



ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

5
ВЫПУСК
2018

— МОСКВА —

УДК 004.8:621.311 «21»

Ф.В. Веселов, В.В. Дорофеев¹

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭНЕРГОСИСТЕМА РОССИИ КАК НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

Аннотация. В статье представлено видение интеллектуальной энергосистемы как нового состояния электроэнергетики России в XXI веке. Рассматриваются основные свойства и характеристики интеллектуальной энергосистемы как эффективной инфраструктуры для энергоснабжения потребителей в цифровой экономике. Обсуждаются первоочередные шаги на пути технологической трансформации отрасли, вопросы ее стоимости и эффективности, а также значимости для государственной энергетической политики.

Ключевые слова: электроэнергетика, интеллектуальная энергосистема, инфраструктура, информационная система, пилотные проекты, эффективность.

F.V. Veselov, V.V. Dorofeev²

SMART GRID OF RUSSIA AS A NEW STAGE OF POWER ENGINEERING DEVELOPMENT UNDER CONDITIONS OF DIGITAL ECONOMY

Abstract. The article presents the vision of a smart grid as the new state of Russian power engineering in the 21st century. The main features and characteristics of a smart grid as an effective infrastructure for a consumer power supply in digital economy are considered. The top priority steps towards the technological transformation of the industry, the issues of its cost and effectiveness and its significance for the State Energy Policy are discussed.

Keywords: power engineering, smart grid, infrastructure, information system, pilot projects, effectiveness.

Введение

В начале XXI в. мировая электроэнергетика в целом (особенно – крупнейшие национальные энергосистемы – ЭЭС) столкнулась с целым набором новых вызовов, требующих комплексного, системного ответа, который сформировал бы новый вектор ее развития как важнейшей инфраструктуры экономики.

С одной стороны, мощные технологические продвижения (сопровождаясь не менее мощным экономическим стимулированием со стороны государства) привели к активному развитию технологий распределенной энергетики, включая источники на основе возобновляемой энер-

гии ветра и Солнца. Масштабная интеграция новых технологий сопровождается проявлением новых эффектов в ЭЭС, из которых ключевыми являются изменчивость режимов производства электроэнергии (как по интенсивности, так и продолжительности) и появление двунаправленных перетоков мощности, требующих все большей гибкости при балансировании ЭЭС.

С другой стороны, интенсивное реформирование хозяйственной структуры в электроэнергетике, развитие конкурентной среды на оптовом и розничном рынке вместе с растущей дифференциацией потребительских требований по надежности, качеству и стоимости энергоснабжения, появление альтернативных рыноч-

¹ Федор Вадимович Веселов – заместитель директора Института энергетических исследований РАН, к.э.н., *e-mail*: erifedor@mail.ru;

Владимир Валерианович Дорофеев – независимый эксперт в области электроэнергетики, *e-mail*: dorofeev-v-v-1945@yandex.ru

² Fedor V. Veselov – Deputy Director of Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, PhD in Economics *e-mail*: erifedor@mail.ru;

Vladimir V. Dorofeev – independent expert in power engineering, *e-mail*: dorofeev-v-v-1945@yandex.ru.

ных и технологических возможностей для удовлетворения спроса, делают краткосрочные коммерческие факторы все более значимыми для управления функционированием и развитием ЭЭС, меняют саму идеологию взаимодействия с потребителем, который становится активным участником технологических и коммерческих взаимодействий.

Наконец, бурное технологическое развитие в сфере информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) создало принципиально новые возможности для повышения оперативности анализа и прогноза ситуации в ЭЭС и принятия решений на основе обработки сверхбольших массивов и потоков данных. Вместе с совершенствованием современных методов и моделей управления крупными системами, в том числе построенных на принципах распределенного, мультиагентного управления, с применением нейронных сетей и искусственного интеллекта, это позволяет на практике перейти к организации более гибкого управления работой ЭЭС и электроэнергетического рынка.

Активные действия по поиску новой парадигмы развития электроэнергетики в ответ на эти вызовы уже, как минимум десятилетие, отождествляются с термином «интеллектуальная сеть или энергосистема» (Smart Grid). Проведенный в ИНЭИ РАН³ анализ определений, представленных в национальных стратегических документах стран OECD и в работах ведущих энергетических организаций (IEA, IEC, IEEE, EPRI), показал, что трактовки данного термина крайне расплывчаты и неоднозначны. Наиболее часто в определениях встречаются слова «информационные технологии», «системное управление» и «сеть». Таким образом, большинство определений в той или иной мере старается отметить принципиально важное новое качество ЭЭС – синтез, интеграцию энергетических и информационных сетей как единой инфраструктуры энергоснабжения потребителей в XXI веке.

В России системный взгляд на перспективы интеллектуализации для ЭЭС России начал формироваться так же на рубеже 2010-х годов [1, 2], во многом опираясь на обобщение первого мирового опыта и концепций [3, 4]. Важным

этапом на этом пути стала разработанная по инициативе ФСК ЭЭС «Концепция построения интеллектуальной энергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС)» [5]. Наконец, в 2015 г. Минэнерго РФ с привлечением ведущих экспертов РЭА, ИНЭИ РАН, НИУ ВШЭ была разработана Концепция реализации национального проекта «Интеллектуальная энергетическая система России». Являясь участниками вышеперечисленных работ и публикаций, авторы в настоящей статье представляют основные принципы и подходы к трансформации традиционной системы энергоснабжения в рамках ЭЭС России в условиях перехода всей экономики страны на новый, цифровой уровень организации и развития.

Интеллектуальная энергосистема как новый тип инфраструктуры

Исходя из рассмотренной выше триады вызовов в условиях развития цифровой экономики и постиндустриального общества, существующая электроэнергетическая система России будет трансформироваться в инфраструктуру нового типа – интеллектуальную энергосистему (ИЭС), которая создает условия удовлетворения энергетических запросов общества с максимальной эффективностью и оперативностью за счет организации гибкого технологического взаимодействия всех ее элементов, структур и субъектов с целью получения, преобразования и использования энергии, при согласовании интересов множества включенных в нее субъектов на основе оценки результатов и управления будущими рисками и при максимальном использовании экономических (рыночных) принципов взаимодействия и организации управления технологическими системами, адаптирующимися к непрерывным изменениям требований пользователей и внешней среды. В таком широком определении интеллектуальная энергетическая система может включать в себя и поставки других энергоносителей, ориентированных на использование общей сети, связывающей поставщиков и потребителей – таких как тепло и газ.

³ При активной помощи к.э.н. А.И. Федосовой.

С учетом обобщения мировой терминологической практики ниже под интеллектуальной энергосистемой понимается новое поколение систем энергообеспечения потребителей, представляющее собой синтез электроэнергетической и информационной систем и обладающее новыми функциональными возможностями («степенями свободы») для организации технических и экономических взаимодействий за счет:

- минимальных ограничений для интеграции через общую электрическую сеть и общий электрический режим любых типов объектов производства, накопления и потребления электроэнергии, использования доступных источников энергии на основе сочетания централизованной и распределенной генерации;
- высокой оперативности и гибкости (адаптивности) функционирования и развития в условиях высокой волатильности режимов, технологической и пространственной структуры производства и потребления электроэнергии, под влиянием технологических и экономических (рыночных) факторов;
- клиентоориентированности, приоритетности индивидуальных требований потребителей по эффективности, надежности и качеству энергоснабжения, их интересов и стратегий поведения при максимальной вовлеченности потребителей в формирование эластичного рыночного спроса на электроэнергию и системные услуги, поддержание резервов и режима работы энергосистемы, механизмы ценообразования для услуг сетевой инфраструктуры.

Исходя из определения ИЭС, изменение ее основных свойств можно рассматривать в виде крупных функционально связанных процессов, которые совместно происходят в каждом из четырех структурных сегментов энергосистемы – контурах экономических, технологических, управленческих, информационных взаимодействий (рис. 1).

1. Экономический (рыночный) контур создает новые возможности эффективного экономического взаимодействия между пользователями интеллектуальной энергосистемы: потребителя-

ми энергоресурсов, генерирующими компаниями, электросетевыми и другими инфраструктурными организациями, обеспечивая учет дифференцированных интересов и стратегий их поведения с целью достижения максимальной эластичности рыночного спроса и предложения на энергию и услуги, оптимизации соотношения их стоимости и качества. Основные изменения функциональности в этом сегменте включают в себя:

- множественность форматов рыночных площадок на уровне локальных, региональных и национальной энергосистем, действующих по общим правилам во всем временном диапазоне – от реального времени до годовых и более периодов;
- возможность свободного доступа к торговой системе любым участникам (действующим и потенциальным) на основе конкуренции и единых правил;
- расширение состава предлагаемых на рынке продукции и услуг для учета индивидуальных запросов потребителей по эффективности, надежности и качеству энергоснабжения (электроэнергия, мощность, системные услуги, иные сопутствующие, в том числе комплексные энергоинформационные услуги);
- гибкое участие потребителей в формировании эластичного рыночного спроса, в том числе в качестве поставщиков энергии, мощности и услуг на любой из торговых площадок;
- эффективное сочетание механизмов централизованных торгов и двухсторонних договорных отношений между поставщиками и получателями энергии и сопутствующих, в том числе системных, услуг;
- включение в конкурентные торговые отношения электросетевых организаций, позволяющее сформировать дифференцированную стоимость услуг по передаче и распределению электроэнергии с учетом условий подключения потребителей по надежности и качеству, а также их удаленности.

2. Технологический контур обеспечивает поддержку функциональных возможностей эко-

номического контура на основе максимально широкого применения современных решений в силовой части ИЭС для достижения оптимальных состояний энергосистемы, отвечающих условиям экономичности, надежности и качества при производстве, передаче, распределении и использовании энергии за счет расширенных возможностей для адаптивного изменения состояния технических объектов, включая:

- оптимизацию вариантов энергоснабжения потребителями в рамках двустороннего обмена мощностью с энергосистемой за счет ситуационного (на основе рыночных сигналов) регулирования активной и реактивной нагрузки, расширения регулировочного диапазона (собственная генерация, электромобили, аккумуляторы), возможностей эффективной работы в параллельном и автономном режимах;
- изменение топологии сети для оптимизации маршрутов передачи энергии с заданным уровнем надежности через воздействия на активно-адаптивные (то есть обладающие изменяемыми характеристиками) элементы (оборудование) сети, электроустановки генерации и активных потребителей;
- гибкое реагирование генерирующих и аккумулирующих источников на изменение платежеспособного спроса на энергию с поддержанием баланса в различных режимных ситуациях.

3. *Контур адаптивного управления* энергосистемой строится на комбинации разных типов и методов централизованного и распределенного управления и позволяет использовать для целей управления сочетание возможностей технологических элементов и экономических принципов в любом из режимных состояний, в том числе реакцию на возникновение нерасчетных (аварийных) ситуаций с послеаварийным восстановлением нормальной работы системы, включая:

- максимальную самодиагностику элементов энергосистемы с использованием ее результатов в алгоритмах функционирования автоматических систем режимного и противоаварийного управления;
- адаптивную реакцию на текущую ситуацию в энергосистеме в режиме реально-

го времени, прогнозирование и оценку рисков, предупреждение возникновения и развития аварийных ситуаций за счет использования автоматических систем управления;

- оказание широкого спектра системных услуг на основе оптимального использования распределенных возможностей (ресурсов) генерирующих источников, сетевых объектов, потребителей, используя формат рынков системных услуг;
- повышение автоматизации за счет применения высокопроизводительных вычислительных ресурсов и алгоритмов управления, как для выработки автоматических управляющих воздействий, так и для предоставления рекомендаций диспетчерскому, оперативно-технологическому и ремонтному персоналу для реализации управления и проведения необходимых работ;
- решение задач, обеспечивающих в реальном масштабе времени согласование на рыночных принципах экономических интересов всех участников рынка, включая достижение согласованных уровней надежности и качества энергоснабжения, а также обеспечение системной надежности функционирования энергосистемы в целом и ее частей в нормальных режимах;
- сохранение живучести энергосистемы при возникновении аварийных ситуаций, в том числе каскадного типа, с возможностью привлечения потребителей к противоаварийному управлению, обеспечение возможности самовосстановления частей и энергосистемы в целом.

4. *Информационно-коммуникационный контур* обеспечивает новое качество управления, технологического и рыночного взаимодействия в энергосистеме. Главным функциональным признаком информационно-коммуникационного контура является его превращение в «параллельное» энергетическому контуру единое информационное пространство, которое пронизывает все виды взаимодействий в технологическом и экономическом контурах и является основной для



Рис. 1. Функциональные роли в структуре интеллектуальной энергосистемы

реализации новых возможностей адаптивного управления в ИЭС, включая:

- возможность сбора и обработки больших объемов информации о текущем состоянии энергосистемы и ее элементов (обеспечение наблюдаемости), информации о внешней среде (освещенность, осадки, гололед, ветровые нагрузки и другие метеофакторы) с ее использованием в современных системах управления реального времени;
- стандартизованный высокотехнологичный доступ к информационно-вычислительным ресурсам ИЭС на основе клиентских порталов для организации участниками системы собственных оценок по рыночным предпочтениям при торговле энергией и услугами, оптимизации условий доступа к сети и рыночным площадкам, выполнении прогнозов и аналитических оценок;
- высокий уровень информационной безопасности за счет встраивания элементов систем безопасности во все технологические системы и операции, защиты информационного пространства и частной информации всех структур системы, включая потребителей, во всех режимах функционирования энергосистемы;

- обеспечение электромагнитной совместимости вторичных систем и их защиты от внешних электромагнитных и других воздействий, включая кибератаки.

Взаимосвязь структурных сегментов интеллектуальной энергосистемы иллюстрируется на рис. 1: технологический контур является основной для физической поддержки функциональности экономического контура взаимодействия субъектов интеллектуальной энергосистемы, а проникающие в них контуры адаптивного управления и информационно-коммуникационного взаимодействия обеспечивают связность и гармонизацию работы ИЭС.

Особенности перехода к интеллектуальной энергосистеме

Как было отмечено во введении, в отличие от прежних структурных сдвигов, вызванных научно-техническим прогрессом в технологиях производства электроэнергии, важными драйверами перехода к интеллектуальной энергетике являются технологические достижения в других отраслях, прежде всего – в сфере передачи и обработки информации и современных методов и моделей управления крупными системами. За счет прорывов в сфере ИКТ, в от-

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

личие от других технологических направлений, можно заметно снизить темпы традиционного, экстенсивного развития отрасли без ущерба для надежности и стоимости энергоснабжения за счет более эффективного использования существующего потенциала энергетической инфраструктуры, которая при этом получает своего второго, «информационного двойника» – «энергетический интернет».

Переход к ИЭС представляет собой сложную инженерно-экономическую и организационную задачу, которая включает в себя, с одной стороны, масштабное обновление парка энергетического (электросетевого, генерирующего, электропотребляющего) оборудования, а с другой – переход на новые поколения систем управления технологическими процессами и экономическими взаимодействиями (рыночными операциями) на всех уровнях, начиная с локального (рис. 2).

Эти изменения в методах и инструментах управления функционированием и развитием электроэнергетики предполагают три важнейших стадии:

- повышение автоматизации, обеспечивающей большую оперативность реакции

технических устройств и систем управления, субъектов рынка на изменяющиеся внешние условия;

- повышение информатизации, обеспечивающей новый уровень в наблюдаемости и контроле состояния, управляемости режимов работы отдельных технических устройств и энергосистемы в целом, информационной прозрачности механизмов конкурентного рынка для всех его субъектов;
- повышение интеллектуальности на всех уровнях систем управления функционированием энергосистемы и рыночными операциями, которая обеспечивает не только «реакцию по фактическому состоянию», но и «реакцию по прогнозу», исходя из оценки вероятных изменений производственных параметров отдельных устройств, технических систем, а также рыночной конъюнктуры.

Таким образом, переход к электроэнергетике нового типа должен гармонизировать все направления модернизации отрасли, естественным образом расширяя границы процесса обычного воспроизводства мощностей, выводя



Рис. 2. Переход к ИЭС – как составная часть процесса обновления электроэнергетики

его за пределы традиционного, экстенсивного сценария развития электроэнергетики, который характеризуется простым количественным увеличением производственного потенциала и его насыщением новыми технологиями. По сути, переход к ИЭС – это реализация интенсивного сценария развития отрасли, который сопровождается изменением функциональности, то есть трансформацией существующих или появлением новых свойств в отдельных структурных сегментах и энергосистеме в целом.

В отличие от прежних подходов к развитию электроэнергетики, переход к интеллектуальной энергосистеме эффективнее начинать снизу вверх, от потребителей и локальных систем энергоснабжения, создавая распределенные кластеры новой энергетики, новой рыночной среды в отрасли. Опыт крупнейших мировых энергосистем показывает успешность таких начинаний в рамках пилотных проектов, укрупняющихся по мере отработки отдельных технологий, их масштабирования и интеграции в комплексные технические решения. Можно выделить четыре уровня пилотных проектов, разработка и реализация которых создаст практическую основу для перехода к ИЭС:

- пилотные проекты 1-го типа касаются отработки отдельных технологий и видов оборудования, осуществляемых на специальных полигонах, стендах в технопарках, вузах, отраслевых и корпоративных инженерных центрах;
- пилотные проекты 2-типа ограничиваются уровнем отдельных энергетических объектов: цифровые (интеллектуальные) подстанции, системы интеллектуального учета энергоресурсов, контроля состояний линий электропередачи, интеграции нетрадиционных источников энергии на основе общей системы управления, комплексы «виртуальных» электростанций, микрогриды «умных» домов, системы интерфейсов различного типа и уровня напряжения и другие. Каждый из таких проектов уже позволяет на уровне отдель-

ного объекта отработать оптимальные комбинации новых энергетических и информационных технологий и алгоритмов управления.

- пилотные проекты 3-го типа нацелены на формирование минимальных фрагментов энергосистемы интеллектуального типа, на которых отрабатываются комплексные решения по интеграции отдельных решений объектного уровня в общую систему: локальные (изолированные) территории, районы электрических сетей, имеющих связи как с общей энергосистемой, так и работающие изолированно. В составе таких пилотных проектов должны присутствовать различные виды генерирующих источников небольшой мощности, сетевая инфраструктура с активными элементами, активные и пассивные потребители, интеллектуальные системы учета, системы управления распределенного типа, локальная торговая площадка;
- пилотные проекты 4-го типа связаны с формированием максимальных фрагментов энергосистемы интеллектуального типа, в которых присутствуют связи горизонтального (интеграция двух и более локальных энергосистем) и вертикального уровня (интеграция локальных систем с сетями высокого напряжения через цифровые (интеллектуальные) подстанции ЕНЭС)⁴. Проекты этого типа направлены на проверку технологической возможности и условий совместной работы традиционной крупной и распределенной генерации, в том числе возможность их конкуренции при условии двухсторонних контрактов с потребителями. На этих проектах отрабатываются элементы конкурентного рынка с взаимодействием различных торговых площадок. При успешной реализации пилотных проектов этого уровня выполняется масштабирование их решений и результатов на уровне объединенных энергосистем.

⁴ Одним из актуальных примеров проектов данного типа являются пилотные проекты цифровых районов электрических сетей (РЭС).

Эффективность перехода к интеллектуальной энергосистеме

Как было отмечено выше, практические мероприятия по переходу к интеллектуальной энергосистеме должны стать составной частью общего процесса технологического обновления электроэнергетики – ее генерирующих и сетевых активов. При этом старое оборудование должно не просто заменяться аналогичным или технически прогрессивным – необходимо обеспечить возможность его встраивания в «энергетический интернет», сделать его активной частью новых систем управления технологическими процессами и экономическими взаимодействиями от локального до национального уровня.

Объем инвестиций, непосредственно связанных с обеспечением этого перехода, оценивается в 20-25% от суммарных отраслевых капиталовложений, оцененных при разработке Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики. В значительной мере эти инвестиции направлены на оснащение существующих энергетических объектов и потребителей (их интеллектуальная модернизация) и концентрируются на оборудовании с адаптивными свойствами,

системах сбора, передачи, обработки, анализа информации, управления на всех уровнях технологического и рыночного контуров энергосистемы.

Капиталоемкость перехода к ИЭС может быть скомпенсирована за счет совокупных эффектов, возникающих в самой электроэнергетике, у потребителей, в смежных отраслях и экономике в целом (рис. 3). Исходя из сопоставления полученных оценок капитальных затрат и эффектов в период до 2035 г. и с учетом последствия инвестиционных решений эффективность перехода к ИЭС в России можно оценить как высокую [6]. Уточненные оценки показывают, что положительный чистый (дисконтированный) результат достигается к 2035 г. даже с учетом только прямых экономических выгод, а соотношение затрат и выгод достигает 4,8-5,4 в абсолютном и 2,6-2,8 – в дисконтированном выражении.

Можно сказать, что переход к интеллектуальной энергосистеме в России привлекателен как с экономической, так и с инновационной точки зрения, поскольку формирует огромный внутренний рынок для новых видов продукции и комплексных услуг, имеющих и значительный



Рис. 3. Общая структура частных и интегральных экономических эффектов, учитываемых при реализации проекта создания ИЭС

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

экспортный потенциал. При этом формирующийся в последнее время курс на цифровизацию энергетики не противоречит направлению построения интеллектуальной энергосистемы, а является лишь эффективным инструментом для ее создания. Однако до сих пор в России, в отличие от других крупнейших экономик мира (и менее крупных стран OECD), отсутствует четкая и оформленная стратегия государства в части системной поддержки такого перехода как приоритетного направления развития электроэнергетики.

В то же время нельзя не отметить, большую роль, которую ИЭС может сыграть в достижении целевой установки Энергетической стратегии России по трансформации отраслей энергетического комплекса, в «современную высокотехнологичную и эффективную инфраструктуру, обеспечивающую как количественный, так и качественный экономический рост» (см. например [7]). По нашему мнению, создание

интеллектуальной энергетической системы России должно стать одним из ключевых механизмов достижения этой цели, поскольку позволяет реализовать как минимум 4 из 6 приоритетов государственной энергетической политики (см. таблицу), в том числе:

- гарантированное обеспечение энергетической безопасности страны и ее регионов;
- повышение эффективности использования потенциала энергетического комплекса;
- минимизацию негативного влияния на окружающую среду, климат и здоровье людей;
- развитие конкуренции, прозрачных механизмов ценообразования.

В заключение отметим, что масштабность (по требуемым капиталовложениям и ожидаемым эффектам) программы интеллектуальной

Интеллектуальная энергосистема как инструмент в реализации приоритетов Энергетической стратегии России

Приоритеты Энергетической стратегии России	Основные эффекты перехода к ИЭС, способствующие реализации приоритетов
Обеспечение энергетической безопасности страны и ее регионов	<ul style="list-style-type: none">• повышение энергообеспеченности регионов с ростом возможностей по использованию местных энергоресурсов на базе распределенных источников, интегрированных в ИЭСР;• повышение надежности функционирования энергосистем за счет адаптивных методов управления, повышения устойчивости оборудования и энергосистемы в целом к внешним воздействиям
Повышение эффективности использования потенциала ТЭК	<ul style="list-style-type: none">• расширение технических и экономических возможностей для развития когенерации как наиболее эффективной технологии преобразования органического топлива;• снижение потерь в тепловых и электрических сетях за счет развития локальных источников энергоснабжения и адаптивного управления спросом и топологией сети
Развитие конкуренции, прозрачных механизмов ценообразования	<ul style="list-style-type: none">• активное вовлечение потребителей в рыночные взаимодействия, повышающее как эластичность спроса, так и уровень конкурентной борьбы в предложении электроэнергии и других услуг
Минимизация негативного влияния на окружающую среду и здоровье	<ul style="list-style-type: none">• сдерживание роста потребления органического топлива для электро- и теплоснабжения в результате ускоренного развития энергоэффективных технологий его преобразования и частичного замещения нетопливными ресурсами

лизации электроэнергетики России и анализ опыта разработки и реализации аналогичных программ и стратегий в крупнейших энергосистемах мира показывают необходимость серьезного реформирования системы управления развитием в электроэнергетике с усилением централизованной роли государства как

пилотного инвестора, обеспечивающего через экономические механизмы координацию инновационной деятельности во всей отрасли, исходя из условий максимизации общественной эффективности инвестиций в новый тип систем энергоснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. – 2009. – № 4. – С. 28-34.

2. Иванов Т.В., Конев А.В. Интеллектуальная энергетическая система России // Энергоэксперт, – 2010. – № 6. – С. 26-27.

3. Кобец Б.Б., Волкова Т.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: Энергия, 2010. – 208 с.

4. Иванов Т.В., Иванов С.Н., Логинов Е.Л., Наумов Э.Б. Интеллектуальная электроэнергетика: стратегический тренд международной конкурентоспособности России в XXI веке. – М.: Спутник+, 2012. – 304 с.

5. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / под ред. Е.В. Фортובה, А.А. Макарова. М.: ФСК ЕЭС. 2012. – 235 с.

6. Веселов Ф.В., Федосова А.В. Экономическая оценка эффектов развития интеллектуальной энергетики в Единой электроэнергетической системе России. // Известия РАН. Энергетика, 2014. – № 2. – С. 50-60.

7. Бушуев В.В., Кучеров Ю.Н. Инновационное развитие электроэнергетики России // Электро. Электротехника, Электроэнергетика, Электротехническая промышленность, 2016. – № 4. – С. 2-5.

REFERENCES

1. Dorofeev V.V., Makarov A.A. Active-adaptive network – a new quality of the UPS of Russia // *Energoekspert*. – 2009. – No. 4. – P. 28-34 (in Russian).

2. Ivanov T.V., Konev A.V. Intellectual Energy System of Russia // *Energoexpert*, 2010. – No. 6. – P. 26-27 (in Russian).

3. Kobets B.B., Volkova T.O.. Innovative development of electric power industry based on the concept of Smart Grid. – Moscow: *Energia*, 2010. – 208 p. (in Russian).

4. Ivanov T.V., Ivanov S.N., Loginov E.L., Naumov E.B. Intellectual electric power industry: a strategic trend of Russia's international competitiveness in the 21st century. – М.: *Sputnik +*, 2012. - 304 p. (in Russian).

5. The concept of an intelligent electric power system in Russia with an actively-adaptive network, Ed. E.V. Fortov, A.A. Makarov. Moscow: FGC UES. 2012. – 235 p. (in Russian).

6. Veselov F.V., Fedosova A.V. Economic evaluation of the effects of the development of intellectual energy in the Unified Electric Power System of Russia // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2014. – No. 2. – P. 50-60 (in Russian).

7. Bushuev V.V., Kucherov Yu.N. Innovative development of Russia's electric power industry // *Elektro. Electrical Engineering, Electrical industry*. 2016. – No. 4. – P. 2-5 (in Russian).

Поступила в редакцию
27.08.2018 г.