

УДК 621.311+004

Ю.Н. Кучеров, А.В. Иванов, Д.А. Корев, Н.А. Уткин, А.З. Жук¹

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АКТИВНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ И ИХ ИНТЕГРАЦИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Аннотация. В статье проводится методологический анализ развития и интеграции в энергосистему совокупности передовых энерго- и информационных технологий обеспечения энергоснабжения на стороне конечного потребителя, определяющих новую парадигму построения систем электроснабжения. Показано, что формирование кластера активного потребителя требует решения комплекса задач как в организации внутренних систем электроснабжения конечных потребителей, так и оказывает непосредственное влияние на повышение наблюдаемости и управляемости распределительной сети общего пользования, интеллектуальное управление спросом, развитие рыночных процедур и др., создавая основу интеллектуальных систем электроснабжения будущего.

Ключевые слова: системы электроснабжения, активный потребитель, распределенная генерация, системы накопления электроэнергии, электротранспорт, «умный» дом, агрегатор, микроЭЭС, интеллектуальное управление спросом, стандартизация.

Yu.N. Kuchеров, A.V. Ivanov, D.A. Korev, N.A. Utkin, A.Z. Zhuk²

DEVELOPMENT OF ACTIVE CONSUMER TECHNOLOGIES AND THEIR INTEGRATION TO THE PUBLIC ELECTRIC NETWORK

Abstract. The article provides a methodological analysis of the development and integration into the energy system of a set of advanced energy and information technologies to provide power supply on the side of the end user, which determine a new paradigm for creating power supply systems. It is shown that the formation of an active consumer cluster requires the solution of a set of tasks both in the organization of internal power supply systems for end consumers and directly affects the increase in the observability and manageability of the public distribution network, intellectual demand management, the development of market procedures, etc., creating the basis for intelligent future power supply systems.

Keywords: power supply systems, active consumer, distributed generation, power storage systems, electric transport, smart house, aggregator, microEPS, intelligent demand management, standardization.

¹ Юрий Николаевич Кучеров – ведущий научный сотрудник ФГУП «ВНИИНМАШ» (Росстандарт), д.т.н., e-mail: jk.velegozhlife@gmail.com;

Алексей Владимирович Иванов – заведующий отделом электротехники и электроэнергетики ФГУП «ВНИИНМАШ» (Росстандарт), e-mail: a.ivanov@vniinmash.ru;

Дмитрий Андреевич Корев – директор программ и проектов АО «РВК», e-mail: Korev.DA@rvc.ru;

Никита Александрович Уткин – директор программ и проектов АО «РВК», e-mail: Utkin.NA@rvc.ru;

Андрей Зиновьевич Жук – заместитель директора по научной работе ОИВТ РАН, д.ф.-м.н., e-mail: 666zhuk@ihed.ras.ru.

² Yury N. Kuchеров – Chief Researcher of the Federal State Unitary Enterprise «Russian Research Institute of Standardization and Certification in Mechanical Engineering» (Rosstandart), Doctor of Engineering, e-mail: jk.velegozhlife@gmail.com;

Alexey V. Ivanov – Head of the Department for Electrical Engineering and Power Engineering of the Federal State Unitary Enterprise «Russian Research Institute of Standardization and Certification in Mechanical Engineering» (Rosstandart), e-mail: a.ivanov@vniinmash.ru;

Dmitry A. Korev – Director for Programs and Projects at JSC «RVC», e-mail: Korev.DA@rvc.ru;

Nikita A. Utkin – Director for Programs and Projects at JSC «RVC», e-mail: Utkin.NA@rvc.ru;

Andrey Z. Zhuk – Deputy Director for Science of the Joint Institute for High Temperatures (JIHT) of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, e-mail: 666zhuk@ihed.ras.ru.

Введение

Текущее десятилетие характеризуется устойчивой тенденцией формирования интеллектуальных электроэнергетических систем (ИЭС/ Smart Grid), методологии эволюционного перехода к интеллектуальным и взаимосвязанным системам энергообеспечения – электричество, газ, тепло, вода (Smart Energy) и др., объектам и системам новой формации, таким как «умные» дома и предприятия, «умные» города, умный человек и мир в целом.

Важнейшее место в этом процессе занимают продвинутые технологии и новое поколение систем электроснабжения конечного потребителя. Приобретают новое содержание незыблемые принципы/категории развития и функционирования ЭЭС как сложных и больших жизнеобеспечивающих инфраструктурных систем. К ним относятся обеспечение: *безопасности, надежности, качества электроэнергии и услуг, эффективности, экологической и социальной приемлемости.*

Растущий спрос на электрическую энергию, многообразие форм ее применения у конечного потребителя, взрывной характер разработки и применения новых технологий и электрооборудования/электроприборов с интеллектуальными свойствами на стороне потребителя (ИЭП/IED), высокотехнологичные и роботизированные предприятия и др. ведут к формированию нового кластера умного активного потребителя, пионера нового электрического мира [1, 2].

Основным драйвером данного развития является прогресс в целом ряде энергетических и информационно-коммуникационных технологий (ИКТ/ИСТ), в том числе на основе беспроводной связи, бурном развитии Интернета и приложений на его основе, облачных технологий и «туманных» вычислений, обработки больших данных, распределенных систем управления, стремлении и возможности всех участников электроснабжения, и потребителей в первую очередь, получить выгоду от создаваемого новыми технологиями синергетического эффекта [3].

В этой связи можно выделить несколько серьезных новшеств в системах электроснабжения. Во-первых, **тенденция на максимальное**

приближение к конечному потребителю объектов распределенной генерации (ОРГ). Это принципиально снижает плечо поставки электроэнергии потребителю, разгружает сети, снижает потери на передачу, повышает надежность электроснабжения на самом ответственном участке – «последней миле» – и что возможно самое важное в общем векторе развития – отличается разнообразием технологий, быстротой установки объектов для использования, приемлемостью капитальных затрат и нарастающим интересом конечных потребителей-владельцев, непосредственно вовлеченных в данные процессы.

Во-вторых, очевидно, что именно решение задач интеграции ОРГ в ЭЭС/сеть общего пользования как в части технологической, так и рыночной инфраструктуры, позволило приступить к реализации следующей масштабной задачи – **аккумуляции /накопления излишков энергии у конечного потребителя и вовлечения его энергоресурсов в целом в оказание услуг на локальном/розничном и оптовом рынках электроэнергии** (балансирующий рынок, рынок системных услуг и др.). В традиционной электроэнергетике и то и другое применяется в практике электроснабжения в значительном объеме, о чем пойдет речь ниже, однако на современном этапе приобретает совершенно новые взаимовыгодные качества.

Обусловлено это рядом как исторических причин, например, неравномерностью суточного и сезонного потребления, так и новыми проявлениями роста масштабов использования ОРГ в ЭЭС, включая усложнение задачи сохранения устойчивости и управляемости ее работы (вследствие снижения инерционной составляющей вращающихся масс), вынужденное резервирование на 100% выработки электроэнергии электростанций на базе солнечной и ветровой энергии, вследствие ее стохастического характера и зависимости от погодных условий, дополнительные регулирующие функции объектов традиционной энергетики (глубина и количество циклов разгрузки, остановка и пусков крупных энергоблоков), неразвитость технологий хранения электроэнергии в промышленных масштабах и др.

В-третьих, **возможность построения интеллектуальных систем управления распределен-**

ного типа, применение универсальных моделей данных и систем связи, работа с большими данными, реализация принципа Plug & Play с обеспечением совместимости, гибкости, быстрого масштабирования создаваемых объектов и систем, в том числе на низовом уровне. Это направление крайне важно, так как *объемы вовлекаемых в управление объектов представляются очень серьезными* в связи с интенсивным развитием ОРГ на стороне потребителя, количеством самих управляемых потребителей, и тем более автоматически управляемого электрооборудования активного потребителя, то есть на порядки превышают масштабы управления в традиционной электроэнергетике.

Важнейшим элементом данного развития является цифровизация электроэнергетики. Примером всеобщей цифровизации может служить проводимая в России политика формирования экосистемы экономики, основанной на глубоком внедрении информационных технологий [4, 5]. Данное направление в последние годы активно поддерживается рядом национальных проектов в энергетике, деятельностью в рамках Национальной технологической инициативы и Дорожной карты «Энерджинет».

В настоящей статье получили развитие подходы, представленные в [3]. Проводится анализ развития и взаимосвязи новых процессов и объектов управления в системах электроснабжения конечного потребителя, таких как *управляемая нагрузка, системы накопления энергии, электротранспорт, «умный» дом, микроЭЭС, агрегаторы, гибкие распределительные сети и др.*, которые в своей совокупности формируют новый кластер активного потребителя.

В системах электроснабжения потребительской триады (жилые дома – коммерческие здания – предприятия) в связи с многообразием типов потребителей, их свойств и запросов как нигде важно применение сквозных технологий, универсальных решений, международных стандартов принимаемых на основе консенсуса глобальных производителей на мировых рынках, обеспечение информационной и функциональной совместимости, кибербезопасности во взаимосвязи технологий управления на стороне по-

требителя и сети общего пользования с применением технологии интернета энергии (Internet of Energy – IoEn).

Технологии электроснабжения активного потребителя

Краткий функционально-технологический анализ условий применения передовых технологий и оборудования на стороне потребителя. Приведенный выше подход сопряжен с решением ряда принципиально новых системных задач, которые ранее не выходили на первый план и не оказывали решающей роли в обеспечении надежного и безопасного электроснабжения, в числе которых:

- множество технологических достижений промышленного характера в потребительском секторе, интегрируемых в неадаптированную для этого систему электроснабжения, в том числе интеграция *распределенной генерации*³ разного типа в сеть общего пользования [6], вывод потребителей на рынок системных услуг, автоматизация зданий;

- новая парадигма развития распределительных сетей, в том числе предусматривающая двухстороннюю передачу электрической энергии как потребителю из сети, так и от него в сеть, высокий уровень наблюдаемости и управляемости, режимы микро-, мультимикроЭЭС и др.;

- постоянно растущие требования к качеству и надежности электроснабжения и оказываемых услуг в данной сфере;

- растущее множество потребителей нового поколения: высокотехнологичное производство, системы жизнеобеспечения, уникальные здания, центры обработки данных (ЦОД) и другие потребители, требующие особых условий подключения;

- резко возрастающее количество новых и достаточно мелких в традиционном понимании объектов генерации и активных потребителей (просьюмеры, электротранспорт, накопители энергии), в том числе конечных, связанных с сетью общего пользования, которые в определенной степени должны быть наблюдаемыми и управляемыми;

³ Здесь под распределенной генерацией понимаются генерирующие источники, а также накопители электроэнергии, которые могут быть включены для работы в распределительную электрическую сеть (по терминологии СИГРЭ).

– значительные массивы данных, которые невозможно полностью обработать и передать традиционными способами, что приводит к необходимости принятия оперативных решений в автоматизированном виде на распределенной основе;

– развитие универсальной системы связи от бытовых сетей до центров диспетчерского управления верхнего уровня, основанной на единых моделях данных;

– новые энерготехнологии и системы управления, отличающиеся достаточно легкой масштабируемостью и многофункциональностью, что позволяет получать синергетический эффект.

Особого внимания заслуживает процесс формирования новых объектов управления в ЭЭС [3], к которым, в частности, можно отнести: виртуальные электростанции, интегрирующие совокупность энергоисточников малой мощности, включая ВИЭ, на значительной территории [7, 8], цифровые подстанции, гибкие распределительные электрические сети, агрегаторы [7-9], микроЭЭС (microGrid) [10, 11], системы накопления электроэнергии [12, 13], электротранспортную инфраструктуру [14, 15], энергетические хабы, сети электроснабжения «умных» домов [11, 16, 17] и др.

Рассмотрим более подробно сферу электроснабжения конечного потребителя. Примем за основу приведенные во введении тенденции и направления развития, выделим проблемные и перспективные аспекты на основе практики функционирования ЭЭС, электроснабжения ответственных потребителей, зарубежной практики интенсивного наращивания ВИЭ на стороне потребителя. Принципиально важными аспектами задачи являются:

– комплексный подход к рассмотрению конечного потребителя и поиск интегральных решений, что согласуется с рекомендациями международных организаций СИГРЭ, а также МЭК (IEC), ИСО (ISO) и др., для этого сектор конечного потребителя выделен в триаду Н-В-І (жилые дома/быт – коммерческие здания/бизнес – предприятия/промышленность), электротранспорт рассматривается только в части взаимосвязи с данными секторами;

– однозначность понятия *активный потребитель* – в схему электроснабжения потре-

ля входят собственные ОРГ, система накопления электрической энергии, электротранспорт/электромобили (EV), автоматически регулируемая нагрузка (controllable load);

– подключение схемы электроснабжения активного потребителя к распределительной сети переменного тока общего пользования/ЭЭС.

Таким образом, в рассмотрение включаются потребители, запитанные от сети низкого напряжения (НН, 0,4 кВ) – жилые дома, а также коммерческие здания и промпредприятия, получающие электроэнергию из сети среднего напряжения (СН, 10-20-35 кВ и другие промежуточные классы напряжения до уровня высокого напряжения – ВН) распределительной сети ЭЭС. Крупные электрические станции на базе ВИЭ, включаемые в высоковольтные сети ЭЭС (110 кВ и выше), и проблемы их интеграции в ЭЭС в целом подлежат специальному анализу и регламентации [6] и в данной статье не рассматриваются, как и электроснабжение потребителей в удаленных районах, не связанных с электрической сетью общего пользования.

Необходимо учитывать, что в зарубежной практике проведения исследований в сфере нового поколения систем электроснабжения обязательно включение источников энергии на базе ВИЭ. И этому есть причины, так как в силу принятых энергополитических решений и борьбы за экологию, энергетическую безопасность (при дефиците собственных топливных ресурсов) и технологическое лидерство, объемы вводов этих мощностей во многих странах уже сопоставимы или превышают вводы генерации на традиционных технологиях.

Особенности систем электроснабжения на объектах: «умный» дом – здание – предприятие

В нашей стране сложно представить первенство источников на базе ВИЭ в системах электроснабжения у конечного потребителя, включенного в сеть общего пользования. Однако развитие технологий и разнообразие условий использования ОРГ у конечного потребителя позволяют рассматривать более универсальные и прагматичные подходы с применением совместно с ВИЭ источников малой мощности: на электрохимическом принципе преобразования

энергии без сжигания органического топлива – топливные элементы (fuel cells), работающие на водороде (в том числе воздушно-алюминиевые ЭХГ) либо на органическом топливе с большим содержанием углерода (например, природный газ – метан), а также при наличии сетевого газа – микротурбины (микроТЭЦ/microCHP).

Возьмем для анализа и последующего обобщения типовую функциональную схему электроснабжения «умного» дома, предложенную МЭК (IEC) рис. 1 [11]. Схема подключена к внешней распределительной электрической сети, имеет на стороне потребителя два экологически чистых энергоисточника – фотоэлектрическую панель (PV) и топливный элемент на водороде, и содержит расширяемый набор электроприборов. Отметим, что в сеть «умного» дома входит домовой накопитель электроэнергии, связанный с внешним и двумя внутренними источниками питания, а также предусмотрена возможность подключения бортового аккумулятора/накопителя электромобиля (EV). Кроме того, следует

обратить внимание на самообеспечение дома горячей водой и теплом от топливного элемента, а также электробойлера.

Существенное развитие данная схема получает с подключением к сетевому газу. Можно говорить уже не только о схеме электро-, а о схеме энергоснабжения конечного потребителя. При этом резко возрастает надежность и эффективность энергоснабжения, взаиморезервирования источников питания, выбор источника питания другого типа – микротурбина, газовый котел, накопитель тепловой энергии, переключение с электроотопления помещения на использование газа для этих целей и др. Проект может наращиваться и далее в зависимости от типа «умного» дома (например коттедж), условий водоснабжения (электронасос, водоподготовка), канализации, обслуживания садового участка (полив, стрижка), бассейна, утилизации отходов и др.

Данная функциональная схема энергоснабжения несет явное новое качество и стоит значи-

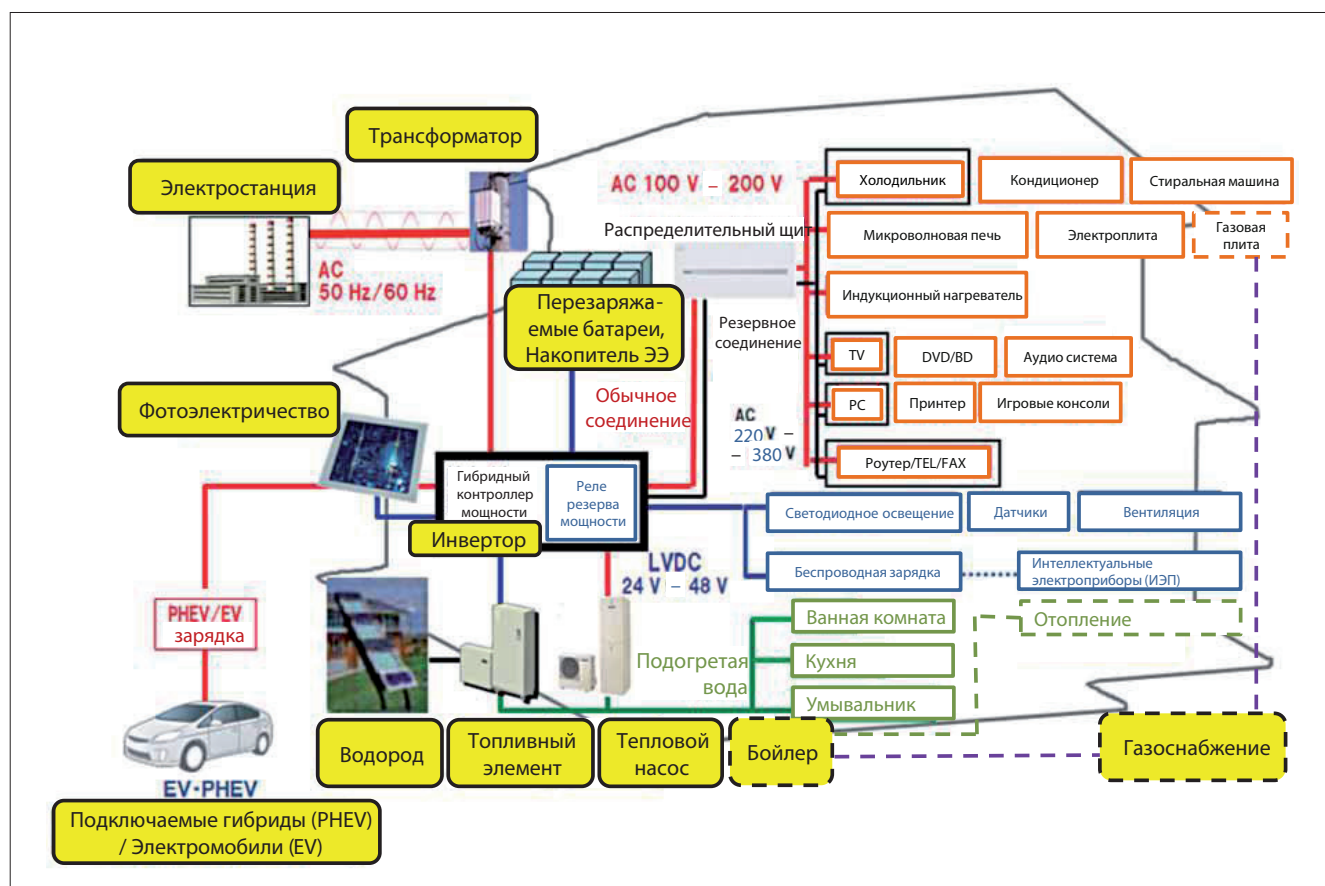


Рис. 1. Функциональная схема электроснабжения «умного» дома

тельных средств при относительно небольшой мощности источников в несколько десятков киловатт. В мегапроекте Йокогама – «умный» город (Yokohama Smart City Project), в который входит около 4000 разнообразных объектов триады Н-В-І, отрабатываются механизмы развития интеллектуального города. При этом для одного из типовых и не самых крупных проектов «умного» дома (японский кондоминиум), площадью около 150 м², стоимость которого составляет более полумиллиона долларов, техническое оснащение доходит до одной четверти стоимости дома.

Интеллектуальная составляющая такого рода проекта состоит в реализации целого ряда задач, в которые входят:

- надежная работа домовой системы энергоснабжения в синхронном режиме с сетью общего пользования;

- организация оптимального функционирования домовой системы в автоматическом режиме с наращиванием интеллектуального электрооборудования и электроприборов и их взаимодействия между собой и системами управления, в том числе с применением ресурсов Интернета, беспроводной связи с помощью Wi-Fi сети;

- управляемый заряд/разряд (обмен энергией) бортового накопителя электромобиля с домовой (технология V2H) и внешней сетью (технология V2G);

- проникновение преобразовательной техники – инверторов, выпрямителей, сетей постоянного тока низкого напряжения (LVDC) и их взаимодействие с сетью переменного тока (AC);

- взаимосвязь с оператором распределительной сети/центром управления сетями (DNO/DSO) и рыночным оператором (на уровне взаимодействия автоматических систем управления);

- реализация задач автоматического и выгодного для потребителя участия (оказания услуг) своими регулирующими энергоресурсами во внешней энергосистеме как в предоставлении избытков производимой/накопленной электроэнергии, так и автоматически снижаемой мощности потребления. К регулируемой нагрузке можно отнести, например, систему кондиционирования, накопителя электрической энергии (домовой и бортовой на электромобиле), нако-

питель тепловой энергии, стиральную и посудомоечную машины и др.;

- применение интеллектуальных счетчиков и в последующем продвинутой системы измерений (AMI), которая может стать информационным проводником «умного» дома как с рыночным, так и с техническим операторами энергетического рынка.

Новые объекты управления на низовом уровне

Все эти задачи носят принципиальный и очень непростой характер. Рассмотрим детально кратко задачу по обеспечению надежности работы домовой системы энергоснабжения и реализации функций управляемой генерации и нагрузки.

Микроэнергосистема – микроЭЭС. При такой насыщенной электрооборудованием домовой схеме энергоснабжения крайне критичным моментом является зависимость надежности работы такой системы от сети общего пользования. Внезапная потеря этого источника, как правило, может привести к коллапсу локального характера – потере работоспособности всей домовой системы, так как нарушение внешнего электроснабжения приводит зачастую к потере газоснабжения, а также Интернета.

Особое внимание к вопросу надежности энергоснабжения конечного потребителя привлекают масштабные нарушения электроснабжения, происходящие в мире, как это, например, случилось в Японии после землетрясения в марте 2011 г., когда более 8,5 млн домов остались без электричества, а восстановление заняло от 3 до 17 дней; произошедшая в июле 2012 г. авария в Индии оставила без электричества 600 млн человек, в том числе столичный мегаполис Дели. Такие системные аварии приводят к изменению традиционных подходов к электроснабжению и выработке *новой парадигмы развития электроэнергетики, основанной на достижении гармоничного сочетания объектов традиционной (большой) и распределенной (малой) энергетики*, контроля и управления надежностью электроснабжения на всех переделах энергосистемы, в том числе на стороне потребителя.

Кроме такого рода нарушений, существует опасность негативного влияния на работу электрооборудования конечного потребителя кратковременных перерывов электроснабжения, вызванных проходящими токами короткого замыкания во внешней сети и автоматическим повторным включением оборудования, глубокими провалами напряжения, значительными колебаниями частоты и др. Качественным решением по сохранению энергоснабжения «умного» дома при аварии/блэкауте во внешней сети с потерей питания от нее является *организация работы домовой сети в изолированном/островном режиме от внешней сети*.

Переход домовой сети в изолированный режим должен быть управляемым, сеть должна быстро отключиться, подключить свои источники питания, сбалансировать нагрузку, отключив неответственное электрооборудование, поддерживать энергоснабжение «умного» дома с контролем устойчивости, напряжения и частоты электрического тока. Бортовой накопитель электромобиля также может участвовать в этом процессе. При создании благоприятных условий домовая сеть автоматически синхронизируется с внешней сетью. Такой режим требует установки быстродействующего выключателя на интерфейсе с внешней сетью, синхронизатора с повторным автоматическим включением, быстродействующей защиты от токов короткого замыкания и, конечно, соответствующей системы управления, которая должна обеспечивать работу домовой сети в автоматическом режиме в реальном времени как при работе совместно с внешней сетью, так и в изолированном от нее режиме; должен быть предусмотрен ручной режим коммутации с внешней сетью.

В будущем необходимо более четко определить условия работы домовой сети в изолированном режиме как в части времени отключения и перехода к устойчивой работе, так и способности работать в таком режиме определенное время, контролировать связь с газовой сетью и др. МЭК рекомендует [11] рассматривать в составе микроЭЭС хотя бы один источник ВИЭ, а условия подключения к сети – на переменном токе. Технологические границы микроЭЭС являются четко определенными. Источник энергии (ВИЭ) территориально может быть вне зоны

микроЭЭС, тогда ее рекомендуется называть «виртуальная микроЭЭС». Система управления микроЭЭС должна взаимодействовать с системами управления верхнего уровня – DMS, EMS, а на горизонтальном уровне – с системами соседних «умных» домов – в этом случае она приобретает характер мультимикроЭЭС.

Управляемая нагрузка, агрегаторы. В энергосистемах разных стран условия классификации объектов генерации по их мощности очень различаются, например, от 10 кВт в Германии, до 25 МВт в энергосистеме России [18]. В этом плане чрезвычайно продуктивным решением последних лет является создание платформ для интеграции ресурсов ОРГ и регулируемой нагрузки, называемых агрегаторами, «виртуальными» электростанциями, системами накопления электроэнергии, микроЭЭС и т.д. В соответствии со своей бизнес-моделью агрегатор собирает малую мощность потребителей вплоть до 10 кВт и выше, набирает, например, 10 МВт и регистрируется на рынках услуг, после оказания услуги – рассчитывается с клиентом. Такое участие происходит в реальном времени, требует автоматической регистрации сделки и осуществляется с помощью весьма продвинутых и новых технологий биллинговых расчетов, смарт-контрактов и технологий распределенных реестров. Эффективное использование ресурсов активного потребителя требует развития моделей рынка, сферы системных услуг, в том числе на региональном уровне, выстраивания целостной системы управления спросом и кардинального развития процесса ценообразования на рынке в реальном времени.

Представленные технологии, принципы организации их работы и взаимодействия концептуально могут быть перенесены с уровня «умного» дома на системы энергоснабжения «умных» коммерческих зданий и промышленных предприятий, то есть на триаду Н-В-Г в целом. Для «умных» зданий (В), к которым относится множество объектов – торгово-развлекательные комплексы, бизнес-центры, здания корпораций, банки, поликлиники, уникальные задания и сооружения, такие как – вокзалы, аэропорты и др., также предусматриваются собственные энергоисточники (включая ВИЭ), мощность которых может достигать до нескольких магватт, накопи-

тели электрической и тепловой энергии, парковки электромобилей с возможностью подзарядки и связи с сетью (V2B, V2G), режим микроЭЭС, коммутация с внешними резервными источниками питания, система управления и т.д.

Аналогично с промышленными предприятиями (I), мощность энергоисточников которых может достигать до нескольких десятков МВт с учетом пропускной способности сетей среднего напряжения. Данные объекты также имеют связь с электрической сетью общего пользования, но уже на среднем напряжении, и связь с газовой сетью. Важно, что здания/помещения в триаде сразу могут создаваться как энергоэффективные с использованием нового поколения строительных материалов и технических решений по теплоизоляции, утилизации тепла, обогрева, кондиционирования воздуха, круглогодичного использования энергоустановок на принципах ко- и тригенерации и др., что создаст значительную экономию для пользователей. Перспективное направление данного развития связано с идеологией заводов будущего [19-21], применением промышленного интернета, всеобъемлющим контролем производственных цепочек, практически полностью роботизированных и связанных на глобальном рынке предприятий, производственный процесс которых может быстро реагировать/перестраиваться под изменяющуюся конъюнктуру спроса и учитывать индивидуальные запросы заказчика.

Развитие систем электроснабжения такого рода обуславливает создание на уровне триады уникальной системы автоматического управления (H-B-I MS/CEMS – Customer Energy Management System) и ее взаимодействия с внешними системами – распределительной электрической сети (DMS), систем связи и управления (EMS/SCADA), создание новой сферы разносторонних услуг – провайдеров услуг, на что направлен ресурс интернета вещей, интернета энергии, киберфизических систем. Такая система управления должна быть высокозащищенной и развиваться как распределенная система технологического и рыночного управления. Следует обратить внимание, что базовая система стандартов МЭК (IEC) в сфере развития интеллектуальных энергосистем, и в первую очередь общей информационной модели (CIM), а также

серии стандартов МЭК 61850 (IEC 61850) (рис. 2) по автоматизации и сети связи на подстанциях должна быть доработана и гармонизирована со стандартами для интерфейса активного потребителя (CEMS), стандартами по автоматизации зданий (BACS – Building Automation and Control System) и систем технологического и рыночного управления верхнего уровня. Полученные в результате универсальные модели и унифицированные решения позволят значительно сократить расходы конечных потребителей и сроки реализации проектов.

Эта деятельность должна включать в себя как интенсификацию участия российских организаций в разработке международных документов/стандартов, так и расширение национальной нормативно-технической базы в соответствии с мировыми бенчмарками. Для этого, в частности, в России на базе АО «РВК» создан инструмент – технический комитет 194 «Киберфизические системы», важной миссией которого является координация данных инициатив, в том числе со смежными структурами по стандартизации в инновационной среде электроэнергетики – ПТК 706 «Цифровые электрические сети» на базе ПАО «Россети» и ТК 016 «Электроэнергетика» на базе АО «СО ЕЭС» и др.

Новые вызовы и направления развития электроэнергетической системы

Общий анализ. Данные изменения в подходах к организации электро-, а вернее – энергоснабжения на уровне конечного потребителя создают серьезные вызовы для существующей практики планирования развития и управления энергосистем, когда традиционная энергетика должна стать более гибкой и открытой для изменений, а малая энергетика, являющаяся драйвером развития нового «электрического мира», стать более наблюдаемой и управляемой. Нельзя сказать, что для существующей системы управления в электроэнергетике в технологическом и рыночном/торговом аспектах решение данных задач начинается с чистого листа. ЭЭС является одной из самых сложных, созданных человеком, эргатических систем. В силу своего масштаба, распределенной инфраструктуры, единого технологического процесса и его быстротечности,

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

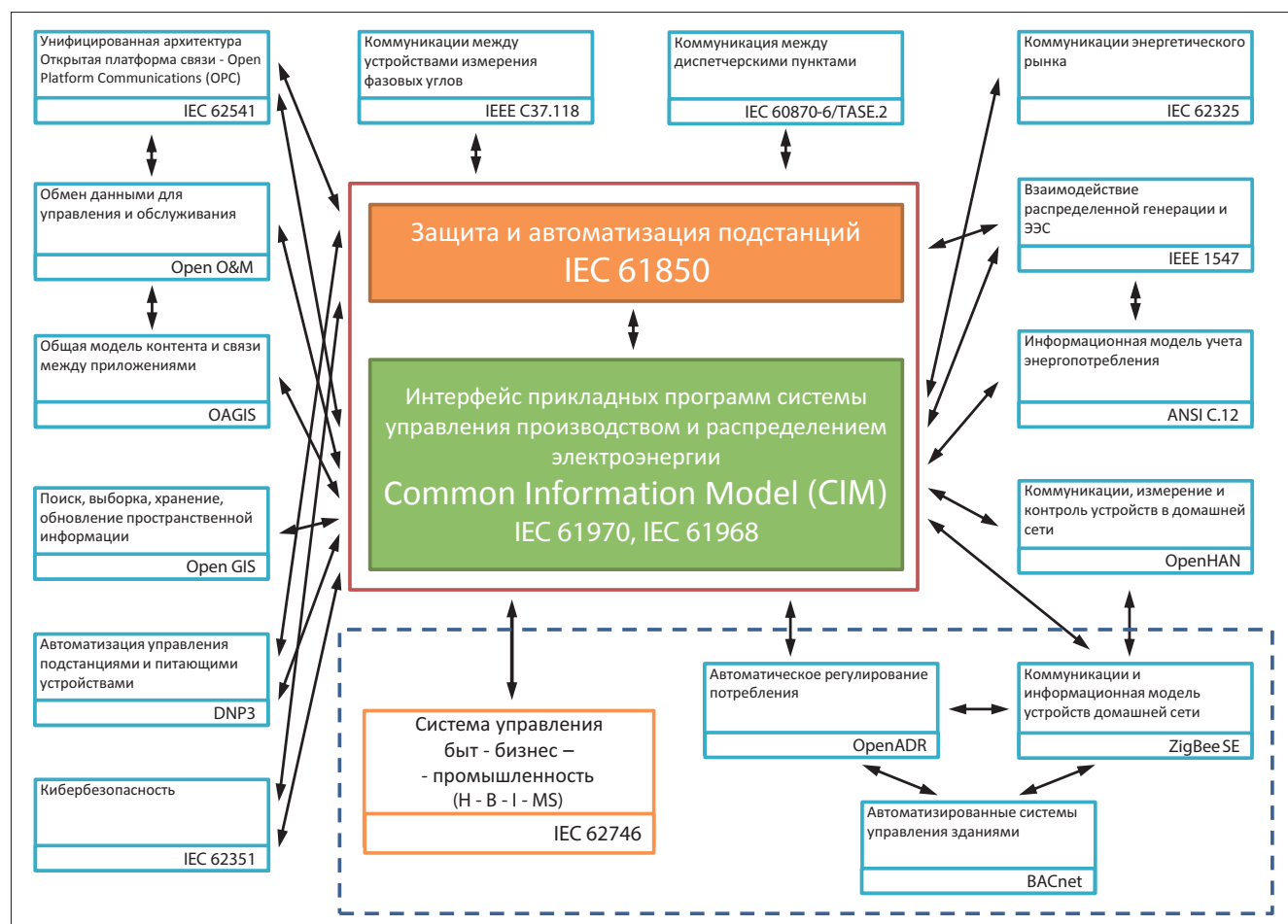


Рис. 2. Функциональная схема взаимосвязи ключевых стандартов Smart Grid

мгновенной взаимосвязи огромной разновидности объектов и оборудования, ЭЭС управляется автоматически в реальном времени специализированными системами. Управление охватывает все сектора и объекты диспетчерского управления ЭЭС (EMS/SCADA – DMS и др.) и проходит под контролем оперативно-диспетчерского и оперативно-технологического персонала.

Функционирование ЭЭС осуществляется круглосуточно и десятилетиями в автоматическом режиме, а реальное участие человека, то есть оперативно-диспетчерского и в целом инженерно-технического персонала, проявляется при планировании режимов, вводе – выводе оборудования из работы в условиях работающей ЭЭС, операциях по восстановлению электроснабжения после аварий.

Потребительский сектор является замыкающим/определяющим участником единого технологического процесса в энергосистеме – про-

изводства, передачи, распределения и потребления электрической энергии, полноправным участником оптового и розничного рынков, можно сказать, для потребителя все и делается. Многие потребители триады и сейчас используют собственные источники энергии, необходимые им по роду деятельности, например, поликлиники, торгово-развлекательные комплексы, здания корпораций, управляющих в реальном времени распределенной корпоративной или отраслевой инфраструктурой.

Для высокотехнологичных комплексов, например по производству полупроводниковых элементов для микросхем, требуется абсолютная бесперебойность электроснабжения и высочайшее качество электроэнергии, которое никогда не смогут (и не должны) обеспечивать сети общего пользования, будь это два независимых источника питания (для потребителей первой категории надежности электроснабжения) или

даже три источника питания – для специфических потребителей, таких как метрополитен и др. Поэтому потребители такого типа, получая двухстороннее питание от сети общего пользования, самостоятельно выстраивают схему энергоснабжения своего производства, имея и систему аккумуляирования, преобразовательное оборудование и резервный дизель-генератор, в том числе для подзарядки накопителя электроэнергии. Однако собственные энергоисточники потребителя сейчас, как правило, выполняют функции резервного или аварийного источника, бесперебойного питания (для цепей защиты, сигнализации и др.), но – главное то, что они работают в режиме, исключающем синхронную работу с ЭЭС.

Практика технологического/режимного/противоаварийного управления в энергосистеме такова, что конечный потребитель всегда рассматривался как пассивный элемент, подчиненный системным задачам. Для целей сохранения устойчивости энергосистем общепринятой мировой нормой является отключение потребителей при аварийном снижении частоты электрического тока. Для реализации такого управления под соответствующую автоматику заводится не менее 50% от максимального прогнозного потребления мощности энергосистемы. В ЕЭС России эта норма сформулирована предельно четко [18] – «допускается подключение под действие противоаварийной автоматики энергопринимающих установок потребителей электрической энергии всех категорий надежности электроснабжения независимо от уровня напряжения и мощности таких установок».

Однако до уровня среднего напряжения, и тем более – бытового, не доходит система автоматического мониторинга и управления со стороны энергосистемы – сетевого, системного и рыночного операторов. Существующих средств связи этих операторов совершенно недостаточно для их настройки на новые объекты и задачи. Отключение нагрузки осуществляется «по крупному» – отключением питающих фидеров на подстанциях высокого напряжения 110 кВ.

В чрезвычайных ситуациях, при восстановлении электроснабжения после системной аварии или аварии на региональном уровне, что является важнейшей задачей системного и сетевого

операторов, в мировой практике жестко регламентируется правило использования энергоресурсов потребителей, в первую очередь ОРГ, для решения системных задач, например, подъема с нуля крупных электростанций, запитывания важных объектов инфраструктуры жизнедеятельности человека и др. Процесс восстановления сейчас осуществляется сверху вниз – генерация, передача, распределение. С развитием технологий активного потребителя восстановление сети будет также включать локальные возможности с учетом работающих в сети среднего напряжения ОРГ, систем накопления электроэнергии и самовосстановления электроснабжения активных потребителей триады Н-В-Г.

Распределительные сети напряжением до 110 кВ всегда проектируются и эксплуатируются для радиального режима работы и не предполагают приема мощности от конечного потребителя. Прием мощности требует полного пересмотра парадигмы развития и эксплуатации распределительных сетей, торговых процедур, нормативной базы. Это показывает опыт последних лет в Германии, Испании, Италии и др., в которых именно в сетях низкого и среднего напряжения и наблюдается доминирующий рост присоединяемых источников электроэнергии малой мощности составляющий до 90% всех вводимых ВИЭ. Например, при 10% ОРГ в доле электропотребления уже начинаются ощутимые проблемы в распределительных сетях с повышением напряжения, ростом токов короткого замыкания вследствие роста тока подпитки от ОРГ (что недопустимо по условиям работы коммутационных аппаратов), массовыми отключениями солнечных энергоустановок от повышения частоты в ЭЭС, и аналогично – ветряных энергоустановок от просадки напряжения при близких коротких замыканиях, сложностью выполнения ремонтно-восстановительных работ в распределительных сетях с включенными источниками энергии; при 20% – эти проблемы с распределительных сетей переходят на уровень передающих сетей и с национального уровня влияют на режимы энергосистем соседних государств.

Распределительные сети должны быть наблюдаемыми и управляемыми, гибкими к присоединению и работе с инфраструктурой

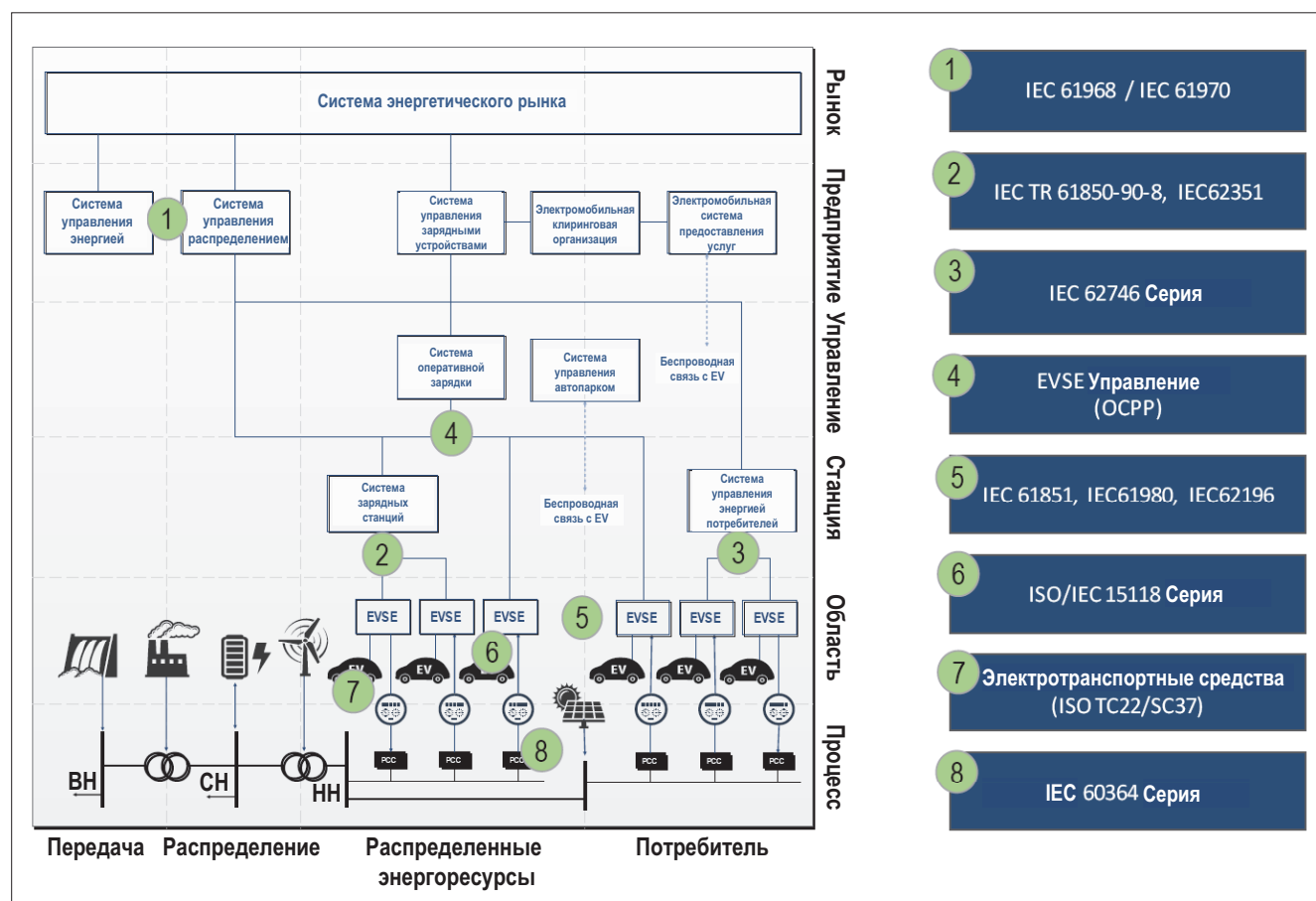


Рис. 3. Пример электрической системы и ее взаимосвязь со стандартами МЭК

активных потребителей триады, с четкими и необременительными правилами, готовыми принимать избытки мощности от конечного потребителя. К конечным потребителям должны подводиться кабели более высокого напряжения (не менее 20 кВ), в сети среднего и низкого напряжения устанавливаются трансформаторы с регулированием переключениями отпаек под нагрузкой. Подстанции оснащаются реклоузерами, средствами регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности, новыми системами релейной защиты и автоматики, телеуправления, организации режимов микро-ЭЭС и др. Повышенные капитальные вложения, по сравнению с существующими подходами, должны компенсироваться значительным снижением потерь в сетях и повышением качества и надежности электроснабжения. Должна выстраиваться система мониторинга потребления и генерации, прогнозирования потребления.

Развитие активного потребителя и предоставление его услуг для решения задач электроснабжения в совокупности с повышением экологической безопасности и надежности хорошо прослеживается в электротранспорте (EV, E-mobility), пока достаточно экзотичном для нас секторе интеллектуальной энергетики. Особого внимания заслуживает интеграция электротранспортной инфраструктуры и контроля процессов заряда/разряда, которая для режимов быстрого процесса заряда/разряда, реализации технологии V2B & V2G – обмена электроэнергией бортовых накопителей с внешней сетью [14, 15] требует оборудования устройствами силовой электроники и специализированных систем управления (рис. 3) [16] во взаимосвязи с системами управления сетями и рынком. Все составляющие процесса охвачены стандартизацией (МЭК, ИСО, IEEE и др.). Примеры активности в данном секторе показывают Китай, занявший в 2016 г.

устойчивое первое место в мире по количеству электротранспорта, а также Япония, завершающая в течение ближайших лет создание электрозарядной инфраструктуры для всей территории страны.

Для решения представленных задач требуется создание или модернизация не только электросетевого хозяйства, но и реализация продвинутых систем управления сетями – как распределительных (ADMS – Advanced Distribution Management System), так и внутренних сетей энергоснабжения триады – H-V-I EMS/CEMS, связанной со стандартизированными требованиями по автоматизации зданий, оснащение совместно с уровнем триады продвинутой/интеллектуальной инфраструктурой измерений (AMI) с интеллектуальными счетчиками. Эти приборы могут обеспечить контроль надежности электроснабжения, качества электрической энергии и обслуживания. В то же время они являются интерфейсом для систем электроснабжения «умного» дома (здания – предприятия) на низовом уровне, связи с агрегатором и существующим оператором рынка на верхнем уровне. Эти же приборы рассматриваются как неотъемлемое звено в системе мер по существенному сокращению затрат на реализацию технологии обеспечения связи источников энергии домохозяйств различного типа с сетью общего пользования, выстраивания системы интеллектуального управления спросом, а также в перспективе – интеграции системы измерений разнородных продуктов – электроэнергии, газа, тепла и воды.

В целом распределительные сети приобретают активный характер вследствие присоединения нарастающего множества ОРГ разного типа, регулируемой нагрузкой потребителей, системой накопления электроэнергии, электрозарядной инфраструктурой и преобразовательной техникой, двусторонних потоков мощности, достижения высокого уровня технологической совместимости и взаимодействия в условиях нарастающего множества объектов управления. Электросетевые компании/сетевые операторы (центры управления сетями в ЭЭС России) должны превращаться в полноценных системных операторов регионального уровня, что потребует реорганизации их деятельности, усиления обмена данными как на горизонтальном,

так и на вертикальном уровнях. Отметим, что цифровизация должна получить наибольшее развитие именно в данном секторе электроснабжения.

Существенной модернизации требуют процедуры системного, сетевого и рыночного операторов для осуществления доступа активного потребителя с очень незначительной единичной мощностью своей системы/электрооборудования к участию в торговых операциях на рынке и системных услугах. Это потребует глубокой перестройки системы режимного и противоаварийного управления в ЭЭС с использованием ее главного ресурса – отключения любого потребителя в любое время с выводом этого процесса на взаимосвязь с агрегаторами ресурсов активных потребителей на взаимовыгодной основе.

Выводы

1. Активный потребитель является важнейшим драйвером развития электроэнергетики снизу, представляя собой основные объемы потребления в бытовом, коммерческом и промышленном секторах. Технологии активного потребителя стремительно развиваются как в части собственных надежных и эффективных энергоисточников малой мощности, включая ВИЭ и системы накопления электрической и тепловой энергии, автоматически управляемую нагрузку, электрозарядную инфраструктуру, так и информационно-коммуникационных технологий.

Создание интеллектуальных систем энергоснабжения в триаде: «умный» дом – здание – предприятие позволяет принципиально повысить качество, надежность и эффективность электроснабжения конечного потребителя и предоставить значительный ресурс с помощью платформ агрегаторов и виртуализации потоков ресурсов как в части избыточной мощности генерации, системы накопления, так и автоматического снижения потребления.

2. Интенсивное наращивание энергоресурсов на нижнем и среднем уровнях напряжения электрической сети и задача их интеллектуализации представляет серьезный вызов для распределительных и передающих сетей, а также ЭЭС в целом. Требуется как существенная модернизация и реорганизация деятельности сетевых операторов распределительных сетей, так и со-

вершенствование системы связи, управления, а также рыночных процедур.

3. Необходимо активно использовать передовую практику международных организаций СИГРЭ (CIGRE), МЭК (IEC), ИСО (ISO), МСЭ (ITU), полноправным членом которых является Россия, по стандартизации в сфере сквозных технологий, направленной именно на обеспечение функциональной и информационной совместимости новых технологий и оборудования как между собой, так и с технологиями традиционной электроэнергетики; развивать координацию и взаимодействие специализированных

технических комитетов по стандартизации на национальном и международном уровнях с вовлечением ресурсов энергокомпаний.

Данная практика по обобщению технических условий, унификации моделей, применения универсальных средств связи, сквозных технологий, стандартизации интеллектуальных систем электроснабжения конечных потребителей и их интеграции в ЭЭС имеет для электроэнергетики России очевидный инновационный характер и значительно сократит время и ресурсы для поиска лучших решений, разработки и применения прорывных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Интеллектуальное развитие электроэнергетики с участием активного потребителя / под ред. Бушуева В.В. М.: Энергия, 2013. 84 с.*

2. Бушуев В.В., Кучеров Ю.Н. *Инновационное развитие электроэнергетики как важнейший приоритет стратегического развития России // Электро. № 1, 2016.*

3. Иванов А.В., Кучеров Ю.Н., Корев Д.А., Самков В.М. *Развитие стандартизации интеллектуальных систем электроснабжения будущего // Энергия единой сети. № 3 (38), 2018.*

4. *Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» / РП РФ от 28 июля 2017 № 1632-р.*

5. *Цифровой переход в электроэнергетике России / под общ. ред. В.Н. Княгинина, Д.В. Холкина, НТИ, ЦСР, Энерджинет, 2017.*

6. Кучеров Ю.Н., Березовский П.К., Веселов Ф.В., Илюшин П.В. *Анализ общих технических требований к объектам распределенной генерации при их интеграции в энергосистему // Электрические станции, № 3, 2016. С. 2-10.*

7. *TB 475 CIGRE: Demand Side Integration. WG C6.09, August 2011. Available at: www: e-cigre.org.*

8. *Next Kraftwerke. Available at: www: next-kraftwerke.com.*

9. *Концепция функционирования агрегаторов распределенных энергетических ресурсов в составе ЭЭС России. Агрегатор управления спросом на электроэнергию / СО ЭЭС, версия 1.3, 18 мая 2018. URL: www: so-ups.ru.*

10. Nikos H. *CIGRE – Micro Grid, 2014.*

11. *IEC White papers. Micro Grids for disaster preparedness and recovery. 2014.*

12. *Рынок систем накопления электроэнергии в России / под ред. Ю. Удальцова, Д. Холкина, НТИ, ЦСР, Энерджинет, Москва, 2018.*

13. *TB 721 CIGRE: Impact of Battery Energy Storage Systems on Distribution Networks. WG C6.30, March 2018. Available at: www: e-cigre.org.*

14. *Концепция развития экологически чистого электротранспорта и его влияние на облик энергосистемы будущего / Сб. трудов НАМИ. Доклад на Международном автомобильном научном форуме «Интеллектуальные транспортные системы» (МАНФ-2017) / Е.А. Бузоверов, А.З. Жук, Ю.Н. Кучеров, ОИВТ РАН.*

15. Жук А.З., Бузоверов Е.А., Шейндлин А.Е. *Распределенные системы накопления электроэнергии на основе парков электромобилей // Теплоэнергетика, 2015, № 1. С. 3-8.*

16. *IEC TR 63097: 2017 Smart Grid standardization roadmap. Edition 1.0 (2017 – 11-14).*

17. *IEC TR 62746 – 2: 2015 System interface between customer energy management system and the power management system / Edition 1.0 (2015 – 04).*

18. *Правила технологического функционирования электроэнергетических систем / ПП РФ от 13 августа 2018 № 937.*

19. *IEC. White papers. Factory of the future. 2015.*

20. Шваб К. *Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2016, 208 с.*

21. *German Standardization Roadmap – Industry 4.0, version 2, DIN/DKE, January 2016.*

REFERENCES

1. *Intellectual development of the electric power industry with the participation of an active consumer* / Ed. Bushuev V.V. Moscow: Energia, 2013. 84 p. (in Russian).
2. Bushuyev V.V., Kucherov Yu.N. *Innovative development of the electric power industry as the most important priority of Russia's strategic development* // *Elektro*. No. 1, 2016 (in Russian).
3. Ivanov A.V., Kucherov Yu.N., Korev D.A., Samkov V.M. *Development of standardization of intelligent power supply systems of the future* // *Energy of a unified network*. No. 3 (38), 2018 (in Russian).
4. *The program «Digital Economy of the Russian Federation»* / OG of the Russian Federation of July 28, 2017 No. 1632-r (in Russian).
5. *Digital transition in the power industry in Russia* / Ed. V.N. Knyaginina, D.V. Holkin. STI, CSR, Energyet, 2017 (in Russian).
6. Kucherov Yu.N., Berezovsky P.K., Veselov F.V., Ilyushin P.V. *Analysis of general technical requirements for distributed generation objects during their integration into the energy system* // *Electric Stations*, No. 3, 2016. pp. 2-10 (in Russian).
7. TB 475 CIGRE: *Demand Side Integration*. WG C6.09, August 2011. Available at: [www: e-cigre.org](http://www.e-cigre.org).
8. *Next Kraftwerke*. Available at: [www: next-kraftwerke.com](http://www.next-kraftwerke.com).
9. *The concept of functioning of aggregators of distributed energy resources within the UES of Russia. Electricity demand management aggregator* / SOE, version 1.3, May 18, 2018. URL: [www: soups.ru](http://www.soups.ru).
10. Nikos H. *CIGRE – Micro Grid*, 2014.
11. IEC *White papers. Micro Grids for disaster preparedness and recovery*. 2014.
12. *The market of power storage systems in Russia* / Ed. Yu. Udaltsov, D. Holkin, STI, CSR, Energyet, Moscow, 2018 (in Russian).
13. TV 721 CIGRE: *Impact of Battery Energy Storage Systems on Distribution Networks*. WG C6.30, March 2018. Available at: [www: e-cigre.org](http://www.e-cigre.org).
14. *The concept of the development of environmentally friendly electric transport and its impact on the future of the energy system of the future* / Sb. works of NAMI. Report at the International Automotive Scientific Forum «Intelligent Transport Systems» (MANF-2017) / E.A. Buzoverov, A.Z. Zhuk, Yu.N. Kucherov, OIVT RAS (in Russian).
15. Zhuk A.Z., Buzoverov E.A., Sheindlin A.E. *Distributed systems for electric power accumulation based on electric vehicle parks* // *Teploenergetika*, 2015, No. 1. P. 3-8 (in Russian).
16. IEC TR 63097: *2017 Smart Grid standardization roadmap*. Edition 1.0 (2017-11-14).
17. IEC TR 62746-2: *2015 System interface between customer energy management system and the power management system*. Edition 1.0 (2015 – 04).
18. *Rules of technological functioning of electric power systems* / OG of the Russian Federation of August 13, 2018 No. 937 (in Russian).
19. IEC. *White papers. Factory of the future*. 2015.
20. Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. Moscow: Eksmo, 2016, 208 p. (in Russian).
21. *German Standardization Roadmap – Industry 4.0, version 2, DIN / DKE*, January 2016.

Поступила в редакцию
21.09.2018 г.