

ПРОБЛЕМЫ НОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

САВИНА Н.В., БОДРУГ Н.С.

Амурский государственный университет, г. Благовещенск

В последнее время часто рассматривается вопрос развития интеллектуальных активно-адаптивных электрических сетей в энергетике. Интеллектуальные электрические сети в своем проявлении имеют различные грани. В статье раскрыт вопрос нормирования качества электрической энергии при переходе на интеллектуальные электрические системы. Проведен анализ учета качества электроэнергии при реализации концепции SmartGrid в Российской Федерации и зарубежных странах. Выявлено, что проблемы нормирования качества электроэнергии и интеллектуализации электрических сетей рассматриваются и решаются независимо друг от друга, т.е. раздельно. Новые сети предполагают новые свойства. Проанализировано влияние новых свойств интеллектуальных активно-адаптивных сетей на качество электрической энергии, которые существенно ухудшают его показатели. Проведен анализ стандартов по нормированию показателей качества электроэнергии в России и за рубежом, в результате которого установлено, что ни один из них не адаптирован под интеллектуальные электрические сети.

Ключевые слова: качество электрической энергии, интеллектуальные электрические сети, SmartGrid, нормирование, активно-адаптивные электрические сети.

В данный момент идет процесс развития интеллектуальных активно-адаптивных электрических сетей, которые обладают присущими для них особенными свойствами. Организация процесса нормирования качества электроэнергии (КЭ) рассматривается как в России, так и за рубежом, и во многом зависит от индивидуальных особенностей энергетики в каждой стране. На основании этого формируется правовая база нормирования качества электроэнергии. Но в настоящее время процессы нормирования качества электроэнергии и развития интеллектуальных электрических сетей идут обособленно, раздельно друг от друга. Это подтверждается и концепцией развития SmartGrid.

Рассмотрим концепцию SmartGrid за рубежом и в России.

За рубежом основными идеологами разработки концепции SmartGrid (умная сеть) являются США, страны Европейского Союза (ЕС), Канада, Австралия, Китай и Корея, принявшие ее как основу своей национальной политики энергетического и инновационного развития. В этих странах программа имеет статус национальной и осуществляется при прямой поддержке политического руководства страны.

В странах Европейского Союза в 2005 г. была запущена платформа Smart Grids — European Technology Platform for Electricity Networks of the Future. Поставлена задача поиска новых источников электроэнергии и гармонизации развития основных секторов электроэнергетики (производства, передачи, распределения и сбыта). Данный подход является основой для других европейских и национальных программ. В документе ЕС определены следующие шесть общих приоритетов внедрения SmartGrid:

1. Оптимизация эксплуатации и обслуживания электрических сетей.
2. Оптимизация сетевой инфраструктуры.
3. Интеграция крупных возобновляемых генерирующих источников.
4. Информационные и коммуникационные технологии.
5. Активные распределительные сети.
6. Новые возможности рынка, потребителей и энергоэффективность.

В США принята за основу концепция *Grid-2030*. Она направлена на интеграцию отдельных локальных вертикально интегрированных компаний с широким спектром технологических характеристик в единую координированно-управляемую энергосистему. Данный подход предусматривает поэтапное развитие конкретных направлений интеллектуальных технологий. В рамках концепции *SmartGrid* в США выделены следующие четыре основные приоритетные области развития технологий и компетенций [1].

1. Стимулирование потребителей на базе усовершенствованной инфраструктуры измерений (*AMI – advanced metering infrastructure*).

2. Усовершенствованные процессы распределения электроэнергии (*ADO – advanced distribution operations*).

3. Усовершенствованные процессы передачи электроэнергии (*ATO – advanced transmission operations*).

4. Усовершенствованное управление активами (*AA – advanced asset management*).

В России процесс построения интеллектуальной энергетики в нормативном виде закреплён в Энергетической стратегии России на период до 2030 года, утверждённой распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. Приняты следующие основные цели и задачи:

- 1) обеспечение энергетической безопасности страны в целом и регионов;
- 2) удовлетворение потребностей экономики и населения страны в электрической энергии (мощности) по доступным конкурентоспособным ценам, обеспечивающим окупаемость инвестиций в электроэнергетику;
- 3) обеспечение надёжности и безопасности работы системы электроснабжения России в нормальных и чрезвычайных ситуациях;
- 4) инвестиционно-инновационное обновление отрасли, направленное на обеспечение высокой энергетической, экономической и экологической эффективности производства, транспорта, распределения и использования электроэнергии;
- 5) расширенное строительство и модернизация основных производственных фондов в электроэнергетике (электростанции, электрические сети) для обеспечения потребностей экономики и общества в электроэнергии;
- 6) расширенное внедрение новых, экологически чистых и высокоэффективных технологий сжигания угля, парогазовых установок с высоким коэффициентом полезного действия, управляемых электрических сетей нового поколения и других новых технологий для повышения эффективности отрасли [2].

Проведенный анализ показал, что в рассмотренных концепциях нет упоминания о нормировании КЭ и, как следствие, согласования между развитием интеллектуальных активно-адаптивных электрических сетей и нормированием показателей качества электроэнергии. А также четко видно, что развиваемые за рубежом подходы к реализации концепции *SmartGrid* не могут быть механически перенесены в российскую электроэнергетику. Это обусловлено следующим. Во-первых, наличие серьезного «технологического разрыва». Во-вторых, отсутствие в России на сегодняшний день четкого понимания того, как новые технологии и новые технические и информационные решения будут увязаны в единую систему, и каким образом будет осуществляться управление развитием и функционированием энергетической системы

в будущем. В-третьих, наличие разделения управления не только между генерирующими, сетевыми компаниями и сбытом, но и между секторами передачи и распределения электроэнергии.

Создание активно-адаптивной сети является одним из ключевых элементов построения интеллектуальной энергосистемы в России, обеспечивающей условия ее эффективного взаимодействия со всеми входящими в энергосистему элементами на основе качественного, надежного и экономичного предоставления услуг по передаче электрической энергии. Но атрибуты, которыми и наделена интеллектуальная электрическая система, негативно сказываются на показателях КЭ.

Покажем новые свойства активно-адаптивных сетей, которые влияют на качество электроэнергии:

- насыщенность сети активными элементами, позволяющими изменять топологические параметры сети;
- способность снижать загрузку распределительной сети в пиковые периоды за счет: управления электрооборудованием потребителей; использования распределенной генерации и альтернативных источников электроэнергии у потребителя (аккумуляторные батареи, солнечные батареи и другие возобновляемые источники);
- оптимизация генерации и потребления электроэнергии за счет регулирования нагрузки с максимальным учетом требований потребителей (в том числе и экономических), а также повышения пропускной способности линий электропередачи;
- вовлечение потребителей-регуляторов в процесс управления режимами;
- самодиагностика, предупреждение системных аварий (сбоев) и самовосстановление и, как следствие, снижение недоотпуска электрической энергии потребителям;
- повышение наблюдаемости сети (сбора информации) о текущем состоянии сети и ее элементов (включая внешние воздействия окружающей среды), а также обработка данной информации в режиме реального времени, т.е. использование приборов цифрового качества [1].

Исходя из вышерассмотренных свойств, можно выделить наиболее существенные источники искажения КЭ в активно-адаптивных сетях:

- частотно-регулируемые приводы, в том числе в бытовой и коммунальной нагрузке;
- ветровые электроустановки и электростанции;
- автоматизированная система возбуждения синхронных генераторов электрических станций;
- энергосберегающие осветительные установки;
- бытовые электронные технические средства.

В качестве примера можно провести соответствие между новыми свойствами активно-адаптивной сети и ожидаемым ухудшением качества электроэнергии:

- изменение топологических параметров сети в режиме реального времени может привести к существенному отклонению напряжения;
- адаптивное управление электроустановками потребителей – к несинусоидальности напряжения;
- использование распределенной генерации и возобновляемых источников электроэнергии в сетях и у потребителя – также к несинусоидальности напряжения.

Таким образом, видно, что интеллектуальные электрические сети усиливают негативное влияние на показатели КЭ, при этом ожидается резкое увеличение доли

интергармоник в спектре тока и напряжения. Еще одна особенность – изменение виновника ухудшения КЭ в течение суток. Как потребитель, так и генерация в течение суток могут изменять свой статус с источника искажения КЭ на потребителя высших гармоник и интергармоник, токов обратной и нулевой последовательности.

Следовательно, по мере развития интеллектуальной сети должны возрастать требования к нормативной базе по качеству электроэнергии, к контролю КЭ.

Нормирование и контроль КЭ регулируется государством. Проведем сравнительный анализ нормирования показателей КЭ в РФ и за рубежом.

22 июня 2013 года приказом № 400-ст Федеральным агентством по техническому регулированию метрологии введен в действие с 01 июля 2014 года в качестве национального стандарта Российской Федерации ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [3]. Он был разработан с учетом положений принятых стандартов: ГОСТ 51317.4.30-2008, ГОСТ 51317.4.7-2008 [4, 5]. Целью разработки нового стандарта было получение и последующее введение в действие в Российской Федерации нового нормативного документа по требованиям к КЭ, отвечающего рыночным отношениям в электроэнергетике и экономике страны, учитывающего рекомендации и положения международных стандартов и новых национальных стандартов по методам и средствам измерения и оценки показателей КЭ, а также сближение структуры и положений данного стандарта с европейским стандартом EN 50160:2010.

Нормы КЭ в ГОСТ 32144-2013 установлены как для электрических сетей систем электроснабжения общего назначения, присоединенных к Единой энергетической системе России, так и для изолированных систем электроснабжения общего назначения.

В отличие от ГОСТ 13109-97 (стандарт отменен), ГОСТ 32144-2013 устанавливает показатели и нормы КЭ в точках передачи электрической энергии (ТПЭ) пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц. Именно в ТПЭ происходит обращение электроэнергии в товар, в соответствии с договором на поставку или на услуги по передаче электрической энергии установленного качества, ответственность за которое несет сетевая организация. Потребителю ГОСТ 32144-2013 предписывает обеспечить условия, при которых отклонения напряжения питания на выводах электроприемников не превышают установленных для них допустимых значений, если выполняются требования настоящего стандарта к КЭ в точке передачи электрической энергии. То есть на потребителей также возлагается ответственность за обеспечение требуемого КЭ. Это согласуется с тем, что поставщики электрической энергии, со своей стороны, несут ответственность за обеспечение качества электрической энергии, поставляемой потребителям, а изготовители электроустановок и электротехнического оборудования и потребители, приобретающие его, – за то, чтобы указанные оборудование и установки при вводе в эксплуатацию не создавали недопустимых кондуктивных электромагнитных помех.

Проведем анализ на соответствие существующего стандарта требованиям активно-адаптивных сетей.

Во-первых, динамично изменяемая структура сети в процессе эксплуатации может приводить к смещению ТПЭ.

Во-вторых, в рассмотренных стандартах указан регламент по времени интеграции показателей качества электроэнергии (отклонения напряжения, несимметрия напряжения, несинусоидальность). Энергетическая система на базе

концепции активно-адаптивных сетей предполагает проводить мониторинг, диагностику в режиме реального времени и быстро реагировать на изменения надежности и качества электроснабжения.

Установленные параметры дозы фликера довольно завышены (по сравнению с европейскими), что приведет к увеличению затрат на средства снижения колебаний напряжения.

Ужесточены требования к отклонению частоты. Это делает невозможным широкое применение предусмотренных в "Энергетической стратегии России до 2030 г." когенерационных установок и установок распределенной генерации, так как они не смогут нормально работать при столь жестких требованиях к отклонению частоты в синхронизированных системах.

Установленные в стандарте требования к несинусоидальности напряжения в сетях среднего напряжения завышены по сравнению с зарубежными, что будет мешать эффективной работе активно-адаптивных сетей.

Изменения характеристик электрической энергии, относящихся к частоте, значениям, форме напряжения и симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения, разделены в стандарте на продолжительные изменения характеристик напряжения и случайные события. Случайные события представляют собой внезапные и значительные изменения формы напряжения, приводящие к отклонению его параметров от номинальных. К ним относятся: прерывания напряжения, провалы напряжения и перенапряжения, импульсные напряжения, которые связаны с неисправностями в электрических сетях или в электроустановках потребителей, а также с подключением мощной нагрузки, что присуще активно-адаптивным сетям. Для случайных событий в настоящем стандарте нормы не установлены. В то же время для активно-адаптивных сетей актуально представление показателей качества электроэнергии не случайным событием, а случайным процессом, т.е. необходимо учитывать их изменение во времени.

В новом стандарте для медленных отклонений напряжения не используются режимы наименьших и наибольших нагрузок, которые были бы необходимы для активно-адаптивных сетей при изменении топологических параметров сети.

В ГОСТ 32144-2013 введены новые категории событий:

- интергармонические составляющие напряжения. Уровень интергармонических составляющих напряжения электропитания увеличивается в связи с применением в электроустановках частотных преобразователей и другого управляющего оборудования.

- напряжения сигналов, передаваемых по электрическим сетям.

Такие категории событий характерны для активно-адаптивных сетей. Но допустимые уровни напряжения сигналов, передаваемых по электрическим сетям, и методы оценки соответствия не определены и находятся в стадии рассмотрения.

Несмотря на то, что новый стандарт КЭ ориентирован на модернизированный парк приборов (класса А), они недостаточны для интеллектуальных сетей, работа которых ориентирована на приборы цифрового качества, отвечающие стандарту надежности с отказом 0,03 % [3].

На данный момент энергосистема разделена на подсистемы: генерацию, передачу и распределение; в соответствии с этим нормативные документы по КЭ ориентированы на сегодняшние условия работы электроэнергетики. Однако концепция активно-адаптивных сетей предполагает наоборот системное управление электроэнергетикой (энергосистемой).

При адаптации ГОСТ 32144-2013 под рыночные отношения в энергетике была забыта генерация, которая тоже является участником рынка. В интеллектуальных

электрических сетях распределенная генерация, роль которой усилена, так же, как и электрические станции единой электроэнергетической системы, в разные часы суток может быть как источником искажения качества электроэнергии, так и потребителем высших гармоник и интергармоник, токов обратной и нулевой последовательности, не говоря уже об электромагнитных помехах.

Помимо нормирования показателей КЭ, необходимо обратить внимание на особенности контроля и мониторинга КЭ в интеллектуальных электроэнергетических системах.

С 01.01.2015 г. введен в действие ГОСТ 33073-2014 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Данный стандарт устанавливает основные положения по организации и проведению контроля КЭ в точках передачи/поставки электрической энергии пользователям электрических сетей систем электроснабжения общего назначения однофазного и трехфазного переменного тока частотой 50 Гц, с целью определения соответствия КЭ нормам, установленным в ГОСТ 32144, условиям договоров на поставку электрической энергии и/или на оказание услуг по передаче электрической энергии. Положения настоящего стандарта, относящиеся к контролю КЭ, применяют при осуществлении сертификационных и арбитражных испытаний электрической энергии, рассмотрении претензий к КЭ, инспекционном контроле за сертифицированной электрической энергией, а также при осуществлении государственного надзора [6].

В зарубежных странах одним из основных нормативных документов также является документ по нормированию КЭ.

Как было выше сказано, в Европе основной регламентирующий документ для оценки качества напряжения – это EN 50160:2010 «Характеристики напряжения электричества, поставляемого общественными распределительными сетями» (EN 50160:2010 «*Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks*»). Нормы EN 50160:2010 разработаны для сетей низкого напряжения – трехпроводных сетей 230 В и сетей среднего напряжения 1-35 кВ. В отличие от нашего стандарта по КЭ, они не затрагивают сети 110–220 кВ [7].

Данный стандарт поддерживается ассоциацией из одиннадцати стран: Франция, Германия, Венгрия, Италия, Польша, Россия, Скандинавия, Испания, Великобритания, Бенилюкс. Так с 1994 г. стандарт EN 50160 имеет статус норм ФРГ; эти нормы приняты также (с 15.06.1995 г.) в качестве национального стандарта Норвегии. В Дании также приняты нормы EN 50160. Стандарт EN 50160 принят также в качестве польского стандарта.

Американский стандарт IEEE Std 519 разработан американским национальным институтом стандартизации ANSI и институтом инженеров электриков и электронщиков IEEE. Кроме, собственно, стандарта, представлены также руководство для пользования и рекомендации для практики.

Австралийский стандарт в разделе, относящемся к электрооборудованию промышленности (AS/NZS 61000.3.6:2001 *Electromagnetic compatibility (EMC) - Limits - Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems* (IEC 61000-3-6:1996)), имеет три части. Первая и третья части определяют возможность и порядок подключения электрооборудования к сети. Во второй части даны нормы, определяющие допустимые значения отдельных параметров качества электроэнергии [8].

Стандарт ЮАР («ESKOM») основан на стандартах МЭК с учетом условий эксплуатации энергосистем в Южной Африке и распространяется на сети напряжением 1,1 – 44 кВ. МЭК разработан ряд документов, нормирующих уровни высших гармоник

(ВГ) в электрических сетях бытового назначения, а также в промышленных сетях. Стандарт IEC 1000-2-4 относится к сетям низшего и среднего напряжения; допустимые уровни (ВГ) определены в зависимости от класса электрической сети. При этом различают три класса.

Первый класс – электрические сети с оборудованием, весьма чувствительным к различного рода сбоям в работе сети (например, ФКУ, БК и т.д.).

Второй класс относится к узлам питания со стороны энергосистемы и узлам внутризаводской сети.

Третий класс относится только к внутризаводским сетям с вентильными преобразователями [9].

В Швеции, принимавшей активное участие в разработке стандарта *EN 50160*, тем не менее, продолжается использование установленного ранее стандарта *SS4211811*.

Приведем анализ этих стандартов на соответствие требованиям активно-адаптивных сетей.

Требования ГОСТ 32144-2013 к основным показателям качества электроэнергии (отклонение частоты и напряжения, коэффициент несинусоидальности) в 2–3 раза жестче, чем в странах МЭК и Евросоюза, что является важным отличием между стандартами. В европейском стандарте отсутствуют предельно допустимые значения для большинства показателей КЭ, не учтен такой показатель, как коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, важный для наших сетей.

Нормируемая величина дозы фликера в европейском стандарте имеет приемлемое значение для работы активно-адаптивных сетей.

Подходы к нормированию несинусоидальности напряжения, принятые в *EN 50106*, отличаются от российских. Это объясняется следующим. Наибольший ущерб от высших гармоник (в системах управления, защиты, измерения, в электронной технике, на электроприемниках и т.д.) наблюдается в сетях низкого напряжения. Поэтому требования к несинусоидальности напряжения в них должны быть довольно жесткими.

Существуют разные подходы к нормированию уровней электромагнитной совместимости (ЭМС). Стандарты МЭК и Евросоюза устанавливают их в различных точках электрических сетей, к которым подключаются разные электроприемники. Однако ни один из них не адаптирован под интеллектуальные электрические сети.

В настоящее время отсутствует координация работ по разработке и развитию интеллектуальных электрических сетей и нормированию показателей качества электрической энергии.

Новые свойства, присущие интеллектуальным активно-адаптивным сетям, существенно ухудшают качество электрической энергии.

Нормирование качества электроэнергии, как в РФ, так и за рубежом, не приспособлено к интеллектуальным электрическим сетям.

Summary

Recently the question of developing intellectual active-adaptive electrical networks in energy systems has been frequently addressed. Intellectual electrical networks are characterized by certain features. The current paper focuses upon normalizing electrical energy quality while transferring to intellectual electrical power systems. Initially, we view the way the Smart Grid concept has been realized in Russian Federation and other countries, particularly, how often normalizing electrical energy quality has been mentioned. As a result, specific features of intellectual electrical networks concerning normalizing requirements have been found. New networks mean new characteristics. The impact of the new features of intellectual active-adaptive electrical networks that lead to deterioration of electrical energy quality is analyzed. In Russian Federation and other

countries electrical energy quality is regulated by state standards. The analysis of the existing standards shows that none of them is adjusted to intellectual electrical networks.

Keywords: *electrical energy quality, intellectual electrical networks, Smart Grid, normalizing, active-adaptive electrical networks.*

Литература

1. Кобец Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SmartGrid / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
2. Распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054/ (Дата обращения: 15.05.2016).
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
4. ГОСТ Р 51317.4.30-2008. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 2008-12-25. М.: Стандартинформ, 2009. 54 с.
5. ГОСТ Р 51317.4.7-2008 (МЭК 61000-4-7:2002). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 2008-12-25. М.: Стандартинформ, 2009. 34 с.
6. ГОСТ 33073-2014 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 81 с.
7. EN 50160:2010 «Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks» (ЕН 50160:2010 «Характеристики напряжения электричества, поставляемого общественным и распределительными сетями») [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.beuth.de/en/standard/din-en-50160/136886057>. (Дата обращения: 02.02.2016).
8. AS/NZS 61000.3.6:2012 Electromagnetic compatibility (EMC) - Limits – Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems (Электромагнитная совместимость (ЭМС) – Ограничения – оценка предельных выбросов для нелинейной нагрузки на средние и высокие напряжения питания) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://shop.standards.govt.nz/catalog/61000.3.6:2012>. (Дата обращения: 02.02.2016).
9. AC Sources for IEC 1000 Harmonics and Flicker Testing (Международный стандарт МЭК (Международная Электротехническая Комиссия) 1000) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://shop.standards.govt.nz/catalog>. (Дата обращения: 03.02.2016).

Поступила в редакцию

14 июня 2016 г.

Савина Наталья Викторовна – докт. техн. наук, профессор, проректор по учебной работе Амурского государственного университета (АмГУ). Тел: (416-2)394-512. E-mail: nataly-savina@mail.ru.

Бодруг Наталья Сергеевна – аспирант кафедры «Энергетика» Амурского государственного университета (АмГУ). Тел: (416-2)394-632, 8-909-811-90-52. E-mail: bodrug82@rambler.ru.