующими значениями МКЗ: в сетях 6–35 кВ — в пределах 150–1500 МВА, в сетях 110–220 кВ — в пределах 5000–10 000 МВА.

Отечественной промышленностью для повышения КЭ разработаны современные многофункциональные устройства FACTS, применяемые, прежде всего, для компенсации реактивной мощности. Они, помимо прямого предназначения, эффективны также для повышения пропускной способности ЛЭП, регулирования перетоков реактивной мощности и снижения нагрузочных потерь, компенсации несимметрии напряжений, а также для повышения МКЗ. В то же время невостребованность этих функций в силу разных причин приводит к тому, что оборудование гибких электропередач включается в инвестпрограммы лишь эпизодически в отличие от

широкого применения FACTS за рубежом.

Наряду с традиционными средствами усиления МКЗ в точках подключения новых нагрузок (новые ЛЭП, дополнительная трансформаторная мощность), требующими значительных объемов общестроительных и монтажных работ, могут быть рекомендованы компактные, отличающиеся высокой степенью заводской готовности статические (СТАКОМ на базе преобразователей напряжения) и электромашины (СК и АСК) компенсаторы реактивной мощности, представляемые при расчетах источником ЭДС, которая в аварийных режимах не снижается вслед за величиной рабочего напряжения.

ВЫВОДЫ

Задачи обеспечения качества электроэнергии, надежности и экономичности электроснабжения потребителей являются приоритетными в энергетической стратегии развития России на долгосрочную перспективу, носят межотраслевой характер и относятся к проблемам обеспечения энергетической и национальной безопасности страны. Очевидно, что решение этих задач требует комплексного подхода, совершенствования и развития нормативно-правовой базы. 

ЛИТЕРАТУРА

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. Под ред. А.Ф. Дьякова. М.: Энергоатомиздат, 2003. 768 с.
2. Карташев И.М., Тульский В.И., Шамонов Р.Г., Шаров Ю.В., Насыров Р.Р. Управление качеством электроэнергии. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 354 с.
3. Федеральный закон Российской Федерации от 26.03.03 г. № 35 ФЗ «Об электроэнергетике».
4. Бударгин О.М., Бердников Р.Н., Шимко М.Б., Перстнев П.А., Вороницкий В.Э. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Единой национальной электрической сети / Под общей ред. О.М. Бударгина. Красноярск: Изд-во ООО ИПК «Платина», 2015. 168 с.
5. Политика инновационного развития, энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «Россети». Утв. Советом директоров ОАО «Россети» протоколом от 23.04.2014, № 150.
6. Воропай Н.И., Ковалев Г.Ф., Кучеров Ю.Н. и др. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике. М.: ООО ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013. 212 с.
7. Федотова Г.А., Воропай Н.И. Оптимизация надежности электроснабжения потребителей / e-journal «Reliability: Theory&Applications». June 2007, №2 (Vol2). URL: http://www.gnedenko-forum.org/Journal/2007_2.htm.
8. Осика Л.К. Пути обеспечения надежности электроснабжения потребителей-субъектов оптового и розничного рынков электроэнергии на современном этапе реформирования энергетики. URL: <http://www.np-ats.ru/getfile.jsp?ftd=177>.
9. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушения электроснабжения потребителей. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 187 с.
10. Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Управление качеством электрической энергии». Москва, ноябрь 2014 г. М.: ООО Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014. 380 с.

11. Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 № 861 «Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказанию этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам АТС оптового рынка и оказания этих услуг и Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям» (в ред. Постановлений Правительства РФ от 31.08.2006 № 530, от 21.03.2007 № 168, от 21.04.2009 № 334, от 16.06.2009 № 492, от 02.10.2009 № 785, от 03.03.2010 № 117, от 09.06.2010 № 416) / Система ГАРАНТ. URL: <http://base.garant.ru/187740/>.
12. Постановление Правительства РФ от 31.08.2006 г. № 530 «Об утверждении основных положений функционирования розничных рынков электрической энергии» (в ред. Постановления Правительства от 16.07.07 № 450 от 29.12.2007 № 951 от 29.12.2007 № 996 от 28.06.2008 « 476 от 17.03.2009 № 240 от 10.05.2009 «411 от 15.06.2009 № 492 от 02.10.2009 № 785 от 17.10.2009 № 816 от 26.02.2010 № 94 от 15.05.2010 № 344 от 09.06.2010 № 416) / Система ГАРАНТ. URL: <http://base.garant.ru/189917/>.
13. Овсейчук В.А., Непомнящий В.А., Жежеленко И.В. Электроснабжение потребителей. Нормирование надежности и качества // Новости электротехники, 2014, № 5(89). С. 2–6.
14. Непомнящий В.А. Надежность оборудования энергосистем. М.: Изд. журнала «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение», 2013. 196 с.
15. Шимко Сергей, Овсейчук Валерий. Экономически обоснованное нормирование надежности и качества электроснабжения потребителей // Газета «Энергетика и промышленность России», № 7(219), апрель, 2013.
16. Постановление РФ от 31 декабря 2009 г. № 1220 «Об определении применяемых при установлении долгосрочных тарифов показателей надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг» / Система ГАРАНТ. URL: <http://base.garant.ru/12172810/>.
17. Приказ Министерства энергетики РФ от 29 июня 2010 г. № 296 «Об утверждении Методических указаний по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций» / Система ГАРАНТ. URL: <http://base.garant.ru/199252/>.
18. Приказ Федеральной службы по тарифам от 26 октября 2010 г. № 254-э/1 «Об утверждении Методических указаний по расчету и применению понижающих (повышающих) коэффициентов, позволяющих обеспечить соответствие уровня тарифов, установленных для организаций, осуществляющих регулируемую деятельность, уровню надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг» / Система ГАРАНТ. URL: <http://base.garant.ru/199713/>.
19. Сюсюкин А.И. О правовых и технических нормативных документах по оценке уровня надежности систем электроснабжения общего назначения. URL: http://journal.esco.co.ua/industry/2013_9/art296.pdf.
20. Коверникова Л.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Качество электроэнергии в ЕЭС России. Текущие проблемы и необходимые решения // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2016, № 2(35). С. 40–51.
21. Мокрова К.С. Формирование дифференцированных тарифов на электроэнергию в зависимости от уровня надежности электроснабжения потребителей / Сб. трудов Ивановского государственного энергетического университета «Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение», 2016, № 1(45). URL: <http://www.isuct.ru/e-publ/snt/ru/node/1594>.
22. Могиленко А.В. Снижение потерь электроэнергии. Опыт разных стран // Новости электротехники, 2014, № 6(90). С. 48–53.
23. Воротницкий В.Э. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в электрических сетях. М.: Интехэнерго-Издат, Теплоэнергетика, 2016. 336 с.
24. Жежеленко И.В., Сарвас В.Е., Трофимов Г.Г. Анализ факторов, влияющих на энергетическую эффективность систем электроснабжения // Энергетика та електропостачання промислових підприємств. Енергетичний менеджмент. Електромеханічні системи. Випуск 1(37) 2017. С. 56–62.
25. Electric power transmission and distribution losses (% of output). URL: <http://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS>.
26. ГОСТ 32144-2013. Электромагнитная энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
27. Технологические правила оптового рынка электроэнергии. URL: http://esco.co.ua/journal/2004_12/art57.htm.
28. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Г. Саенко. 4-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2005. 261 с.
29. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
30. Качество электроэнергии: современные требования к их обеспечению в электрических сетях железных дорог. Под ред. Г.П. Кутового. М.: Эко-Пресс, 2014. 263 с.
31. The papers of 17th International Conference on Electricity Distribution: CIRED. Barcelona, 12–15 May, 2003.
32. Куско А., Томпсон М. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии. М.: Издательство Додэка-XXI, 2010. 334 с.
33. Dugan R.C., McGranaghan M.F., Sansoto S. / Electrical Power System Quality. McGraw-Hill, 2003. 528 p.
34. Angelo Bagгини Handbook of Power Quality/Edited by Angelo Bagгини. University of Bergamo, Italy, 2008.
35. Жак Куро. Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении // Новости электротехники, 2005, № 2(32). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/05.php>.

36. Жак Куро. Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении // Новости электротехники, 2005, № 1(31). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/05.php>.
37. Лазарев Г.Б. Электромагнитная совместимость высоковольтных преобразователей частоты с системами электроснабжения и электродвигателями собственных нужд тепловых электростанций // Электротехника, 2004, №10. С. 33–42.
38. Lazarev G.B. Electromagnetic Compability of High-Voltage Transformerless Converters with controlled Frequency output // Russian Electrical Engineering, vol. 83, № 6, 2012. Allerton Press, Inc.
39. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. М.: Изд-во Торус Пресс, 2011. 311 с.
40. Мустафа Г., Гусев С. Активные фильтро-симметрирующие устройства для электроэнергетики. Издатель: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 124 с.
41. Виноцкий Ю.Д., Шакарян Ю.Г. Мировые тенденции развития современного электромашиностроения в 2014–2015 гг. Обзор // Энергия единой сети, 2016, № 3(26). С. 14–28.
42. Шакарян Ю.Г. и др. Новые электромашинные компенсаторы с двухосным возбуждением // Энергия единой сети, 2012, № 4(4). С. 52–55.
43. Крупович В.И., Иванов В.С. Повышение качества электрической энергии в промышленных электрических сетях. Материалы конференции. М.: МДНТП, 1982. С. 156–159.

REFERENCES





7 декабря 2017 года
в рамках XX юбилейной международной
специализированной выставки
«Электрические сети России - 2017»
состоится научно-практическая конференция

«Современные средства обеспечения КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ в электрических сетях и у потребителя»

Место проведения: ВДНХ, зал «Б», 2-й этаж, аудитория 238

Организаторы:



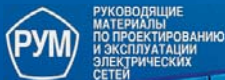
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЕТЕВОЙ КОМПАНИИ
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ



**Генеральный
информационный
партнер:**



**Информационная
поддержка:**



РУКОВОДЯЩИЕ
МАТЕРИАЛЫ
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ
И ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЕЙ

На конференции будут рассмотрены технические, научно-методические и нормативно-правовые аспекты проблематики повышения качества электроэнергии в электрических сетях общего назначения и у потребителей электроэнергии.

На конференцию приглашаются представители электросетевых компаний, нефтегазодобывающих и транспортных предприятий, нефтеперерабатывающих заводов, железных дорог, других крупных потребителей электроэнергии, жилищно-коммунального хозяйства, надзорных ведомств, производителей устройств повышения качества электроэнергии, научных и проектных организаций.

Участие в мероприятии бесплатное.

Для выступления на конференции с докладом необходимо до 01.10.2017 направить названия предлагаемых докладов с указанием их авторов и докладчиков, подробные презентации, а также краткие аннотации для рассмотрения в Программный комитет:

ДЕМЕНТЬЕВ Юрий Александрович,
советник Генерального директора
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»,
dementev_ya@ntc-power.ru,
+7 (495) 727-19-09 (доб. 1112);

ГЕРИХ Юрий Валентинович,
ведущий эксперт Отдела трансформаторного и реакторного оборудования
gerih_uv@ntc-power.ru,
+7 (495) 234-72-15 (доб. 303).

Подтверждения о включении докладов в повестку дня будут направлены до 01.11.2017.

