



ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

5
ВЫПУСК
2018

— МОСКВА —

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Данный выпуск журнала «Энергетическая политика» посвящен актуальным вопросам внедрения передовых цифровых технологий в российском топливно-энергетическом комплексе. Выбор тематики номера неслучаен. Указ Президента России от 7 мая 2018 года № 204 определяет в качестве одной из задач, связанных с входждением России в число пяти крупнейших экономик мира, – «обеспечение ускоренного внедрения цифровых технологий в экономике и социальной сфере».

Сегодня многие страны вступили в эпоху цифровой трансформации. И шансы на лидерство, и риски отставания здесь могут оказаться весьма серьезными. Поэтому цифровизацию следует понимать не как отдельную кампанию или совокупность технологий, а как алгоритм развития отношений в мировой экономике, в том числе энергетике, и современном обществе.

Публикуемые в этом выпуске статьи свидетельствуют о том, что цифровизация отраслей российского ТЭК уже началась и набирает темпы. Особое внимание уделено проблемам цифровизации электроэнергетики, взаимоотношениям потребителя и поставщика, повышению надежности интеллектуальных систем, расширению сферы новых и энергоинформационных продуктов и услуг. Редакция журнала рассчитывает, что опубликованные материалы, несомненно, привлекут внимание заинтересованных читателей.

DEAR READERS!

This issue of the «Energy Policy» journal focuses on the urgent problems of advanced digital technologies introduced in the Russian fuel and energy complex. It is no coincidence that such a subject was chosen for this issue. Russian Federation Presidential Decree No. 204 dated May 7, 2018 defines «ensuring the accelerated introduction of digital technologies in economic and social sectors» as one of the tasks associated with Russia's entry into the world's top five economies.

Nowadays many countries have entered the era of digital transformation. Both the chances of leadership and the risks of lagging behind can be very serious here. Therefore, digitalization should be understood not as a separate campaign or a set of technologies, but as an algorithm for the development of relations in the world economy including the power industry and modern society.

The articles published in this issue provide evidence that digitalization has already begun and is gaining momentum in the Russian fuel and energy complex. Particular attention is paid to the problems of electric power industry digitalization, relationship between the consumer and the supplier, improving intelligent system reliability, and expanding the scope of new and energy information products and services. Journal staff expects that the published materials will undoubtedly attract the attention of interested readers.



ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

Выпуск **5** 2018

Издается с 1995 года

Редакционная коллегия:

В.В. Бушуев – д.т.н., профессор, генеральный директор ИЭС, главный редактор

Н.И. Воронай – д.т.н. чл.-корр. РАН, научный руководитель ИСЭМ СО РАН, зам. главного редактора

А.М. Мастепанов – д.э.н., профессор, зам. директора ИЭС, зам. главного редактора

В.В. Первухин – отв. секретарь, к.и.н., ИЭС

А.И. Громов – к.г.н., Фонд «Институт энергетики и финансов», директор по энергетическому направлению

А.Н. Дмитриевский – д.г.-м.н., академик РАН, научный руководитель ИПНГ РАН

В.А. Крюков – д.э.н., чл.-корр. РАН, директор ИЭОПП СО РАН

В.С. Кwon (Won Soon Kwon) – профессор, Университет международных исследований Ханкук, Р. Корея

А.А. Макаров – д.э.н., академик РАН, советник РАН

О.С. Попель – д.т.н., зам. директора ОИВТ РАН

А.А. Михалевич – д.т.н., академик НАН Беларуси, научный руководитель Института энергетики

С.М. Сендеров – д.т.н., зам. директора ИСЭМ СО РАН

Ю.А. Станкевич – зам. председателя Комитета РСПП по энергетической политике и энергоэффективности

Е.А. Телегина – д.э.н., чл.-корр. РАН, декан факультета международного энергетического бизнеса РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина

Ю.К. Шафраник – д.э.н., председатель Совета директоров ЗАО «МНК «СоюзНефтеГаз»

А.Б. Яновский – д.э.н., зам. министра энергетики РФ

Учредители журнала «Энергетическая политика»: ЗАО «Глобализация и Устойчивое развитие», Институт энергетической стратегии, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН
Издатель журнала ИЦ «Энергия».

Адрес редакции: 125009, Москва, Дегтярный пер., 9, оф. 011
Телефон ред.: (495) 229-42-41 (доб. 230)
E-mail: ies2@umail.ru; krilosov@guies.ru
Web-site: <http://www.energystrategy.ru>

Выходит 6 раз в год
Ведущий редактор **С.И. Крылосов**

Компьютерная верстка **В.М. Щербаков**
Отпечатано в типографии Onebook

Подписано в печать 12.10.2018

Формат 60x84/8

Бумага офсетная. Печать офсетная

Усл. печ. л. 13,95. Уч. изд. л. 14,3

Тираж 500 экз.

Заказ № 29 (67/02-99) ИЭС № 377

© ЗАО «Глобализация и Устойчивое развитие», Институт энергетической стратегии», 2018
Журнал «Энергетическая политика» входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК.
При перепечатке материалов ссылка на издание обязательна.



ПОБЕДИТЕЛЬ VII ВСЕРОССИЙСКОГО
ЖУРНАЛИСТСКОГО КОНКУРСА
«ЛУЧШАЯ ПУБЛИКАЦИЯ
ПО ПРОБЛЕМАМ ТЭК РОССИИ 2001 года»

СОДЕРЖАНИЕ
CONTENTS

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

DIGITAL ENERGY

А.Л. Текслер. Цифровизация энергетики: от автоматизации процессов к цифровой трансформации отрасли.....3

A.L. Teksler. Power industry digitalization: from process automation to the digital transformation of the industry

Д.В. Холкин, И.С. Чаусов. Цифровой переход в энергетике России: в поисках смысла.....7

D.V. Holkin, I.S. Chausov. Digital transition in Russian power engineering: in search of meaning

А.Г. Старченко, В.В. Дзюбенко, И.Ю. Ряпин. Интернет энергии: будущее электроэнергетики уже наступило.....17

A.G. Starchenko, V.V. Dzubenko, I.Yu. Ryapin. Internet of energy: the future of power industry has already come

Е.П. Грабчак, Е.А. Медведева, И.Г. Васильева. Как сделать цифровизацию успешной.....25

E.P. Grabchak, E.A. Medvedeva, I.G. Vasilyeva. How to make digitalization successful

Л.В. Массель. Методы и интеллектуальные технологии научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики.....30

L.V. Massel. Methods and intelligent technologies for scientific substantiation of strategic solutions on digital transformation of energy industry

- Ф.В. Веселов, В.В. Дорофеев.** Интеллектуальная энерго-система России как новый этап развития электроэнергетики в условиях цифровой экономики.....43
- F.V. Veselov, V.V. Dorofeev.* Smart Grid of Russia as a new stage of power engineering development under conditions of digital economy
- Н.И. Воронай, И.Н. Колосок, Е.С. Коркина, А.Б. Осак.** Проблемы уязвимости и живучести киберфизических электроэнергетических систем.....53
- N.I. Voronai, I.N. Kolosok, E.S. Korkina, A.B. Osak.* Проблемы уязвимости и живучести киберфизических электроэнергетических систем
- А.Г. Массель, Д.А. Гаськова.** Методы и подходы к обеспечению кибербезопасности объектов цифровой энергетики.....62
- A.G. Massel, D.A. Gaskova.* Methods and approaches to cybersecurity ensuring for enterprises of digital energy industry
- Ю.Н. Кучеров, А.В. Иванов, Д.А. Корев, Н.А. Уткин, А.З. Жук.** Развитие технологий активного потребителя и их интеграция в электрическую сеть общего пользования...73
- Yu.N. Kuchеров, A.V. Ivanov, D.A. Korev, N.A. Utkin, A.Z. Zhuk.* Development of active consumer technologies and their integration to the public electric network
- А.В. Путилов, В.Н. Червяков, И.Н. Матицин.** Цифровые технологии прогнозирования и планирования развития атомной энергетики.....87
- A.V. Putilov, V.N. Chervyakov, I.N. Maticin.* Digital technologies for forecasting and planning the development of atomic energy
- А.С. Гуменный, Л.В. Масленникова.** Использование нераспределенных энерго мощностей с помощью блокчейн-технологии.....99
- A.S. Gumenny, L.V. Maslennikova.* Using undistributed power capacities with the help of blockchain technology

УДК 004.9+620.9

А.Л. Текслер¹

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ: ОТ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ К ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ОТРАСЛИ

Аннотация. Сегодня уже не вызывает сомнения, что цифровизация мировой экономики – не перспектива отдаленного будущего, а реальность – здесь и сейчас. Развитие и распространение цифровых и интеллектуальных технологий, их сквозное проникновение во все сферы экономики и жизни общества неуклонно набирает обороты, меняя привычные бизнес-модели, структуры традиционных отраслей и очертания мировых рынков. Происходящие перемены настолько масштабны, что можно смело говорить об очередной технологической революции, в которой цифровизация практически становится синонимом конкурентоспособности.

Ключевые слова: энергетика, ТЭК, цифровизация, интеллектуальные технологии, цифровая трансформация, распределенная генерация.

A.L. Teksler²

POWER INDUSTRY DIGITALIZATION: FROM PROCESS AUTOMATION TO THE DIGITAL TRANSFORMATION OF THE INDUSTRY

Abstract. There is no doubt today that world economy digitalization is not a prospect of a distant future, but a reality – here and now. The development and spread of digital and intelligent technologies, their cross-cutting penetration into all spheres of economy and society are steadily gaining momentum while changing usual business models, structures of traditional industries and shapes of world markets. The changes that take place are so large that it is safe to say about another technological revolution where digitalization is almost synonymous with competitiveness.

Keywords: power industry, Fuel and Energy Complex, digitalization, intelligent technologies, digital transformation, distributed generation.

В ближайшие годы цифровые решения полностью перевернут наш привычный мир. Компании и страны, которые вовремя осознают неизбежность грядущих изменений и смогут воспользоваться их возможностями, станут ценными поставщиками инновационных решений и получат несравнимое преимущество перед другими игроками, в том числе на международном уровне. Причем это касается не только таких традиционно чувствительных к цифровым изменениям секторов как медиа и телекоммуникации, ритейл и финансы, но и, в том числе, энергетики.

Уже сегодня растут вложения со стороны компаний топливно-энергетического комплекса в такие технологии, как роботизация, интернет вещей, Big Data, искусственный интеллект и блокчейн. При этом темпы распространения

прорывных технологий свидетельствуют о том, что некоторые из них выйдут на пик коммерческого внедрения гораздо раньше, чем предполагалось ранее.

Так, например, быстрыми темпами растет глобальный рынок технологий распределенных энергоресурсов: генерация малых мощностей, управление спросом, накопители, энергоэффективность и др. Уже сейчас ежегодный объем ввода распределенной генерирующей мощности в мире сопоставим с вводом централизованной генерации, а к 2025 г., по оценкам отдельных экспертов, может превысить его втрое!

Действующие на объектах ТЭК интеллектуальные технологии уже показывают успешные результаты. Они повышают точность геологоразведки и бурения скважин, сокращают количество ошибок при проектировании и эксплу-

¹ Алексей Леонидович Текслер – первый заместитель министра энергетики Российской Федерации, e-mail: minenergo@minenergo.gov.ru

² Aleksey L. Teksler – First Deputy Minister of Energy of the Russian Federation, e-mail: minenergo@minenergo.gov.ru

атации отдельных промышленных элементов, заранее предупреждают о возможном выходе оборудования из строя, а также определяют время его предупредительного ремонта и техобслуживания.

С масштабированием и тиражированием цифровых решений для отраслей мирового ТЭК откроются еще большие возможности и экономические выгоды.

В нефтегазовой отрасли цифровые технологии смогут эффективнее выполнять мониторинг и оптимизацию нефтегазовых активов и производственных мощностей по всей цепочке создания стоимости: от скважины до автозаправочной станции. В секторе добычи это позволит увеличить совокупный объем извлекаемых запасов, прежде всего нетрадиционной нефти и газа, и снизить затраты на их освоение.

В угольной отрасли широкое внедрение новых цифровых решений позволит предупреждать наступление сбоев и аварий на производственных объектах, снизит травмоопасность и в целом оптимизирует производственный процесс от добычи до поставки угля потребителю.

Наибольшее влияние цифровизация окажет на электроэнергетику. Новые цифровые технологии не только повысят стабильность работы энергосистем, но и создадут возможности для развития распределенной генерации в масштабе от одной станции до целой сети с сотнями объектов, в том числе и на основе возобновляемых источников энергии, – тем самым сформировав экосистему интернета энергии. Кроме того, по оценкам экспертов, повсеместное внедрение новых методов мониторинга и прогностики состояния генерирующего и сетевого оборудования в разы снизит аварийность, а также ежегодные потери электроэнергии, что даст в мировом масштабе до 500-700 ТВт·ч сэкономленной электроэнергии в год.

Перспективы, открываемые цифровой трансформацией, – колоссальны! По большому счету они ключ к рынкам будущего! Россия – активный игрок и лидер на глобальной арене экспорта энергоресурсов, обязана воспользоваться новыми возможностями – сформировать собственную технологическую базу в сфере цифровизации – чтобы и впредь сохранять и нара-

щивать свое преимущество на существующих и появляющихся рынках.

Российские компании ТЭК уже включились в технологическую гонку. В нефтегазовом секторе действует несколько десятков «умных» скважин и месторождений, делаются шаги в использовании алгоритмов машинного обучения при обработке данных, внедряются цифровые двойники. В угольной отрасли применяют датчики и портативные устройства, помогающие отслеживать состояние и местонахождение рабочих и техники, определять уровень загазованности шахт, поддерживать оптимальные технологические параметры на обогатительных фабриках. В сфере электроэнергетики внедряются системы виртуального мониторинга и прогностики состояния генерирующего оборудования, цифровой диспетчеризации энергетических объектов, позволяющие наиболее полно использовать высокоэффективную генерацию. В различных городах и регионах строятся и вводятся в эксплуатацию цифровые подстанции, «умные» сети охватывают целые районы. Внедряются в эксплуатацию системы дистанционного управления оборудованием на магистральных линиях электропередачи. Планируется, что до конца года соответствующие решения должны быть реализованы почти на двух десятках подстанций, а к 2021 г. – охватить почти 100 энергообъектов.

Дальнейшее распространение и развитие этих решений в ТЭК сможет не только обеспечить повышение надежности работы энергосистем, снижение издержек производственных процессов, но и даст импульс для масштабных инновационных технологических прорывов в смежных отраслях, станет дополнительным драйвером для развития всей российской экономики. В этой связи важно не просто внедрять уже готовые зарубежные решения, но и развивать собственные высокотехнологичные продукты, самим формировать новые тренды индустриальной революции.

Однако вместе с очевидными преимуществами цифровизация несет новые вызовы и риски. Прежде всего, самое очевидное – появляются новые киберугрозы. С развитием и массовым внедрением интеллектуальных технологий к

Интернету подключаются новые устройства, как в промышленности, так и на стороне конечного потребителя. Раньше эти устройства работали «офлайн», к ним невозможно было подключиться и «взломать» удаленно. Из-за этого вопросам их защищенности уделялось не так много внимания, как требуется теперь. Сегодня, например, говорят о том, что если все холодильники согласованно будут распределять время своего включения и работы, то мы сможем существенно снизить пиковые нагрузки на сеть. Но, что если кто-то их «взломает», и они все одновременно включатся? Мы можем получить серьезный распределенный блэкаут. Поэтому технологии защиты от взлома интернета вещей – безусловный приоритет.

Еще один вызов – усложнение самих энергосистем, и как следствие – надежного управления ими. По мере внедрения компаниями различных аппаратных компонентов и программного обеспечения возникают риски появления неинтегрируемых друг с другом технологий. С развитием распределенной генерации, появлением все большего количества энергоактивных потребителей – в промышленности и на уровне домохозяйств – изменяются привычные профили нагрузок, усложняются модели для прогнозирования энергопотребления. Кроме того, снижение потребления энергии из централизованной энергосистемы приводит к росту удельных постоянных издержек на киловатт-час электроэнергии по всей цепочке централизованной генерации и сетей. Одновременно с этим блокчейн и распределенные реестры могут радикально изменить системы взаиморасчетов и уменьшить число сбытовых посредников во всех отраслях ТЭК, что снизит издержки для конечного потребителя.

Цифровизация неизбежно приведет к реформатированию рынка труда. За счет автоматизации производства может высвободиться значительное число специалистов трудоспособного возраста в сфере традиционной для ТЭК занятости, но вместе с тем вырастет спрос на специалистов, занятых в его высокотехнологичных секторах. Это открывает новые возможности для российской системы подготовки кадров для отрасли, которой также предстоит адаптироваться к происходящим трансформациям.

Даже если резюмировать только эти самые основные вызовы, то уже можно увидеть, что цифровая трансформация в итоге приведет к изменению привычных бизнес-моделей, по сути, изменит весь ландшафт топливно-энергетической отрасли и рынков топливно-энергетических ресурсов. Именно в этом заключается основное отличие цифровой трансформации от обычной цифровизации уже существующих технологических и бизнес-процессов.

Для того чтобы нивелировать риски, как перечисленные выше, так и другие, обернуть их в свою пользу, максимально воспользоваться потенциалом цифровой трансформации уже сегодня необходимо сформировать единый понятийный аппарат и системное видение цифровизации, общее для всех участников отрасли.

Только исходя из такого видения государство сможет обеспечить баланс, с одной стороны, понятного и гибкого регулирования, в том числе в части требований к безопасности и обеспечению надежности работы объектов ТЭК, а с другой – сохранения простора для технических экспериментов, необходимых для успешного технологического развития компаний, и стимулов для привлечения инвестиций.

Кроме того, единый взгляд на приоритеты цифровой трансформации на уровне ТЭК позволит создать на основе общих для всех стандартов доверенную цифровую среду. Она соединит в себе различные цифровые решения, обеспечит максимизацию всех преимуществ цифровизации не только на уровне отдельных энергообъектов, но и целых энергосистем, а также ускорит выход на экспорт высокотехнологичных российских решений.

Решение этих задач предполагается в рамках проекта «Цифровая энергетика». В настоящее время он формируется Минэнерго России с учетом приоритетов обозначенных Президентом РФ и положений утвержденной в прошлом году национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». В рамках проекта предусматривается, в том числе, определение общих требований к цифровизации, разработка стандартов для ключевых используемых технологий и создание единого цифрового пространства, в котором смогут развиваться различные платформенные решения.

На сегодняшний день в российском ТЭК уже заложен фундамент для цифровых преобразований. С 2014 г. Минэнерго России реализуется дорожная карта по внедрению инновационных технологий и современных материалов в отраслях ТЭК. В ее рамках впервые со времен СССР для определения перспективных областей научных исследований и разработок технологий был утвержден Прогноз научно-технологического развития отраслей ТЭК России на период до 2035 года, а также ведется активная поддержка инновационных проектов, находящихся в высокой степени технологической зрелости и способных оказать значительный экономический эффект. Всего на текущий момент реализуется два десятка таких проектов и, что важно, внутри них создаются партнерства между компаниями ТЭК и отечественными технологическими разработчиками.

Для развития сервисов интеллектуальной энергетики и повышения их экспортного потенциала с 2016 г. Минэнерго России ведется работа по отраслевому направлению Национальной технологической инициативы «Энерджинет». Для упрощения взаимодействия государства и инновационного бизнеса в апреле этого года Правительством РФ утвержден план мероприятий по совершенствованию законодательства и устранению административных барьеров. Его реализация позволит субъектам электроэнергетики выйти на рынок в принципиально новых видах предпринимательской деятель-

ности с инновационными бизнес-моделями. Например, владельцы систем хранения электроэнергии должны получить возможность участвовать в купле-продаже электрической энергии и мощности.

Внесены изменения в Федеральный закон «Об электроэнергетике» и ряд подзаконных актов по вопросам надежности и безопасности энергетических объектов, благодаря чему в отрасли начали внедряться новые риск-ориентированные методы управления. Разработан и уже внесен в Государственную Думу Федерального Собрания РФ законопроект, направленный на развитие интеллектуальных систем учета электрической энергии. Проект аналогичного закона прорабатывается в отношении потребителей газа.

Вместе с тем мы понимаем, что проделанная работа – это только первые шаги в направлении цифровизации. Сегодня перед нами стоит задача правильно воспользоваться созданным заделом: не сбавлять заданного темпа и, опираясь на заложенный фундамент, двигаться дальше.

В рамках реализации проекта «Цифровая энергетика» нам предстоит, объединив усилия всех заинтересованных сторон, систематизировать уже полученный опыт, найти совместные точки соприкосновения финансового и интеллектуального потенциала с тем, чтобы всем вместе сформулировать целевое видение цифровизации и совместно выиграть в глобальной технологической гонке.

Поступила в редакцию
09.10.2018 г.

УДК 004:620.9

Д.В. Холкин, И.С. Чаусов¹

ЦИФРОВОЙ ПЕРЕХОД В ЭНЕРГЕТИКЕ РОССИИ: В ПОИСКАХ СМЫСЛА

Аннотация. В работе дана трактовка терминов «цифровая энергетика», «цифровизация», определяющая уникальное содержание стоящих за ними процессов. Представлено концептуальное видение развития электроэнергетики на принципах Internet of Energy и сценарное развитие электроэнергетики на новой цифровой технологической платформе.

Ключевые слова: энергетический переход, цифровая энергетика, транзакция, интернет энергии, интернет распределенной энергетики, интернет вещей, IoT, декарбонизация, цифровизация.

D.V. Holkin, I.S. Chausov²

DIGITAL TRANSITION IN RUSSIAN POWER ENGINEERING: IN SEARCH OF MEANING

Abstract. The paper provides definitions for the terms «digital power engineering» and «digitalization» determining the unique contents of the processes they indicate. The conceptual vision of electric power engineering development under conditions of Internet of Energy and the scenarios of electric power engineering development on a new digital technological platform are presented.

Keywords: energy transition, digital power engineering, Internet of Energy, Internet of Distributed Generation, transaction, Internet of Things, IoT, Neural Grid, decarbonization, digitalization.

Введение

В 2017 г. в России стала активно формироваться и реализовываться политика перехода к цифровой экономике. Была разработана и утверждена Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», началось формирование отраслевых программ цифрового перехода, в том числе в сфере энергетики.

07 мая 2018 г. Президентом РФ В.В. Путиным был подписан Указ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». В Указе предельно концентрированно определены приоритеты по цифровому преобразованию экономики страны, включая конкретно и отрасли энергетики.

В экспертно-аналитическом докладе «Цифровой переход в электроэнергетике России», подготовленном Центром стратегических разработок при участии экспертов направления «Энерджинет» Национальной технологической инициативы, были проанализированы вызовы и перспективы технологического развития российской электроэнергетики и сформированы предложения по повышению ее конкурентоспособности. В частности, в докладе сделаны выводы о том, что существующий технологический уклад в электроэнергетике достиг предела своей эффективности и в перспективе пяти лет в ряде сфер, где потребители предъявляют более высокие требования к надежности, качеству, доступности, экологичности энергоснабжения, будет иметь меньшую конкурентоспособность

¹ Дмитрий Владимирович Холкин – директор Центра развития цифровой энергетики Фонда «ЦСР Северо-Запад», заместитель руководителя рабочей группы «Энерджинет», e-mail: dvh2000g@gmail.com;

Игорь Сергеевич Чаусов – ведущий аналитик Центра развития цифровой энергетики Фонда «ЦСР Северо-Запад», ведущий инженер лаборатории водородной энергетики Института арктических технологий МФТИ.

² Dmitry V. Holkin – Director of the Power Engineering Development Centre of CSR «North-West» Foundation, Deputy Head of the «EnergyNet» working group, e-mail: dvh2000g@gmail.com;

Igor S. Chausov – Lead Analyst of the Power Engineering Development Centre of CSR «North-West» Foundation, Lead Engineer of the Hydrogen Energy Laboratory of the Faculty of Arctic Technologies of MIPT.

по сравнению с решениями новой, цифровой энергетики [1]. Основные изменения затронут «последнюю милю» электроэнергетики, базирующуюся на инфраструктуре распределительных сетей 110 кВ и ниже. Структурные и технологические особенности построения энергосистем будут напоминать интернет, поэтому новый подход часто называют Интернет энергии (Internet of Energy). Таким образом, в энергетической политике России предлагается осуществить маневр по развитию розничного сегмента электроэнергетики на принципах интернета энергии.

В статье изложены результаты исследований и разработок, осуществляемых в развитие положений указанного доклада Центром развития цифровой энергетики в рамках направления «Энерджинет» Национальной технологической инициативы.

Постановка проблемы

Процессы трансформации энергетики, которым многие аналитики склонны приписывать революционный характер, многогранны. И часто, как мудрецы, изучающие с разных сторон слона, эксперты видят только отдельные аспекты новой энергетики, выдавая их за целое. Например, сторонники борьбы с изменением климата уделяют основное внимание масштабному развитию ВИЭ, а апологеты цифровизации предпочитают видеть только процессы перехода к цифровым двойникам и системам интеллектуального управления.

Наиболее целостное представление о трансформации энергетики дается в концепции «3D» (Decarbonization, Decentralization, Digitalization). Decarbonization (декарбонизация) – переход к экологически чистой «безуглеродной» экономике и энергетике, проявляющийся в увеличении доли ВИЭ в энергетическом балансе, электрического транспорта и отказе от ископаемых топлив. Decentralization (децентрализация) – переход к территориально распределенной электроэнергетике с большим числом разноуровневых генераторов и потребителей, выражающийся в росте доли присоединенной к распределительным сетям, относительно мало-мощной и разнообразной по своему характеру генерации; появлении просьюмеров – нового

типа субъектов электроэнергетики, которые являются одновременно и производителями и потребителями электроэнергии; появлении активных потребителей, обладающих возможностью гибко, в том числе по удаленным командам, изменять профиль своего потребления из сети. Digitalization (дигитализация) – переход к повсеместному применению в электроэнергетике цифровых управляемых устройств, подключенных к информационным сетям Интернета, на всех уровнях энергосистемы от устройств генераторов и электрических сетей до конечных, в том числе бытовых, потребителей электроэнергии, что обеспечивает возможность реализации интеллектуального управления энергосистемами, основанного на межмашинном (M2M, IoT) взаимодействии.

Концепция «3D» представляет собой целостную конструкцию, она указывает на причину системных трансформаций в энергетике – Decarbonization, принцип изменения архитектуры энергетических систем – Decentralization, а также на ключевой инструмент для эффективной трансформации – Digitalization. Дело в том, что масштабный переход к экологически чистой «безуглеродной» энергетике приводит к снижению ее системной эффективности, генераторы со стохастической выработкой, использующие энергию Солнца и ветра, требуют создания резервных генерирующих и/или накопительных мощностей. В качестве базового решения проблемы растущей неэффективности энергетики видится переход к децентрализованной организации мощностей, управления и энергетических рынков, обеспечивающей эффективное сочетание крупной и малой распределенной энергетики, лучшее удовлетворение дифференцированных и динамически изменяющихся требований потребителей. Но у совместной работы огромного множества распределенных субъектов в условиях децентрализации архитектуры есть одна принципиальная проблема – растущая с числом участников взаимодействия сложность управления. Цифровизация является технологической базой, позволяющей снять эту проблему.

Нам представляется, что для цифровизации энергетики контекст «3D» является главным. Именно исходя из этого необходимо ответить на вопросы о предметном содержании цифро-

вой энергетики, новых архитектурных подходах к ней и ее формах развития, значении и смысле цифрового перехода в энергетике России.

Предметное содержание цифрового перехода

В названиях «цифровая энергетика», как, впрочем, и «цифровая экономика», указывается на инструментальную основу процессов трансформации экономики, рынков, отраслей, но не на ее суть. Это оказывает новой парадигме медвежью услугу. Термин часто рассматривают как модное обозначение того, что и так делалось в отрасли с момента массового прихода компьютерной техники, а цифровизацию считают синонимом автоматизации.

Но в терминах «цифровая энергетика», «цифровизация» есть свое уникальное сутевое наполнение. Во-первых, эти термины появились в контексте формирования цифровой экономики, и имеет смысл рассматривать их только в такой связке. Из множества определений цифровой экономики следует, что особым ее предметом является экономическая деятельность, коммерческие трансакции и профессиональные взаимодействия, построенные на новых принципах за счет использования информационно-коммуникационных технологий. Следовательно, сутью и цифровой энергетики является изменение и развитие совокупности производственных, экономических отношений в отрасли на основе цифровых подходов и средств.

Во-вторых, основной задачей цифровой энергетики целесообразно считать снижение растущих издержек интеграции распределенной энергетики и рыночных трансакций [2]. Сутью современной эпохи является вытеснение машинами неэффективных, требующих рутинного участия людей, трансакций из экономической и общественной жизни. Появление цифровой платформы в любой индустрии (Uber, Airbnb, Amazon, CAINIAO, SmartCAT, и т.д.) приводит к существенному сокращению трансакционных издержек и ускорению операционных циклов ее участников. Энергетика – не исключение. Например, концепция Transactive Energy, разрабатываемая NIST (США), прямо указывает на трансакции в энергетике как основной предмет новых технологий и практик [3].

В-третьих, необходимо исходить из того, что цифровизация в энергетике – это, прежде всего, создание новых бизнес-моделей, сервисов и рынков с опорой на возможности цифровой экономики. Простой пример из другой отрасли – создание автоматизированной системы диспетчерского управления таксопарком – это автоматизация, а вот Uber, который предоставляет новую бизнес-модель той же услуги, вообще не являясь таксопарком и не владея ни единой машиной, но делая это дешевле и удобнее – это цифровизация. Аналогично в цифровой энергетике важно определить новую бизнес-модель, потенциал которой открывается за счет пронизывающих коммуникаций, межмашинных взаимодействий, цифрового моделирования. В мире наработано уже немало таких бизнес-моделей: агрегаторы спроса, виртуальные электростанции, виртуальное распределенное накопление энергии, энергетическое хеджирование и пр.

В-четвертых, характерным признаком цифровой экономики и энергетики является их киберфизический характер. Он становится возможен, когда «умные» машины начинают формировать и использовать цифровые модели физического мира. Именно это обеспечивает самостоятельность принятия машинами решений в режиме, близком к реальному времени. Иногда кажется, что для новых бизнес-моделей цифровой энергетики достаточно появления средств информирования человека, который все же будет сам принимать решения. Но экспериментальные проекты показали, что люди через некоторое время перестают интересоваться новыми моделями поведения, предъявляющими к ним слишком высокие требования участия. Нужно, чтобы инициативу перехватили киберфизические системы, способные самостоятельно принимать оперативные решения без участия человека. Для этого машины должны руководствоваться не стандартами и жесткими алгоритмами, а целями, заданными людьми, и цифровыми моделями фрагментов реального мира.

Пятым по очереди, но не последним по значимости признаком цифровой экономики и энергетики является освобождение человека от машинных функций, появление новых более креативных форм занятости. Еще в дискуссиях 60-х годов прошлого века обсуждалось, что смысл

кибернетического (цифрового) перехода не в том, чтобы сотворить машину, которая была бы умнее, сильнее и совершенней человека, а в том, чтобы самого живого человека снова сделать умнее и сильнее всего того созданного им мира машин, который вышел из-под его контроля и поработил его. Задача в том, чтобы превратить человека из сырья и средства технического прогресса, из детали производства ради производства в высшую цель этого производства, в самоцель. А это означает, что проект в сфере цифровой энергетики – это всегда появление нового подлинно человеческого труда с большой долей научного, технического, художественного, социального творчества.

Часто цифровой переход называют новой технологической революцией. Но было бы странно революцией называть явления и процессы, давно ставшие обыденностью. Автоматизация производственно-технологических и управленческих процессов является величайшим достижением второй половины XX века. АСУТП электростанций, системы диспетчерского управления, автоматика активных энергетических устройств, системы автоматизации бухучета и делопроизводства – все это важные и актуальные направления эволюции отрасли. Но это не новая технологическая революция, не цифровая экономика, не цифровая энергетика. В изменении на новых основаниях способов организации экономических отношений, приводящем к эффективному вовлечению в оборот миллионов новых субъектов и стоящих за ними «умных» машин, должен состоять новый качественный скачок. Цифровизации в первую очередь будут подлежать не технические системы и внутренние бизнес-процессы, а отношения между людьми, компаниями и общественными институтами.

Архитектура цифровой энергетики

Парадигма, описывающая цифровой переход в энергетике, носит название интернет энергии. Под разными именами (Internet of Energy, Transactive Energy, Energy Cloud, FREEDM Systems) эта парадигма разрабатывается, тестируется и проходит апробацию в разных странах мира. Она является основой для формирова-

ния архитектурно-технологического видения в направлении «Энерджинет» Национальной технологической инициативы и выступает основой для ведущейся в настоящее время разработки IDEA (Internet of Distributed Energy Architecture).

Цели построения архитектуры интернета энергии. Традиционная централизованная архитектура электроэнергетики в значительной степени исчерпала свой потенциал эффективности и в условиях новых вызовов, стоящих перед энергетикой, не может считаться более эффективной и оптимальной. Такими вызовами являются:

- изменение характера спроса потребителей, рост разнообразия их требований и переход к «цифровому» спросу;
- падение эффективности энергетики, низкая загрузка сетевых и генерирующих мощностей и рост издержек в энергосистемах;
- энергетический переход («3D»): быстрое распространение ВИЭ, распределенной энергетики, новых бизнес-моделей и сервисов, базирующихся на использовании цифровых технологий;
- освоение незаселенных и инфраструктурно неразвитых территорий, потребность в эффективном энергоснабжении удаленных и изолированных территорий.

Реализованная в существующих энергосистемах стран мира централизованная архитектура с односторонними потоками электроэнергии от крупной генерации к распределенным потребителям, единым иерархичным рынком электроэнергии и диспетчерским управлением, унифицированными до уровня стандартов ролями в энергосистеме и уровнями качества электроснабжения не способна эффективно ответить на указанные вызовы.

Удовлетворить указанным требованиям сможет только распределенная электроэнергетика с децентрализованным управлением и рынками, а также широким вовлечением всех пользователей энергосистем в процесс управления ими. Малая генерация, системы накопления энергии, регулируемая нагрузка конечных потребителей, интегрированные между собой и с централи-

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

зованной энергосистемой, представляют собой неиспользованный до сих пор ресурс для повышения эффективности энергосистем. Распределенная энергетика повышает эффективность энергосистемы за счет снижения потребности в присоединенной мощности, появления локальных самобалансирующихся объединений генераторов и потребителей малой мощности, вовлечения энергетических активов конечных пользователей в процессы управления энергосистемой, придающей ей гибкость.

Но в существующей архитектуре масштабное развитие распределенной энергетике сталкивается с ростом издержек разного типа:

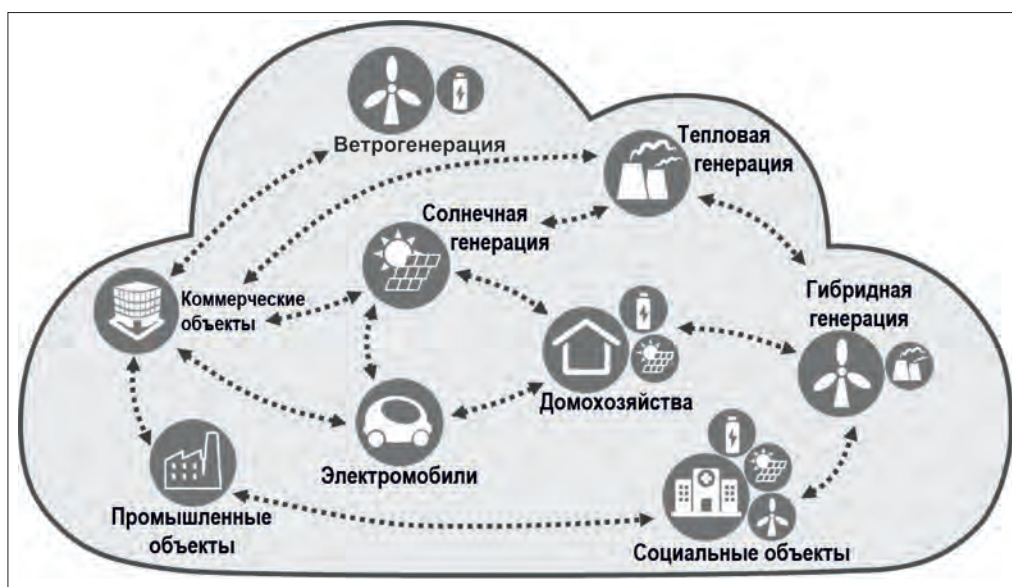
- транзакционные издержки коммерческого взаимодействия, растущие при росте числа участников транзакций;
- капитальные затраты на информационную интеграцию оборудования в контуры управления;
- капитальные и инженеринговые затраты на интеграцию оборудования в электрические сети, издержки обеспечения системной устойчивости.

В новой архитектуре распределенной энергетике эти издержки должны сводиться к минимуму, а сама распределенная энергетика должна повысить эффективность работы энергосистем

в целом. Энергосистема, построенная по новой архитектуре, должна стать:

- *Транзакционной.* Экономическое взаимодействие между пользователями будет происходить на основе p2p-транзакций, позволяющих реализовать многообразие пользовательских ролей и сервисов, предоставляющих им кастомизированные ценности [4];
- *Интеллектуальной.* Управление системой за счет межмашинного взаимодействия между ее элементами, при котором каждый элемент может самостоятельно принимать решение о реализации того или иного режима своей работы и воздействии на систему, обеспечит легкость интеграции (Plug & Play) энергетических устройств пользователей в контуры управления различных сервисов;
- *Устойчивой и гибкой.* Будет обеспечена легкость технического соединения устройств с сетью при гарантированном поддержании статической и динамической устойчивости системы.

Пользователь такой системы через интерфейс интегрируется в нее и становится полноценным участником новых сервисов и бизнес-моделей.



Источник: Navigant Research.

Рис. 1. Концептуальная модель интернета энергии как «облачной энергетике» (Energy Cloud)

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Концептуальная модель интернета энергии.
Концептуальная модель интернета энергии опирается на представление об «энергетическом облаке» (рис. 1), введенном аналитиками компании Navigant Research [5].

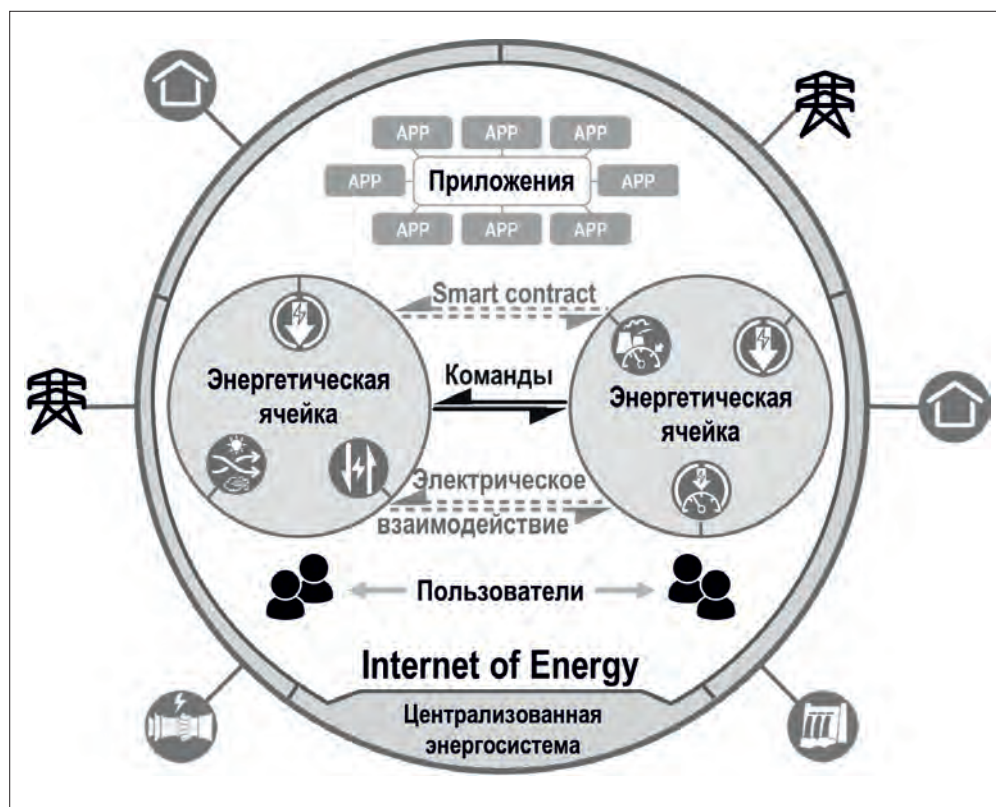
Согласно этому представлению, интернет энергии является экосистемой технически и экономически взаимосвязанных пользователей. Пользователями интернета энергии могут быть владельцы любого электроэнергетического оборудования (промышленного, коммерческого, бытового), которое может генерировать, накапливать и потреблять электроэнергию, а также субъекты, оказывающие владельцам электроэнергетического оборудования различные услуги.

Пулы оборудования, имеющего общую точку присоединения к электрическим сетям и информационным каналам, обеспечивающим связь с интернетом энергии, образуют его структурную единицу – энергетическую ячейку, которая вне зависимости от состава и сложности своей вну-

тренней структуры взаимодействует с другими энергетическими ячейками как единое целое.

Пользователи интернета энергии при помощи своих энергетических ячеек могут играть различные динамически меняющиеся роли в энергосистеме, оказывая друг другу услуги, такие как поставка электрической энергии, участие в режимном управлении, в том числе в поддержании частоты и уровня напряжения, предоставление энергетического оборудования в «виртуальную» аренду, обеспечение резерва мощности и любые другие виды услуг, которые могут быть оказаны в электроэнергетике.

Взаимодействие ячеек представляет собой энергетические транзакции, которые формируют мультиагентное децентрализованное экономическое и технологическое управление энергосистемой. Энергетическая транзакция, схема которой приведена на рис. 2, – это акт технического и экономического взаимодействия между пользователями и соответствующими энергетическими ячейками, при котором осуществляется



App – сервисные приложения.

Рис. 2. Энергетическая транзакция в интернете энергии

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

согласованное управление параметрами работы энергетических ячеек, за счет чего одна сторона энергетической транзакции приобретает некоторое полезное качество, ценность, а другая – получает оплату за эту ценность.

В целях роботизированного оказания и получения этих услуг пользователи обращаются к приложениям интернета энергии. Приложения – это сервисные программы, самостоятельно выстраивающие взаимодействие между энергетическими ячейками за счет формирования наборов энергетических транзакций для реализации тех или иных услуг. Согласованная работа энергетических ячеек за счет сбалансированных рыночных взаимоотношений пользователей придает интернету распределенной энергетики характер экосистемы.

Верхнеуровневая архитектура. Архитектура интернета энергии должна обеспечивать, с одной стороны, возможность реализации энергетических транзакций, с другой – возможность управления энергетическими ячейками за счет межмашинного взаимодействия, наконец, обеспечивать возможность такого распределенного режимного управления в реальном времени, которое позволяет поддерживать баланс мощности в энергосистеме, ее статическую и динамическую устойчивость.

Интернет распределенной энергетики представляет собой систему систем (System of Systems, SoS), архитектура которой строится на особом объединении трех систем, границы и взаимодействия которых друг с другом показаны на рис. 3:

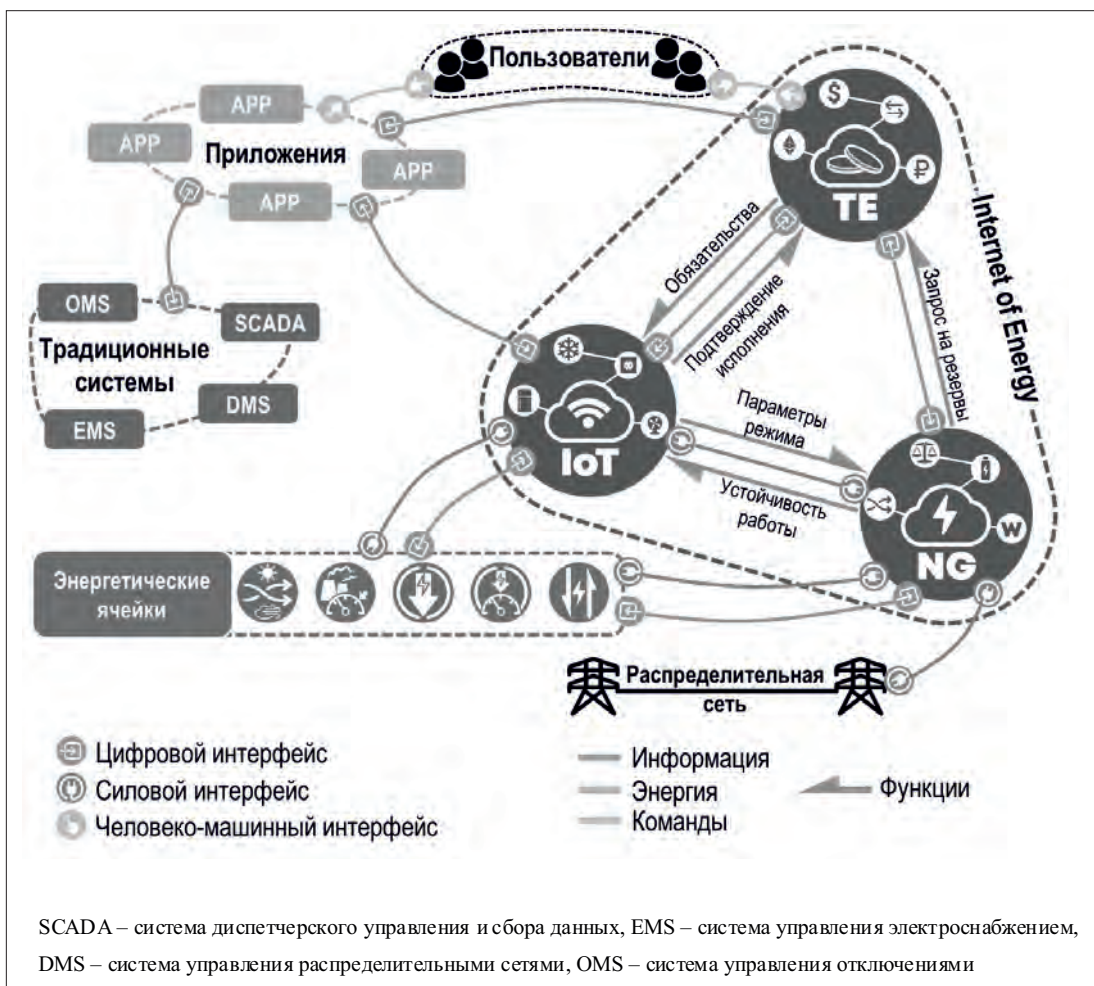


Рис. 3. Архитектура интернета энергии как системы систем: границы систем и взаимодействия между ними

- системы формирования, контроля исполнения и оплаты смарт-контрактов Transactive Energy (TE);
- системы межмашинного взаимодействия и обмена управляющими воздействиями между энергетическими ячейками и энергетическим оборудованием Internet of Things (IoT);
- системы поддержания баланса мощности и обеспечения статической и динамической устойчивости энергосистемы Neural Grid (NG).

Каждая из перечисленных систем может быть развернута самостоятельно и выполнять свою функцию независимо от других систем, но только совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих по специальным протоколам систем TE, IoT и NG формирует интернет энергии.³

Палитра смыслов для выбора российского пути в мир новой энергетики

Тема трансформации энергетики пришла в Россию извне. На ценностном уровне в обществе, а также на уровне государственной политики отсутствует алармистский градус актуальности основного посыла перехода – декарбонизации. Но это не снимает с повестки российской энергетической политики вопросы качественной трансформации электроэнергетической отрасли. В экспертно-аналитическом докладе «Цифровой переход в электроэнергетике России» мы уже отмечали, что особенности организации электроэнергетики в России – протяженная инфраструктура, низкая плотность потребления электроэнергии, большая доля промышленной нагрузки, социально-ориентированная политика, несовершенство рынка и отраслевого регулирования – приводят к постоянному росту цен на электроэнергию для бизнеса и постепенно становятся сдерживающим фактором для развития экономики страны. Инерционный сценарий развития отрасли в ближайшем будущем приведет к тому, что цена на электроэнергию для промышленности в России превысит цену в США и почти сравняется со средней ценой в странах ЕС. Это негативно скажется на конкурентоспо-

собности экспортируемой продукции российской промышленности с ее традиционно высокой удельной энергоемкостью производства.

Актуальность цифрового перехода в энергетике России, прежде всего, связана с необходимостью повышения эффективности использования энергетических мощностей, особенно в преддверии нового инвестиционного цикла. Пакет архитектурно-технологических решений и новых практик интернета энергии является адекватным ответом на специфические российские вызовы.

Однако рассуждения про повышение эффективности, и даже про замещение топливных источников энергии на «зеленые» возобновляемые источники – это сценарии экстраполяции, отражающие «продолженное настоящее» в сложившихся условиях. Обсуждая потенциал новой технологической платформы в энергетике, парадигмы интернета энергии (IDEA), мы должны строить предположения о новых сценариях развития техно-промышленного и социокультурного уклада, жизнедеятельности общества. Далее мы представим 4 сценария, которые имеют вероятность реализоваться в перспективе 30-50 лет и смогут черпать в парадигме IDEA решения по эффективному энергообеспечению.

Сценарий Power-to-Data. В XXI в. все большую роль в мировой экономике играют цифровые процессы, основанные на операциях с большими данными, блокчейн-платформы и различные роботы – программы, самостоятельно формирующие и принимающие решения в рамках определенных людьми целей, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта. Объемы информации, которая в связи с этим будет обрабатываться и храниться в интересах мировой экономики, возрастают экспоненциально, а инфраструктура работы с этой информацией станет основным потребителем электроэнергии и наиболее ценной формой, в которую электроэнергия может быть превращена. Технологии обработки информации, такие как обучение искусственного интеллекта или расчет хэш-функций, станут ключевым драйвером роста и изменений в энергетике, потребуют новых быстро масштабируе-

³ Более подробно с архитектурой IDEA вы можете познакомиться в [6].

мых энергетических мощностей везде, где будет вестись работа с информацией.

Сценарий Smart Cities. Процесс урбанизации, определявший наиболее мощные социально-экономические изменения в XXI в., в нынешнем столетии только усиливается и ускоряется. Города за счет сочетания множества технологий, объединяемых в понятие Smart City, становятся существенно более разнообразными, комфортными и привлекательными для жизни, а современное общество движется к формированию новых «полисов»: мировых городов – как основной формы организации жизни. Ожидается, что к середине века более 80% всего населения мира будет проживать в растущих и развивающихся городах. Энергопотребление таких мировых городов, которых в мире будут сотни, если не тысячи, будет постоянно расти за счет прироста числа жителей и роста уровня их жизни. Это потребует от энергетики невероятно разнообразных, но в то же время быстрорастущих и требующих минимум места мощностей. Энергетика должна стать одновременно распределенной, чтобы лучше отвечать изменяющимся запросам новых городских районов и сообществ, экологически чистой, не ограничивающей рост городов, и в то же время, в силу высокой плотности потребления в городе, чрезвычайно концентрированной и компактной.

Сценарий Discovery. Новым фронтиром в XXI в. станет освоение труднодоступных и суровых пространств, которые еще не заселены и не обеспечены инфраструктурно, территорий, устойчивая жизнь на которых кажется невероятной. Этими пространствами являются Крайний Север, Антарктида, просторы Сибири и Дальнего Востока, удаленные от берега искусственные острова, центральные районы пустынь, высокогорья, сельва, и даже дно мирового океана. Экспансия цивилизации не остановилась, она будет наращиваться в направлении этого нового рубежа в желании сделать новые суровые территории более доступными и пригодными для жизни. Эта экспансия будет обусловлена не столько поиском ресурсных баз, сколько поиском новых смыслов, стилей и образов жизни. Освоение нового фронта потребует невероятно эффективной автономной энергетики, обладающей возможностью к быстрому разворачи-

ванию и масштабированию для удовлетворения потребностей в энергии в полностью автономном режиме.

Сценарий Mobility. Объемы мировой торговли и глобальный товарооборот все время растут, и этот рост последние 10 лет после кризиса 2008 г. неуклонно ускоряется. Одновременно с этим возрастают и глобальные пассажиропотоки, люди все чаще перемещаются на большие расстояния. Возникают и будут возникать новые виды транспорта, преимущественно электрического, от персонального городского – типа электроскутеров, гироскутеров, моноциклов до электромобилей и электробусов. Существенно вырастет скорость дальнемагистрального транспорта: ожидается появление промышленных образцов поездов на магнитном подвесе со скоростями более 600 км/ч и сверхзвуковых пассажирских самолетов со скоростями более 1500 км/ч. В то же время активно развивается и скоро вступит в стадию взрывного роста индустрия транспортных роботов: от личных роботов-чемоданов и роботов-холодильников до роботизированных средств доставки типа роботов-тележек и различных мультикоптеров. Все эти тенденции объединятся в новый формат транспортного мира, который в сравнении с сегодняшним состоянием будет перемещаться на порядок более интенсивно, в нем будет на порядок, или даже два порядка, больше различных транспортных средств и скорости перемещения в нем вырастут в 2-3 раза. Это потребует чрезвычайно многоуровневой энергетики, которая, с одной стороны, сможет обеспечить растущее в основном централизованное электропотребление магистрального общественного транспорта всех типов, а с другой – позволит заряжать распределенный вплоть до каждого домохозяйства персональный и шэринговый электрический транспорт и электрических подвижных роботов.

Список сценариев не закрыт, он может и будет изменяться вслед за актуализацией тех или иных социально-экономических проблем, появлением новых технологий и приемлемых практик их использования, трансформацией общественного сознания и культурных норм и ценностей. Важно понимать, что цифровой переход в энергетике создает для России новые возможности не только в части повышения эф-

фективности существующей энергосистемы, но и в формировании качественно новых условий для экономического роста и повышения уровня жизни.

Выводы

Разрабатываемый в рамках Национальной технологической инициативы архитектурно-технологический подход к организации элек-

троэнергетики IDEA является ответом на актуальные вызовы сегодняшнего дня и выражает суть цифровой трансформации в энергетике. Архитектура интернета энергии вбирает в себя все основные технологические новации складывающегося техно-промышленного уклада и может служить базой для масштабного развития новых и/или качественно изменяющихся практик производства, транспорта, жизнедеятельности.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Report «Digital Transition in the Electric Power Industry of Russia» / Ed. V.N. Knyaginina, D.V. Holkin, CSR, 2017 (in Russian).
2. Eggertsson T. *Economic Behavior and Institutions*, Moscow: Delo, 2001 (in Russian).
3. *Transactive Energy Models. Business and regulatory models working group*, NIST, 2016.
4. Navigant research «*Transactive Energy Markets*», Navigant, 2018.
5. Navigant research «*Energy Cloud 4.0: Capturing Value through Disruptive Energy Platforms*», Navigant, 2018.
6. *Whitepaper Architecture of the Internet of energy*. DEDC, CSR-NW, 2018 (in Russian).

Поступила в редакцию
05.09.2018 г.

УДК 621.311 «21»

А.Г. Старченко, В.В. Дзюбенко, И.Ю. Ряпин¹

ИНТЕРНЕТ ЭНЕРГИИ: БУДУЩЕЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ УЖЕ НАСТУПИЛО

Аннотация. Анализируются тенденции изменения архитектуры и принципов управления энергосистем на основе синергии цифровых и энергетических технологий. Представлено краткое описание изменения технологических принципов и организации отношений участников энергорынка. Рассмотрены примеры внедрения новых технологических решений и связанных с ними изменений в регулировании развития энергосистем.

Ключевые слова: трансформация энергосистем, интернет вещей, интернет энергии, цифровые технологии, отраслевое регулирование.

A.G. Starchenko, V.V. Dzubenko, I.Yu. Ryapin²

INTERNET OF ENERGY: THE FUTURE OF POWER INDUSTRY HAS ALREADY COME

Abstract. The article analyses the changes in architecture and managing principles of the power systems, driven by the synergy of digital and power technologies. A short description of changes in the technological principles of the power systems and the transactions performed by the participants of the power markets is given. Examples of implementation of the new technological solutions and of changes in the regulation of the development of the power systems accompanying them are provided.

Keywords: transformation of the power systems, internet of things, internet of energy, digital technologies, industry regulation.

В мировой электроэнергетике в настоящее время происходят преобразования, которые принципиально и достаточно быстро меняют архитектуру и принципы управления энергосистем – их традиционное вертикальное устройство трансформируется в более гибкую, надежную и одновременно более экономичную распределенную систему (рис. 1). Основой для этих изменений стала синергия развития цифровых и энергетических технологий, которая появилась и активно развивается в последние годы. Так, появление и достижение коммерчески привлекательного уровня систем хранения энергии, развитие микросетей, управления спросом и самобалансирования, удешевление и доступность оборудования для распределенной генерации – как углеродной, так

и на основе возобновляемых источников, сочетается с бурным развитием межмашинных (M2M) коммуникаций, технологий интернета вещей (IoT), анализа больших данных и управления на основе искусственного интеллекта (AI). Цифровые технологии стали бурно развиваться в связи с ростом производительности и кратным удешевлением вычислительной мощности компьютерной техники.

В результате базовые принципы, на которых строилась прежняя энергетика, утрачивают свое фундаментальное значение или вовсе исчезают.

Если раньше хранение электроэнергии было доступно или в очень большом масштабе – ГАЭС, или в очень маленьком (относительно энергосистемы) – свинцово-кислотные аккумуля-

¹ Александр Григорьевич Старченко – управляющий партнёр First Imagine! Ventures, *e-mail:* alexander@firstimagine.com; Валерий Валерьевич Дзюбенко – заместитель директора Ассоциации «Сообщество потребителей энергии», *e-mail:* dv@np-ace.ru;

Игорь Юрьевич Ряпин – начальник департамента по внешним связям и стратегии Ассоциации «Сообщество потребителей энергии», *e-mail:* iryapin@np-ace.ru;

² Alexander G. Starchenko – Managing Partner, First Imagine! Ventures, *e-mail:* alexander@firstimagine.com; Valery V. Dzubenko – Deputy Director of the Association «Energy Consumers Community», *e-mail:* dv@np-ace.ru; Igor Yu. Ryapin – Head of the Department for External Relations and Strategy of the Association «Community of Energy Consumers», *e-mail:* iryapin@np-ace.ru.



Источник: [1].

Рис. 1. Трансформация архитектуры энергосистем

ляторы, то сейчас палитра технологий и размеров хранения существенно разнообразнее – химические, гравитационные, механические. Благодаря этому производство и конечное потребление электроэнергии можно развести во времени: производить электроэнергию становится возможно тогда и в таких объемах, когда это оптимально с точки зрения затрат (во время наличия бесплатных первичных ресурсов или в оптимальном режиме потребления топлива), вне связи с графиком конечного потребления электроэнергии.

В то же время потребление электроэнергии стало предсказуемым и управляемым. Появились дешевые датчики и средства коммуникации, а также технологии адресации в Интернете, которые позволяют обращаться к конкретным устройствам – появился «интернет вещей» (IoT). Теперь мы можем знать о том, когда и как работает конкретное устройство – будь то станок или бытовой прибор. Эта информация может сохраняться и становится доступной для обобщения и обработки – появились технологии работы с «большими данными» (Big Data). Обработка больших данных о потреблении энергоресурсов обеспечивает высокую точность прогнозирования потребления. Искусственный интеллект, основанный на огромных массивах информации о всевозможных параметрах работы энергосистемы и факторах, прямо или косвенно влияющих на эти параметры, уже скоро

сможет управлять режимами энергосистемы намного точнее, чем люди. Более того, только межмашинные коммуникации могут обеспечить управление таким множеством объектов, которое представляют собой подключенные приборы, включая бытовой уровень (электрочайники, кофеварки, кондиционеры, холодильники и пр.) Управление потреблением в сочетании с хранением энергии на стороне потребителя позволяет смещать нагрузку во времени, не создавая проблем для потребителя. В итоге потребление становится таким же активным участником энергосистемы, как генерация.

Появление новых ресурсов регулирования, активизация роли потребления в управлении энергосистемами становятся особенно важными при развитии возобновляемой энергетики, выработка которой зависит от времени суток и погоды. Крупная традиционная генерация пока остается основой крупных энергосистем и важнейшим ресурсом их регулирования, но со временем ее роль будет снижаться.

И, наконец, в результате появления и развития силовой электроники появилась возможность напрямую управлять потоками энергии в сетях переменного тока. В технологическом арсенале для решения этих задач появились Smart Grid, интеллектуальные подстанции, автоматизация питающих линий. В результате упрощается управление режимами энергосистемы, появляется возможность для интеграции в сеть

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

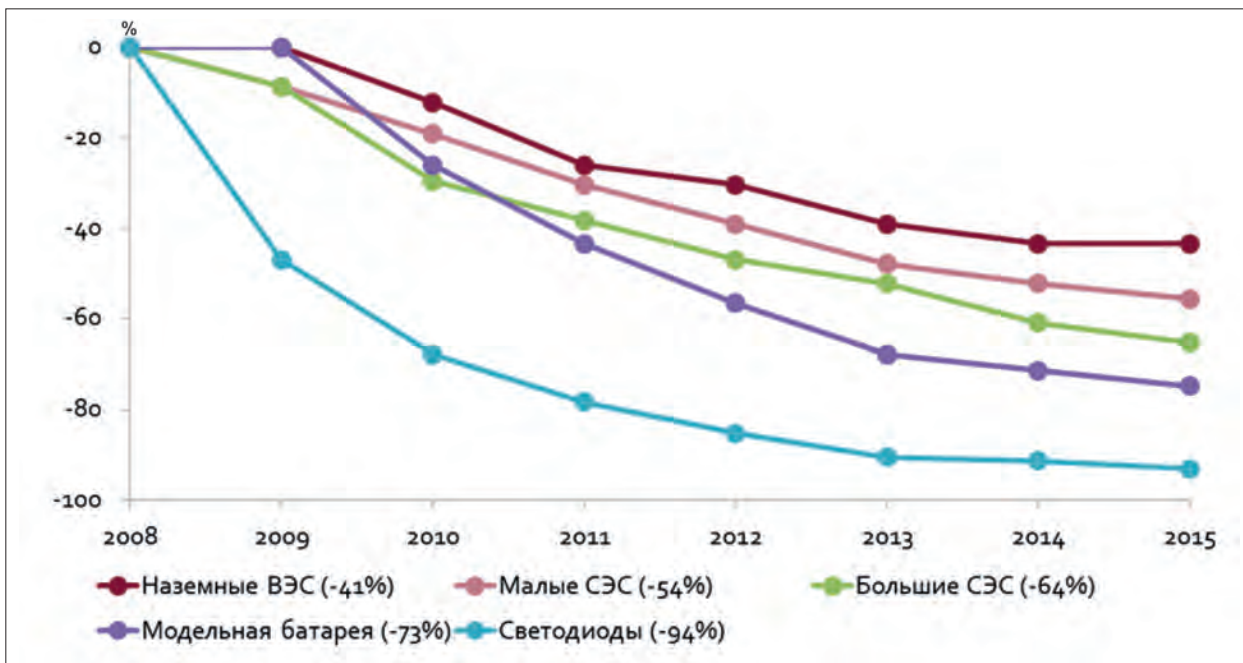
различных источников энергии, снижается необходимость содержания избыточных сетей и резервной генерации.

Важно еще и то, что все эти новые технологии сейчас стремительно дешевеют: буквально каждая из перечисленных технологий за последние 5-10 лет подешевела в разы, приблизившись к уровню, когда их массовое внедрение стало экономически обоснованным. Так, по данным Массачусетского технологического института [2], с 2008 по 2015 гг. наземные ветроэнергетические установки подешевели на 41%, малые солнечные электростанции – на 54%, большие солнечные электростанции – на 64%, технологии хранения энергии (прежде всего литий-ионные) – на 73% (рис. 2). И важно отметить, что в последующие годы эта тенденция продолжилась.

В результате в электроэнергетике уже появился и стремительно развивается совершенно новый технологический уклад, обеспечивающий свободный и равноправный обмен энергией и другими, связанными с таким обменом товарами и услугами между всеми участниками. Из-за схожести принципов взаимодействия участников новой энергетики с работой инфор-

мационно-телекоммуникационной сети такой формат в России и за рубежом стали называть «интернет энергии».

Ключевым стимулом для развития технологий, появления новых проектов и решений в контексте новой энергетики в зарубежных энергосистемах является повышение надежности и сокращение расходов экономики на содержание большой, малоповоротливой, построенной под пиковую нагрузку, энергосистемы. Классическим примером такого подхода уже стал проект, реализованный в Нью-Йорке компанией ConEdison – Brooklyn-Queens Demand Management Program³. Начиная с 2013 г. из-за роста потребления электроэнергии начали наблюдаться перегрузки на двух подстанциях, снабжающих районы Бруклин и Квинс в Нью-Йорке. Согласно прогнозам компании ConEdison (местной энергоснабжающей компании), к 2018 г. система энергоснабжения этих районов должна была испытывать перегрузку в 69 МВт в течение от 40 до 48 часов в летние месяцы. Традиционным способом решения проблемы было бы строительство новой подстанции, распределительного устройства и фидеров к 2017 г., на



Источник: [2].

Рис. 2. Снижение цены на важнейшие технологии новой энергетики в 2008-2015 годах

³ URL: <https://www.coned.com/en/business-partners/business-opportunities/brooklyn-queens-demand-management-demand-response-program>.

что потребовалось бы около 1 млрд долларов. Вместо этого компания предложила решить проблему за счет внедрения комплексного решения, включающего управление спросом на стороне потребителей, развитие распределенной генерации, строительство микросетей, а также традиционных инвестиций в инфраструктуру. Совокупно предложенные меры оценивались в 305 млн долларов. Реализация программы позволила отсрочить строительство новой подстанции до 2026 г., а при ее дальнейшем развитии строительство может не потребоваться вовсе.

Основываясь на опыте, полученном при разработке и реализации этой программы, компания ConEdison с тех пор идентифицировала более дюжины других проектов замещения развития инфраструктуры альтернативными решениями (non-wires alternatives)⁴, а сама программа Brooklyn-Queens Demand Management Program дала толчок развитию новой энергетической стратегии штата Нью-Йорк – New York Reforming the Energy Vision.

По другую сторону океана – в Великобритании – Служба по рынкам газа и электроэнергии (OFGEM) одной из своих основных задач ставит способствование изменениям в энергетической системе. Признавая, что современная энергосистема и рынки электроэнергии были разработаны для условий, значительно отличающихся от тех, которые характерны для сегодняшнего дня и которые будут характеризовать энергосистему в будущем, регулятор ведет работу по трем направлениям: повышение гибкости энергосистемы и разработка стратегии регулирования энергетики будущего, изменение принципов установления тарифов на передачу для учета повышения доли распределенной генерации и обеспечения более справедливого распределения тарифной нагрузки, обеспечение развития инфраструктуры, необходимой для развития инноваций в энергетике (например, установки «умных» систем учета электроэнергии) [3].

Не менее известна программа Энергетического перехода (Energie Wende), реализуемая правительством Германии. Эта программа предполагает переход энергетики Германии к низкоуглеродной и дружественной для окружающей

среды, но вместе с тем надежной и доступной для потребителей модели функционирования.

Все эти изменения стали возможны, как уже было отмечено выше, благодаря значительному прогрессу сразу по нескольким технологическим направлениям, как энергетическим, так и неэнергетическим – от силовой электроники, материаловедения и вычислительной техники до обработки больших данных (Big Data), искусственного интеллекта (AI)

Одной из основных тенденций, обеспечивающих технологический прорыв в энергетике, является экспоненциальный рост числа подключенных устройств – их количество уже превысило население Земли и к 2020 г. составит от почти 21 млрд, по прогнозу Gartner, до 75 млрд – по прогнозу Morgan Stanley. Кстати, одним из существенных драйверов роста числа подключенных устройств стал переход с 32 битного протокола адресации IPv4, позволявшего адресовать суммарно 2 в 32-й степени устройств (приблизительно 4,3 млрд), на 128-битную адресацию протокола IPv6, увеличившего количество устройств для адресации до 2 в 128-й степени. Всеобщая информатизация позволяет получать детальную информацию о состоянии устройств и управлять ими, включая управление их энергопотреблением, реагируя на технические или экономические факторы – пики нагрузки и колебания цены электроэнергии. Технология оборудования отдельных приборов системами фиксации параметров и автоматической передачи информации в сеть Интернет (создание «подключенных устройств» – connected things) получила название интернет вещей (Internet of Things). В результате ее применения спрос на электроэнергию впервые становится эластичным, а управление энергопотреблением автоматизируется на основе удобных потребителю сценарных условий с применением технологий обработки больших данных и искусственного интеллекта. Это тоже стало возможным только сейчас в связи с кратным ростом мощности и удешевлением вычислительных возможностей. Гибкое управление спросом (Demand Management) позволяет сбалансировать спрос и предложение в энергосистеме на низовом уровне

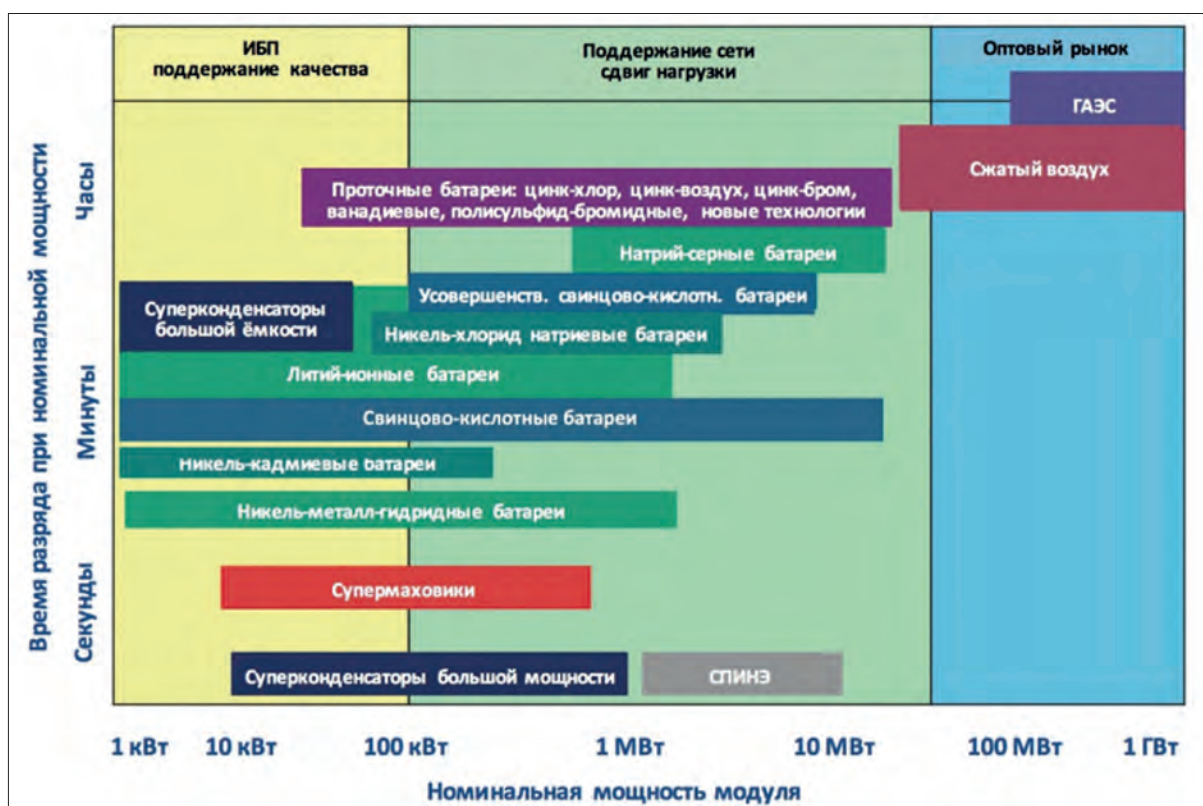
⁴ URL: <https://www.coned.com/en/business-partners/business-opportunities/non-wires-solutions>.

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

не конечного потребления, без необходимости строить и содержать резервную инфраструктуру и постоянно менять режимы работы крупных электростанций. В конкуренцию на этом рынке наряду с традиционными энергетическими, коммунальными и сбытовыми компаниями уже активно включились ИТ-компании, банки и телеком-провайдеры. Цифровые платформенные решения для агрегации и управления спросом достаточно быстро окупаются и являются предметом особого интереса инвесторов.

Среди энергетических технологий, благодаря развитию которых возможны описанные выше изменения, в первую очередь стоит выделить развитие технологий хранения энергии. При этом важно отметить, что наибольший прогресс происходит в сфере относительно небольших и малых установок хранения энергии: даже крупные системы хранения, которые работают сейчас (за исключением ГАЭС), по номинальным показателям значительно уступают показателям электростанций, которыми привыкли оперировать энергетики (рис. 3). Самая большая в мире система хранения энергии – Hornsdale

Power Reserve в Австралии, построенная компанией Tesla, имеет установленную мощность 100 МВт и номинальную емкость 129 МВт·ч. Более того, эта система состоит из модульных элементов (Tesla Powerpack), каждый из которых имеет номинальную мощность 50 кВт и номинальную емкость 210 кВт·ч. Однако эта система работает в связке с ветропарком, установленная мощность которого – 300 МВт, а также с угольной электростанцией, установленная мощность которой – 1700 МВт. И эта система хранения энергии, установленная мощность которой составляет всего 2% от установленной мощности энергосистемы Южной Австралии, за первые 4 месяца работы обеспечила более половины общего объема системных услуг, необходимых для поддержания частоты, в результате цены на системные услуги упали на 90%. Более того, она уже успела несколько раз предотвратить развитие каскадных аварий в энергосистеме, возникавших вследствие аварийных отключений энергоблоков угольной станции [4]. Но еще более активно развиваются локальные решения для небольших потребителей, позволяющие им



Источник: [5].

Рис. 3. Типовые сферы применения различных технологий хранения энергии

сократить потребляемую мощность и затраты за счет выравнивания графика потребления. Уже сегодня зрелость этих технологий позволяет свободно варьировать размер, тип и технические характеристики накопителя под конкретную задачу. Так, например, для домашних накопителей энергии хорошо подходят химические, в первую очередь литий-ионные батареи, которые бесшумны, недорогие и не требуют обслуживания. А, например, для оперативного регулирования частоты в энергосистеме, где требуется очень быстрая реакция (в диапазоне десятков миллисекунд) и множество циклов заряда и разряда в течение одного дня, прекрасно подходят маховики. Большой интерес представляют проточные батареи, которые уже сейчас могут экономически эффективно обеспечивать хранение больших объемов электроэнергии для выравнивания колебаний потребления электроэнергии в энергосистемах и у крупных потребителей. Для длительного хранения энергии в ряде стран разрабатываются и уже внедряются механические гравитационные накопители, например в США – поезд на железной дороге с уклоном, в России компанией «Энергозапас» создан проект гравитационного накопителя в виде башни с вертикально перемещаемым грузом, в Европе есть примеры использования гравитационных накопителей на базе существующих глубоких шахт.

Еще одним активно развивающимся сегментом является распределенная генерация, то есть источники электроэнергии, установленные непосредственно у потребителей. Помимо уже привычных солнечных, ветряных и биогазовых электростанций, эффективность и доступность которых увеличивается с каждым годом, появляются все более эффективные установки на природном газе, доступные практически любому потребителю, и повсюду растет количество вводов небольших электростанций и стремительно уменьшается ввод новых, пусть даже и очень эффективных, но не гибких и избыточных гигантских блоков. По мере роста эффективности малой генерации, а известны разработки малых газовых турбин, электрический КПД которых достигает 42%, в сочетании с автоматизацией таких установок и уменьшением требуемых операций по их обслуживанию, удобство

и экономическая эффективность использования таких установок непосредственно у потребителя все чаще оказываются выше, чем при энергоснабжении от электрической сети. Как результат – в этом году мировые лидеры по производству крупных газовых энергетических турбин – компании Siemens и General Electric – объявили о сокращениях и реструктуризации соответствующих подразделений. Распределенная генерация вкупе с обвязкой «умными» сетями и созданием микросетей позволяет сделать локальные участки энергосистемы самобалансирующимися и способными обеспечивать энергоснабжение потребителей в случае нарушения энергоснабжения в центральной сети.

В качестве примера комплексного решения по энергоснабжению территории на основе новых технологий можно привести проект, реализуемый при поддержке Еврокомиссии на британских островах Силли (Smart islands project). Ранее эти острова снабжались электроэнергией от локальных дизельных электростанций и через кабель, проложенный от Великобритании. Проект предполагает вывод из эксплуатации дизельных электростанций, установку солнечной генерации, домашних накопителей (разумеется, подключенных не только к электрической, но и к информационной сети) и систем управления энергоснабжением домохозяйств («умный» дом), а также развитие электротранспорта и установку «умных» зарядных станций. Но самое главное в этом проекте – объединение всех элементов единой платформой управления, которая будет обеспечивать балансирование энергосистемы и надежность энергоснабжения за счет управления всеми доступными распределенными энергетическими ресурсами. При этом одна из задач реализации этого проекта – к 2020 г. снизить счета за электроэнергию, выставяемые потребителям, на 20%, а к 2025 – на 40%.

Причина столь бурного развития этих технологий в том, что они оказываются выгоднее для общества в целом и для конкретных потребителей в частности. При этом они создают в ранее консервативной отрасли совершенно новые рынки – например, рынок услуг по хранению энергии, которые позволяют всем потребителям участвовать в энергосистеме в совершенно новой роли просьюмеров (активных

потребителей), интегрировать в энергосистему гораздо большее количество ВИЭ и делают систему намного более надежной за счет большей гибкости. Технологическая компоновка новой энергетики почти не затрагивает крупную генерацию и магистральные сети, сохраняя за ними привычные роли базового каркаса энергосистемы. Все самое интересное происходит на уровне потребителей – домохозяйств, зданий, предприятий и городских кварталов.

Нарастающие в зарубежных энергосистемах изменения гораздо быстрее, чем мы думаем, станут главным пунктом энергетической повестки и для потребителей в России. Все необходимое для появления технологий новой энергетики в нашей стране уже доступно – отечественные и зарубежные разработчики и поставщики решений готовы предоставлять широкий спектр инструментов для решения задач различного класса – от оснащения индивидуального домохозяйства до цифровых платформ для энергетики предприятий и городов.

Отечественные разработки во многом концентрируются вокруг проекта EnergyNET, который реализуется в рамках Национальной технологической инициативы. Очень интересны разработки компании ONDER, предполагающие организацию микросети с возможностью торговли электроэнергией между ее участниками на поминутной основе, применением неинвазивных датчиков компании Voltaware и технологии блокчейн. Также разрабатывается концепция активных энергетических комплексов, предполагающая создание достаточно крупных самобалансирующихся систем, связь которых с присоединенной электрической сетью ограничена определенными параметрами и жестко контролируется, при этом за счет локальной генерации и управления внутренними распределенными энергетическими ресурсами из внешней сети потребляется гораздо меньшая мощность, чем суммарная потребляемая мощность потребителей, входящих в такие комплексы.

Учитывая растущую стоимость энергоснабжения от централизованной сети, такие решения и в России становятся все более экономически привлекательными. В то же время сценарии, скорость и качество развертывания технологий новой энергетики во многом зависит от адекват-

ности восприятия этого процесса и связанных с ним вызовов и возможностей со стороны отраслевых регуляторов.

Регуляторы за рубежом, руководствуясь критерием общественной пользы, которую несет развитие технологий новой энергетики, перестраивают свое видение и программу действий. Упомянутая выше стратегия британского регулятора Ofgem включает работу по 29-ти пунктам плана трансформации энергосистемы. В США Федеральная комиссия по регулированию в энергетике (FERC) принимает директивы, обязывающие операторов рынков электроэнергии изменить правила рынков таким образом, чтобы обеспечить эффективное участие в рынках системных услуг систем хранения энергии (в том числе, чтобы при оплате системных услуг учитывались скорость и точность выполнения команд диспетчера) [6], а также для устранения препятствий для развития управления спросом (demand response) на организованных рынках [7]. Один за другим штаты в США устанавливают цели по переходу на чистые источники энергии и по развитию систем хранения энергии.

Таким образом, регуляторы на передовых рынках становятся в авангарде трансформаций, происходящих в электроэнергетике. Действуя в интересах потребителей электроэнергии и, соответственно, национальной экономики, они создают условия для эффективной интеграции новых технологий в существующие энергосистемы и дальнейшей трансформации энергосистем на новых принципах – создания более надежных и гибких энергосистем, снижения экологического ущерба, наносимого энергетикой, способствования развитию инноваций и строительству предпринимательства в энергетике и в конечном итоге – повышения доступности для потребителей энергоснабжения, которая является базовым условием функционирования экономики любой страны.

В практике отраслевых регуляторов в России наблюдается иная, отличная от зарубежных примеров, ситуация. Представители федеральных органов исполнительной власти, регулирующих электроэнергетику, с одной стороны, охотно участвуют в публичных мероприятиях, конференциях и семинарах, посвященных циф-

ровизации, технологиям новой энергетики, более того – декларируют необходимость их развития в стратегических отраслевых документах. Но принимаемые ими практические решения не только не способствуют, но и зачастую препятствуют появлению нового технологического уклада. Так, конкурентные рыночные механизмы в отрасли в последнее время все шире подменяются административным перераспределением платежей, увеличиваются виды и объемы перекрестного субсидирования, множатся тарифные «заповедники», вводится лицензирование энергосбытовой деятельности.

Из-за стремления регуляторов и ряда отраслевых игроков сохранить комфортную для себя прежнюю систему отраслевых отношений, развитие инноваций лишается своей естественной питательной среды – конкурентного состязания технологий. Это противоречие между неизбежным развитием технологий новой энергетики, уже доказавших свою состоятельность и привлекательность, с одной стороны, и отсутствием адекватных регуляторных действий – с другой, ведет к стихийному и, вероятнее всего, неоптимальному развитию процессов смены технологического уклада. Среди актуальных задач регулирования – создание условий для появления и развития новых бизнес-моделей и рынков, расшивка узких мест, препятствующих внедрению новых технологий в нормативном правовом и

техническом регулировании, стандартизация для совместимости устройств и систем управления, кибербезопасность. Без продвижения в решении этих задач в ближайшие годы регулятор столкнется с кризисной для себя ситуацией и отраслевые изменения, которые могли бы уже сегодня внедряться эволюционно, будут «взмывать» архаичную систему отраслевых отношений самым непредсказуемым образом.

Благодаря активному развитию и все большей доступности новых, в первую очередь цифровых, технологий, энергосистемы видоизменились и продолжают меняться. Первым результатом этих изменений является существенное (на десятки процентов) падение спроса на пиковую мощность. Масштабная смена технологического уклада в электроэнергетике неизбежно затрагивает все существующие в мире энергосистемы, меняя их облик, а там, где энергосистемы не успели развиваться до масштабных централизованных структур, как в США, Европе или в России, сразу формируется распределенная архитектура. Будущее электроэнергетики, бесспорно, уже наступило. В энергосистемах постепенно утрачивается роль мощных транзитных энергомоств, поскольку вся энергетика становится более распределенной, порождая новые рынки и новых игроков, и самое главное – создает новое, ранее недоступное качество энергосистемы в интересах всех ее участников.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. *From Smart Grid to Neural Grid, Navigant Research*. 2018.
2. *Utility of the Future, MIT*. 2016.
3. *2017-2018 OFGEM Annual Report and Accounts*.
4. *Initial operation of the Hornsdale Power Reserve Battery Energy Storage System, AEMO, April 2018*.
5. *Electricity Storage Handbook, DOE/EPRI, 2015*.
6. *FERC Order 841. Electric Storage Participation in Markets Operated by Regional Transmission Organizations [RTOs] and Independent System Operators [ISOs], FERC, 2018*.
7. *FERC Order 745. Demand Response Compensation in Organized Wholesale Energy Markets, FERC, 2011*.

Поступила в редакцию
17.09.2018 г.

УДК 004:621.311

Е.П. Грабчак, Е.А. Медведева, И.Г. Васильева¹

КАК СДЕЛАТЬ ЦИФРОВИЗАЦИЮ УСПЕШНОЙ

*Любая достаточно развитая
технология неотличима от магии*
Артур Кларк

Аннотация. В статье рассмотрены наиболее актуальные вопросы цифровизации электроэнергетики как одной из базовых отраслей экономики Российской Федерации: определена связь данной задачи с основными положениями и целями программы «Цифровая экономика Российской Федерации», обоснована необходимость подготовки стратегического документа по цифровизации отрасли, дана оценка возможности использования зарубежного опыта формирования стратегии цифровизации, представлены парадигма, основные уровни и ограничения цифровой трансформации электроэнергетики, заданы основные принципы использования цифровых технологий и платформенных решений при внедрении интеллектуальных систем управления, а также формирования корпоративных концепций цифровизации, обозначена роль Минэнерго России в упорядочении процессов цифровизации и представлении государственных интересов.

Ключевые слова: цифровая экономика, цифровая энергетика, концепция цифровизации, интеллектуальные системы управления, цифровая трансформация, стратегия, модели взаимодействия, электро-сетевой комплекс, энергосистема.

Е.Р. Grabchak, E.A. Medvedeva, I.G. Vasilyeva²

HOW TO MAKE DIGITALIZATION SUCCESSFUL

Abstract. This article considers the most urgent issues concerning digitalization of the power industry as a basic sector of the Russian Federation economy. In particular, it determines a connection between this task and main provisions and goals of the Digital Economy of the Russian Federation program. The need for preparing a strategic document on industry digitalization is justified, and the possible use of foreign experience of digitalization strategy development is assessed. The paradigm, principal levels and restrictions of digital transformation of the power industry are introduced. The basic principles of using digital technologies and platform solutions in the implementation of smart control systems as well as those of formulating corporate concepts of digitalization are established. The role of the Ministry of Energy of the Russian Federation in streamlining digitalization processes and representing state interests is defined.

Keywords: digital economy, digital power industry, digitalization concept, smart control systems, digital transformation, strategy, interaction models, power grid, power system.

¹ Евгений Петрович Грабчак – директор Департамента оперативного контроля и управления в электроэнергетике Минэнерго России, *e-mail:* GrabchakEP@minenergo.gov.ru;

Елена Анатольевна Медведева – заместитель директора Департамента оперативного контроля и управления в электроэнергетике Минэнерго России, *e-mail:* MedvedevaEA@minenergo.gov.ru;

Ирина Гергартовна Васильевна – главный эксперт отдела оперативного контроля энергообъектов АО «Техническая инспекция ЕЭС», *e-mail:* VasilevaIG@minenergo.gov.ru.

² Evgeny P. Grabchak – Head of the Department of Operational Control and Management in Electric Power Industry of the Ministry of Energy of the Russian Federation, *e-mail:* GrabchakEP@minenergo.gov.ru;

Elena A. Medvedeva – Deputy Head of the Department of Operational Control and Management in Electric Power Industry of the Ministry of Energy of the Russian Federation, *e-mail:* MedvedevaEA@minenergo.gov.ru;

Irina G. Vasilyeva – Chief Expert of the Department of Operational Control of Energy Facilities at JSC «Technical Inspection of UES», *e-mail:* VasilevaIG@minenergo.gov.ru.

Конечная цель построения цифровой экономики, заданная программой «Цифровая экономика Российской Федерации», довольно амбициозна: повышение конкурентоспособности на глобальном рынке как отдельных отраслей, так и экономики России в целом. Достичь этого планируется путем создания экосистемы цифровой экономики, в которой данные в цифровой форме являются ключевым фактором производства во всех сферах и устранения ограничений для создания и развития высокотехнологических бизнесов с использованием целого ряда сквозных цифровых технологий. Программа определяет основные стратегии развития базовых уровней цифровой экономики: формирование единой среды, развитие технологий и платформ, оставляя для дальнейшей проработки прикладные отраслевые направления. Такая логика объясняется тем, что задача цифровизации каждой отдельной отрасли должна не только быть согласованной и поддерживать развитие цифрового преобразования экономики России, но и обеспечивать эффективное исполнение своей основной отраслевой функции. В отношении электроэнергетики, прежде всего, это обеспечение национальной безопасности и гарантированное удовлетворение потребностей российской экономики и граждан в обеспечении электроэнергией через поддержание и развитие национального энергетического комплекса.

Таким образом, одним из наиболее приоритетных вопросов в настоящее время является подготовка и утверждение национальной стратегии цифрового преобразования электроэнергетики. Частично основные направления данной стратегии заданы в Указе Президента РФ от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». Перед отраслью поставлены задачи осуществления преобразования энергетической инфраструктуры посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений, а также гарантированное обеспечение доступной электроэнергией, в том числе за счет внедрения интеллектуальных систем управления электросетевым хозяйством на базе цифровых технологий.

Цифровая трансформация должна предполагать изменения и получение положительных

результатов на уровне отрасли и страны и не может носить сугубо корпоративный характер. При этом важно соблюсти баланс интересов всех субъектов отрасли. Учитывая технологическую взаимосвязь значительного количества субъектов отрасли в процессе производства, транспортировки, распределения и сбыта электроэнергии, формируемая национальная стратегия цифрового преобразования электроэнергетики должна заложить основу для формирования не противоречащих ей корпоративных стратегий, концепций и программ цифровизации. В конечном счете изменениями будут затронуты все аспекты функционирования отрасли: от технологического взаимодействия до финансово-рыночных взаимоотношений.

Отраслевой стратегический документ по цифровизации необходимо формировать с учетом текущих особенностей отрасли и состояния экономики России, характеризующимся наличием целого ряда вызовов. В этой связи следует критически оценивать использование зарубежного опыта применительно к российской электроэнергетике. Необходимо учитывать отличия в структуре национальных энергетических комплексов различных стран, сложившихся рыночных отношений и особенности регулирования национальных и международных рынков, а также существующие тренды на повышение национальной энергетической независимости на фоне недостатка собственных энергоресурсов у ряда стран. Ярким примером является Германия, где формирование энергостратегии проходило в условиях требований прекращения использования вредных производств, в первую очередь ядерных реакторов, сокращения выбросов CO₂ в атмосферу, а также постепенного сокращения выбросов в атмосферу других веществ (фреона, элегаза). При этом основные источники возобновляемой энергии в виде ветропарков размещались на севере страны, а центры производства на юге. Усиление существующих электрических сетей и строительство новых линий существенно ограничены. Отдельным вызовом для немецких энергетиков является управление ветропарками в условиях нестабильной нагрузки и высокой волатильности ветро- и солнечной генерации. Именно поэтому наряду с использованием гидроаккумуляторов и других накопи-

телей сформировались определенные требования к тем самым «умным» сетям (Smart Grid), а также концепция объединения множества мелких производителей в единую систему, работающую как большая электростанция (виртуальная электростанция). Как видим, энергополитика Германии, направленная на стимулирование развития солнечной и ветровой генерации, а также массовое внедрение «умных» сетей, формировалась как реакция на технологические, экономические и политико-социальные условия функционирования энергетического комплекса страны. Насколько эффективна такая стратегия для России, обладающей избытком мощностей порядка 20 ГВт и значительным запасом пропускной способности электросетевого хозяйства? В условиях, когда за все, в том числе и за излишки и резервы, платит конечный потребитель энергоресурсов, актуально говорить об оптимизации использования имеющихся активов, переходить от наращивания резервов под пиковые нагрузки и заявленную мощность к управлению потреблением и более точной и сбалансированной оценке фактической потребности в мощности. В таком ракурсе «умные» сети служат уже инструментом управления нагрузкой, а цифровизация с использованием методов непрерывного проектирования предоставляет средства оптимизации и повышения эффективности электросетевого комплекса. Именно таким образом можно уйти от привычной практики решения технологических проблем и производственной неэффективности за счет роста тарифов и экономических ограничений для потребителей.

Копирование опыта европейских стран по государственной поддержке, в том числе финансовой, внедрению интеллектуальных сетей не гарантирует получения сопоставимых положительных результатов. Кроме того, мировой опыт не так однозначен. Например, проект построения масштабной системы интеллектуального учета в электросетевом комплексе канадской провинции Онтарио показал, что планируемые изначально издержки были недооценены в два раза, а выгоды переоценены в 10 раз. За 10 лет было установлено 4,8 млн приборов, но в 2014 г. проект оказался на грани провала. В то же время имеются российские примеры положительного опыта в данной области. Их необходимо изучать и масштабировать.

При формировании российской стратегии цифрового преобразования электроэнергетики необходимо принимать во внимание, что национальная электроэнергетика существует в условиях международных санкций на поставки электроэнергетического оборудования, отсутствия производства ряда компонентов и целых классов энергетического оборудования на территории России, высокой стоимости заемного финансирования и низкой инвестиционной активности. Поэтому в стратегический документ необходимо включать вопросы преимущественного использования российских решений и технологий, создание стимулов для развития российского производства, а также инвестиционной привлекательности отраслевых проектов.

Но прежде всего парадигма цифровой экономики направлена на выстраивание новых связей в общей информационной среде. Основной принцип – открытый обмен цифровыми данными (в соответствии с политиками обращения данных различных категорий), использование платформенных решений. Обмен данными в едином цифровом пространстве приводит к горизонтальной и вертикальной интеграции как в рамках одного субъекта экономики, так и отрасли, а затем и национальной экономики в целом.

Цифровизация электроэнергетики должна охватывать следующие основные уровни:

- создание единого информационного поля, включая единую концептуальную информационную модель всей энергосистемы; единую метамодель, как язык взаимодействия; единые регистры объектов; единую систему идентификации; набор единых задач ориентированных классификаторов и справочников;
- создание единой распределенной технологической среды взаимодействия, построенной по сетевому принципу с распределенным хранением данных. Среда с такой архитектурой обеспечивает максимальную живучесть сети управления и возможность принятия решений по единым принципам на всех уровнях управления (децентрализованный интеллект и децентрализованное управление), а также дает основу горизонтальной и вертикальной интеграции между компаниями электроэнергетики, удаленными друг

от друга объектами электроэнергетики и всеми заинтересованными участниками взаимодействия на протяжении всей цепи создания стоимости. Она поддерживается едиными принципами построения, стандартами взаимодействия, политиками работы с данным;

- трансформация существующих моделей управления для максимизации положительных эффектов за счет использования возможностей цифровых технологий, ускорения обмена данными и повышения прозрачности и достоверности информации. Основным инструментом новых моделей управления должны стать системы поддержки принятия решений для задач разного уровня, обеспечивающие анализ информации с использованием технологий искусственного интеллекта, больших данных и т.п.

Ключевым базисом построения интеллектуальных систем управления объектами, системами и сетями электроэнергетики является непрерывное цифровое проектирование, которое включает в себя цифровые модели прогнозов и планирования, предназначенные для принятия и оценки сложных решений в отношении производства, процессов и проектирования; является обязательным условием для проецирования реальных процессов на цифровую модель в режиме реального времени (при условии почти мгновенной передачи данных в систему управления данными), позволяет смоделировать реальные сценарии и проанализировать развитие событий в течение определенного периода времени для разработки мер по устранению возможных проблем. В контур интеллектуального управления включаются как автоматические системы управления технологическими процессами и системы поддержки принятия решений различного уровня, так и линейный персонал, передающий и получающий информацию требуемого уровня и объема об объекте воздействия. Монитор становится не столько субъектом воздействия на энергообъект, но и участником процесса управления энергетической инфраструктурой. Это принципиально отличает цифровизацию от автоматизации производственных процессов. Использование цифровых тех-

нологий и платформенных решений позволяет предотвратить монополизацию функции учета энергопотребления. Наиболее перспективным необходимо признать отказ от использования замкнутых моделей интеллектуальных систем, создаваемых на базе одного из типов субъектов отрасли (ТСО, гарантирующих поставщиков и т.п.) и ориентированных на собственные приборы учета. Вместо этого данные, поступающие с интеллектуальных приборов учета, независимо от их балансовой принадлежности, должны предоставляться в соответствии с действующими политиками доступа к данным всем участникам рынка, соответствующим задаваемым регулятором критериям. Это позволит сохранить уже понесенные на установку приборов учета затраты, обеспечить конкурентный рынок интеллектуальных систем и приборов учета. При этом необходимо законодательно обеспечить доступность данных учета всем участникам производственной цепочки поставки электроэнергии и стимулировать развитие интеллектуальных систем путем сохранения полученной за счет их использования экономии.

Похожий подход к изменению моделей взаимодействия и созданию новых рынков видится перспективным и на уровне распределительных сетей, представленных в настоящее время множеством территориальных сетевых организаций (ТСО). Внедрение стандартов, определяющих единство осуществления функций сетевыми организациями для удовлетворения нужд потребителей, задает требуемый уровень качества оказания услуг энергоснабжения и оперативно-технологического управления, добиться которого позволит использование цифровых технологий. Крупные компании могут самостоятельно выстраивать подобные интеллектуальные системы управления, а также оказывать сервисные услуги более мелким ТСО, снижая их затраты на управление и повышая его качество. Такая консолидация ТСО посредством единого оперативно-технического управления без смены владельцев энергетической инфраструктуры как раз и возможна с использованием цифровых технологий и представляется наиболее легкодостижимой и ценной с точки зрения потребителей.

Учитывая значимость функциональной устойчивости электроэнергетической инфра-

структуры для национальной экономики и ее первоочередную задачу обеспечения потребностей в энергоресурсах, стратегия цифровизации должна носить эволюционный характер. Объем цифровизации определяется технико-экономическими характеристиками. Необходимо предотвратить ситуацию, когда цифровые преобразования ограничиваются только созданием информационно-коммуникационной инфраструктуры и дальнейшей автоматизацией без изменения моделей управления и взаимодействия, что приведет к отсутствию положительных результатов и эффектов цифровизации.

Концепции цифровизации отдельных компаний отрасли будут успешными, если они задаются в векторе двух стратегий: бизнес-стратегии и стратегии по внедрению цифровых технологий, а предлагаемые планы и мероприятия нацелены на развитие цифровых возможностей и компетенций компаний от понимания и моделирования своих технологических и бизнес-процессов до внедрения новых подходов и моделей взаимодействия.

О повышении конкурентоспособности российских компаний до мирового уровня можно говорить, когда они выходят на опережающий уровень цифровизации и используют такие понятия, как:

- выстраивание взаимодействий на основе платформенных решений;

- покупка/поставка эффектов вместо покупки/поставки конечного оборудования;
- постоянная аналитика и управление стоимостью жизненного цикла;
- клиентские сервисы высокого уровня – кастомизированный выбор услуги, а не автоматизация отдельных процессов взаимоотношения с клиентами (например, подачи и обработки заявки в электронном виде);
- использование цифрового двойника энергосистемы и т.п.

Кроме того, необходимо учитывать технико-экономические характеристики преобразований. Затраты на цифровизацию должны окупаться, проекты должны быть интересны для потенциальных инвесторов и не ложиться дополнительной тарифной нагрузкой на потребителя.

Свою задачу Минэнерго, как основной регулятор отрасли, представляющий государственные интересы, видит в организации и упорядочении процессов цифровой трансформации, создании условий для внедрения цифровых технологий и формирования единого информационного пространства, обеспечивая при этом энергетическую стабильность национальной экономики и сдерживая рост тарифной нагрузки для потребителей.

Поступила в редакцию
10.09.2018 г.

УДК 004.89:620.9

Л.В. Массель¹

МЕТОДЫ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НАУЧНОГО ОБОСНОВАНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация. Рассматриваются проблемы перехода к цифровой энергетике. Выделяется проблема недостаточного использования результатов, имеющихся в научных организациях энергетического профиля. Обращается внимание на необходимость интеллектуальной поддержки обоснования и принятия стратегических решений по развитию технологической инфраструктуры (цифровой трансформации энергетики). Предлагается подход к решению проблемы интеграции программных средств, информационного обеспечения и интеллектуальных информационных технологий, разработанных в ИСЭМ СО РАН. Рассмотрены – архитектура многоагентной интеллектуальной среды, обеспечивающей эту интеграцию, и методический многоагентный подход к ее разработке.

Ключевые слова: цифровая энергетика, интеллектуальные информационные технологии, математическое и семантическое моделирование, управление знаниями, фрактальная стратифицированная модель, многоагентные системы.

L.V. Massel²

METHODS AND INTELLIGENT TECHNOLOGIES FOR SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF STRATEGIC SOLUTIONS ON DIGITAL TRANSFORMATION OF ENERGY INDUSTRY

Abstract. The problems of transition to digital power engineering are considered. The problem of insufficient use of the results available in scientific organizations of the energy profile is highlighted. Attention is drawn to the need for intelligent support for the justification and adoption of strategic decisions on the development of technological infrastructure (digital transformation of energy industry). The approach to the solution of the problem of integration of software, information support and intelligent information technologies developed at ISEM SB RAS is proposed. The architecture of the multi-agent intelligent environment providing this integration, and the methodological multi-agent approach to its development are considered.

Keywords: digital power engineering, intelligent information technologies, mathematical and semantic modeling, knowledge management, fractal stratified model, multi-agent systems.

Введение

В связи с распространением концепций интеллектуальной (Smart Grid) [1-2] и цифровой [3] энергетики необходимо учитывать, что при решении проблем перехода к интеллектуальным энергетическим системам (ИЭС) выделяют две взаимосвязанные области: технологическую и информационно-телекоммуникационную инфраструктуры. Успех создания ИЭС во многом зависит от успешного применения современных

информационных технологий. В свою очередь, говорить о применении последних имеет смысл при наличии развитой современной технологической инфраструктуры. Решения по развитию технологической инфраструктуры, безусловно, относятся к классу стратегических.

Для обоснования и поддержки принятия таких решений целесообразно привлечение интеллектуальных информационных технологий. В первую очередь это технологии семантического моделирования и управления знаниями,

¹ Людмила Васильевна Массель – главный научный сотрудник, д.т.н., профессор, *e-mail*: massel@isem.irk.ru, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН.

² Lyudmila V. Massel – Chief Researcher, Doctor of Engineering, Professor, *e-mail*: massel@isem.irk.ru, Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

которые коллектив под руководством автора развивает и использует для создания интеллектуальных систем поддержки принятия стратегических решений в энергетике. Предложен подход к построению интеллектуальной системы поддержки принятия стратегических решений по развитию энергетики (многоагентной инструментальной среды), интегрирующей разработанные в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН математические и семантические методы, модели и инструментальные средства их поддержки.

Проблемы перехода к цифровой энергетике

Актуальность научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики обусловлена необходимостью решения ряда возникающих при этом проблем. Как отмечается в экспертно-аналитическом докладе Центра стратегических разработок «Цифровой переход в электроэнергетике России» [4], во многих развитых странах мира реализуются сценарии, трансформирующие электроэнергетику на базе клиентоцентричных распределенных архитектур энергосистем (данное направление принято называть Energy Transition – энергетический переход). Данный переход ориентирован на масштабное использование распределенной возобновляемой энергетики, вовлечение частных инвестиций и формирование децентрализованных рынков. Он также подразумевает интеллектуализацию инфраструктуры и переход потребителей к активным, просьюмерским моделям поведения: потребители превращаются в поставщиков электроэнергии. Вызовы для российской электроэнергетики имеют свои особенности, что связано с избытком традиционных топливно-энергетических ресурсов, большой и протяженной территорией с низкой плотностью сети населенных мест, специфическими социально-экономическими факторами. Но в то же время они перекликаются с глобальными вызовами и вызовами для стран с похожими условиями.

Речь идет о переходе к новой технологической парадигме в электроэнергетике, представляющей организацию энергоснабжения в розничном секторе как экосистему производителей и

потребителей энергии, которые беспрепятственно интегрируются в общую инфраструктуру и обмениваются энергией. Такой подход, по аналогии осуществляемых взаимодействий, также получил название «интернет энергии» (Internet of Energy) [4].

В то же время существует ряд проблем, возникающих при переходе к цифровой энергетике. Все проблемы, связанные с цифровой трансформацией энергетики, то есть с реализацией и применением в России интегрированных интеллектуальных энергетических систем в целом и информационно-телекоммуникационных технологий в частности, можно условно разделить на три класса: когнитивные и управленческие проблемы, научные и технологические ограничения и кадровые проблемы [5].

К когнитивным и управленческим проблемам можно отнести:

1. Отсутствие концепции и целевого видения на государственном уровне, что выражается в дисбалансе между стратегическими целями государства и реализуемыми тактическими задачами на уровне отдельных министерств и энергетических корпораций.
2. Отсутствие механизма согласования интересов между всеми субъектами.
3. Отсутствие законодательной базы: действующие нормативно-правовые акты и нормативно-техническая документация не учитывают возможности и не стимулируют применение цифровых технологий.
4. Отсутствие экономических стимулов для перехода к цифровой энергетике, финансирование старых технологий и имитация инновационной деятельности.

На эти проблемы накладываются научные и технологические ограничения:

- дефицит научных исследований и доступных прикладных технологических решений в области цифровой энергетики;
- отсутствие единой терминологии, детальной концепции и архитектуры цифровой энергетики;
- отсутствие цифровых устройств на энергетических объектах в достаточных количествах, что ухудшает наблюдаемость энергетической системы в целом;

- отсутствие доверенной среды передачи технологических данных;
- отсутствие единой согласованной методики оценки эффекта от внедрения элементов цифровой энергетики.

В свою очередь это усугубляется кадровыми проблемами:

- существующий дефицит кадров связан, в первую очередь, с отсутствием механизмов подготовки и перераспределения кадров;
- недостаточный уровень образования и квалификации, отсутствие практических знаний персонала и исполнителей для перехода на цифровые технологии;
- отсутствие проблемно-ориентированных профессиональных сообществ: ученых, инженеров и др., в которых бы велись обсуждения проблем и перспектив применения цифровых технологий в области энергетики.

В [4] предлагается в качестве одной из мер институционального и организационного характера «создать российское агентство передовых исследований и разработок в сфере энергетики (по аналогии с ARPA-E в США)». При этом игнорируется опыт системных исследований энергетики и результаты исследований как ИСЭМ СО РАН, так и других научно-исследовательских организаций энергетического профиля.

Системные исследования энергетики

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева является одним из лидеров в области системных исследований в энергетике России. Основные научные направления ИСЭМ СО РАН: теория создания энергетических систем, комплексов и установок и управления ими; научные основы и механизмы реализации энергетической политики России и ее регионов. В рамках этих направлений выполняются: исследования систем энергетики (электроэнергетических, газо-, нефте-, нефтепродукто-снабжения, теплосиловых); энергетической безопасности России; региональных проблем энергетики; взаимосвязей энергетики и экономики; перспективных энергетических источников и систем;

исследования в области прикладной математики и информатики [6].

Основным инструментом исследований до последнего времени являлись математическое моделирование и вычислительный эксперимент. В связи с новыми трендами развития российской энергетики (интеллектуальная (Smart Grid) и цифровая энергетика) большое внимание уделяется развитию и применению интеллектуальных технологий. Реализуемая в России программа «Цифровая экономика» в настоящее время развивается и дорабатывается. В частности, автор считает, что в федеральном проекте «Цифровая энергетика» уделяется недостаточно внимания таким направлениям, как интеллектуальная поддержка принятия стратегических решений по развитию технологической инфраструктуры энергетики и обеспечение кибербезопасности критически важных энергетических объектов. Ниже рассмотрим подробнее первое направление. Большую роль в принятии стратегических решений должно играть их научное обоснование, для чего могут быть использованы научные наработки института.

Традиционно в ИСЭМ СО РАН принята иерархическая схема исследований, в которой согласовываются исследования и математические модели топливно-энергетического комплекса (используются экономико-математические модели) и отраслевых систем энергетики (применяются физико-математические модели) (рис. 1). Исследования прогнозирования развития ТЭК выполняются на верхнем уровне с учетом результатов, полученных при исследованиях направлений развития отраслевых систем энергетики на следующих уровнях. Каждому блоку приведенной схемы соответствует совокупность математических методов, моделей и программные комплексы, с помощью которых выполняются вычислительные эксперименты с использованием этих моделей [6].

Для использования результатов этих исследований при обосновании стратегических решений по цифровой трансформации энергетики требуется выполнить формализованную интеграцию программных средств и информационного обеспечения с целью совершенствования иерархической технологии обоснования развития энергетики в целом и ее отраслевых и терри-

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

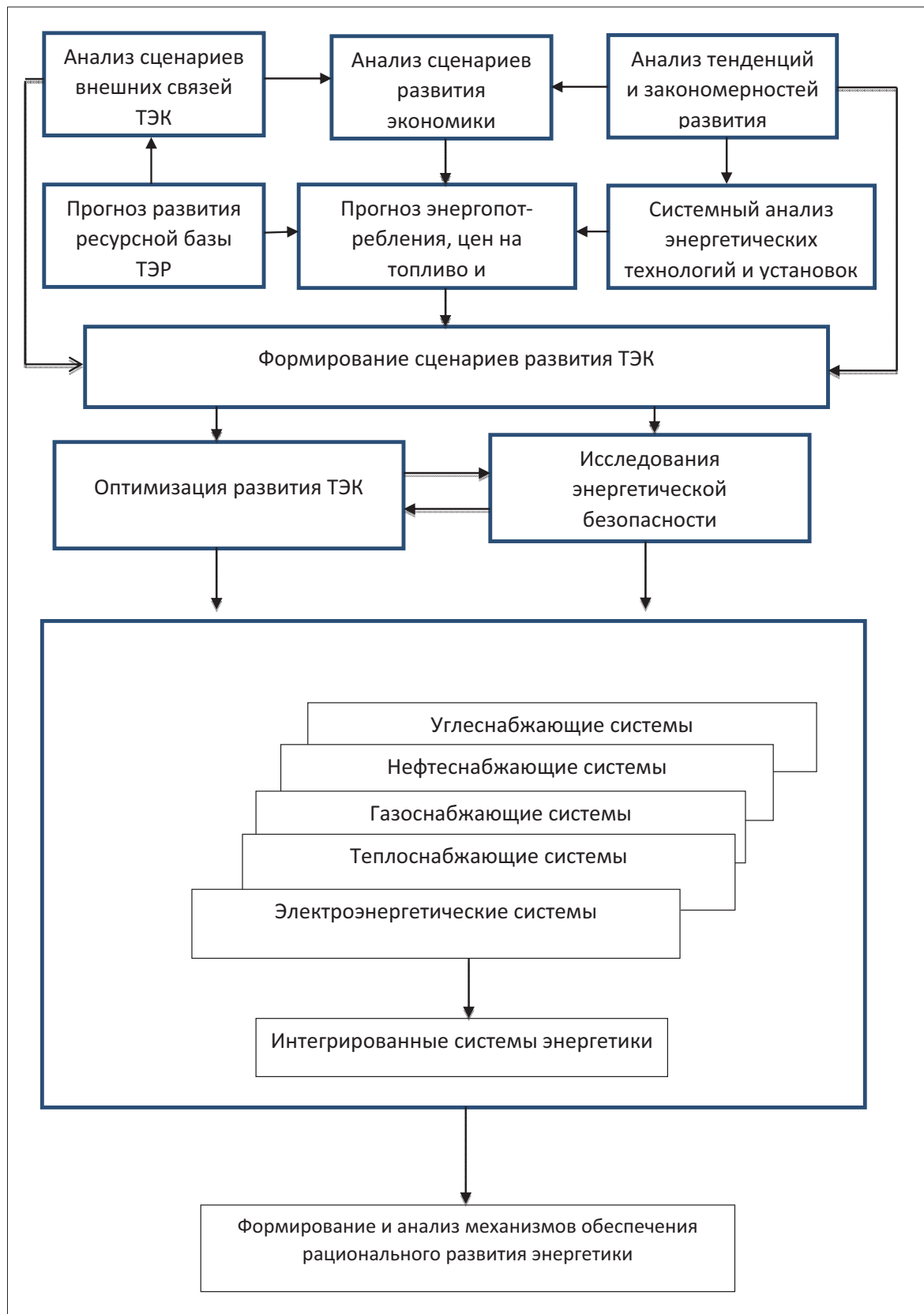


Рис. 1. Общая схема исследований по обоснованию развития энергетики

ториальных составляющих, при этом основное внимание необходимо уделить разработке программно-информационных интерфейсов между решаемыми задачами в горизонтальном (между отдельными системами энергетики) и вертикальном (системы энергетики – ТЭК – внешние условия) разрезах.

Разработка и реализация таких интерфейсов должна обеспечивать следующие преимущества комплексной иерархической технологии исследований:

а) сохранение (при необходимой доработке требуемых программных средств – обеспечение) конфиденциальности основных детальных массивов данных, поддерживающих конкретные задачи;

б) формализацию и тем самым ускорение обмена информацией и обеспечение однозначности обмениваемых данных;

в) определенную унификацию используемых информационных моделей при решении различных задач, которую потребуются реализовать при согласовании и разработке интерфейсов;

г) в целом повышение «стройности» и обоснованности иерархической технологии обоснования развития энергетики и ее составляющих.

Предлагаемый подход к решению проблемы интеграции программных средств, информационного обеспечения и интеллектуальных информационных технологий

Реализация изложенных интеграционных возможностей может быть обеспечена на базе следующих информационных технологий:

а) единой информационно-коммуникационной среды программных компонентов;

б) семантической интеграции данных, знаний и программных компонентов;

в) инструментальных средств ситуационного управления и семантического моделирования.

Предлагается реализация единой информационно-коммуникационной среды взаимодействия программных компонентов в виде облачного сервиса, что позволит обеспечить сетевой доступ по требованию к общему пулу конфигурируемых вычислительных ресурсов (напри-

мер к серверам, устройствам хранения данных, приложениям и сервисам и пр.). Для обеспечения необходимого уровня безопасности целесообразно выполнять реализацию информационно-коммуникационной среды в виде корпоративного облака [7].

Для семантической интеграции данных, знаний и программных компонентов предлагается использовать концепцию управления знаниями и применить как методологический, фрактальный подход к структурированию знаний [8].

Суть его состоит в том, что вводятся понятия информационного пространства и информационных миров (подпространств). ФС-модель определяется как совокупность непересекающихся слоев (информационных миров) и их отображений в информационном пространстве. Каждому уровню соответствует свой слой (страта) этого пространства и, следовательно, свой информационный мир; последовательность отображений отражает процесс познания. Графически ФС-модель удобно представлять в виде совокупности вложенных сферических оболочек. Информационный объект, обозначаемый условно точкой на одной из сфер, в свою очередь, может быть расслоен при необходимости более детального его рассмотрения. Вводятся отображения из любого слоя в каждый. Поскольку мы, как правило, рассматриваем часть информационного пространства (свой «фрактал» знаний), его можно представить «вырезкой» из информационного пространства, которую можно представить в виде конуса или пирамиды, что соответствует, например, выделению дисциплин при изучении реального мира.

В управлении знаниями выделяют два подхода: классический (на основе комбинирования существующих, уже зарекомендовавших себя технологий для поддержки различных подпроцессов работы со знаниями) и семантический (основанный на использовании взаимосвязанного набора методов и технологий по работе со смыслом, семантикой данных, информации и знаний) [9].

В рамках последнего подхода рассматриваются онтологии предметных областей, технологии их построения и сопровождения, семантические метаданные, семантический поиск, системы логического вывода, семантическое

профилирование знаний экспертов, семантические порталы и сети и т.п., сопровождающиеся соответствующей технологической поддержкой в части языков описания, моделей, программных инструментов и систем. Коллектив, возглавляемый автором, развивает второй подход.

Для обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики предлагается интегрировать средства математического и семантического моделирования. Ниже рассмотрим понятия и содержание семантического моделирования.

Под *семантической моделью* в обобщенном виде понимается информационная модель, отражающая понятия предметной области и отношения между ними. Рассматривается семантическое моделирование на примере онтологических, когнитивных, событийных и вероятностных (на основе Байесовских сетей доверия) моделей [10-11]. В табл. 1 приведено сравнение технологий семантического моделирования.

Под *онтологическим моделированием* понимается построение онтологий как в графическом, так и формализованном виде. Онтологии определяют как базу знаний специального вида, или как «спецификацию концептуализации» предметной области [12]. Последнее означает процесс классификации базовых терминов предметной области с определением основных понятий (концептов) и установлением связей

между ними. В свою очередь, процесс спецификации заключается в описании онтологии в графическом виде («легкие», или эвристические онтологии) или на одном из формальных языков (XML, RDFS, OWL и др.) («тяжелые», или логические онтологии). Для работы с экспертами коллектив, представляемый автором, использует графическое представление онтологий; для хранения онтологий используется их представление на языке XML.

Когнитивные моделирование – построение когнитивных моделей, или, иначе, когнитивных карт (ориентированных графов), в которых вершины соответствуют факторам (концептам), а дуги – связям между факторами (положительным или отрицательным), в зависимости от характера причинно-следственного отношения. В простейшем случае веса связей могут иметь значения +1 или -1 либо принимать нечеткие значения из отрезка [-1, 1], или некоторой лингвистической шкалы, что в наибольшей степени соответствует качественному анализу [13].

Событийное моделирование – построение поведенческих моделей, причем в качестве объектов моделирования могут выступать как люди, так и технические объекты. Сущность событийного метода моделирования заключается в отслеживании на модели последовательности событий в том же порядке, в каком они происходили бы в реальной системе. Задаваемые мо-

Таблица 1

Сравнение технологий онтологического, когнитивного, событийного и вероятностного моделирования

Технология	Назначение	Аппарат для формализованного представления	Использование в исследованиях энергетической безопасности
Онтологическое моделирование	Для описания декларативных фрагментов знаний	Онтологии (специальные языки (OWL, RDF, XML и др.))	Для выявления, классификации и спецификации концептов (основных понятий в исследованиях энергетики)
Когнитивное моделирование	Для выявления причинно-следственных связей концептов	Когнитивные карты (теория графов)	Для анализа угроз ЭБ
Событийное моделирование	Построение поведенческих моделей. Выявление динамики развития ЧС	Событийные карты (теория Joiner-сетей)	Для анализа развития и последствий ЧС
Вероятностное моделирование	Построение вероятностных моделей. Оценка риска реализации угроз	Аппарат Байесовских сетей доверия	Для оценки рисков возникновения ЧС

делью последовательности реализации событий – цепочки событий – описывают сценарии реакции системы на возникновение инициирующего события, стоящего в начале цепочки. В результате событийная модель позволяет получить множество альтернативных сценариев развития заданной ситуации в системе, что и является основной целью событийного моделирования [14].

Вероятностное моделирование – построение графических моделей, отображающих вероятностные зависимости множества переменных, и позволяющих проводить вероятностный вывод с помощью этих переменных. Последние публикации в этой области объединили в себе результаты исследований, выполненных преимущественно в 1980-е годы XX века. Результаты применения этого подхода в энергетике рассмотрены, например, в [15].

Семантические модели разрабатываются на основе знаний экспертов и позволяют использовать как явные, так и неявные знания, основанные на опыте, эрудиции и интуиции экспертов. Например, когнитивные модели, позволяющие отображать причинно-следственные связи, могут быть применены для описания и анализа сценариев внешних связей ТЭК, развития экономики и ТЭК. Событийные и вероятностные модели позволяют рассмотреть варианты развития различных ситуаций, определяемых выбранными сценариями. После экспертной оценки различных вариантов развития с использованием семантических моделей привлекаются традиционные программные комплексы, реализующие математические модели отраслевых систем энергетики и ТЭК и решаются задачи оптимизации для обоснования рекомендуемых решений.

Концепция ситуационного управления используется в соответствии с работами Д.А. Поспелова и его учеников [16]. В последнее время предлагается использовать эту концепцию для оперативного управления, но автор считает, что целесообразно применить ее в области обоснования стратегических решений. Используется современная трактовка ситуационного управления, сформулированная в [17]. Применение концепции ситуационного управления для обоснования и поддержки принятия решений по обеспечению энергетической безопасности рассмотрено, в частности, в [18].

Для обоснования стратегических решений в энергетике предлагается интегрировать средства математического и семантического моделирования [19]. При этом применяются как базовые технологии – агентно-ориентированные и облачные вычисления, так и проблемно-ориентированные – семантическое и математическое моделирование и двухуровневая технология исследований, интегрирующая семантическое и математическое моделирование и поддерживающая ее интеллектуальная ИТ-среда, включающая инструментальные средства семантического моделирования и обеспечивающая возможность интеграции с традиционными программными комплексами (рис. 2) [11].

Инструментальные средства поддерживающие верхний, качественный уровень предложенной технологии, обведены пунктиром. *OntoMap*, *CogMap*, *EventMap* и *Bayesian Nets* – соответственно средства поддержки онтологического, когнитивного, событийного и вероятностного моделирования, геокомпонент – инструментальное средство 3D-геовизуализации. Показанное справа вверху «Средство интеллектуального преобразования и контроля данных» обеспечивает интеграцию семантических и математических моделей, реализованных в многоагентном ПК *ИНТЭК-М*, используемом на втором, количественном уровне предложенной технологии для оценки состояния и прогнозирования вариантов развития топливно-энергетического комплекса. Экспертная система *Emergency* содержит прецеденты экстремальных ситуаций в энергетике, которые могут быть использованы при построении семантических моделей.

Для схемы, приведенной на рис. 1, выделяются следующие уровни (этапы) исследований и поддерживающие их инструментальные средства (рис. 3). Интеграция инструментальных средств осуществляется с помощью языка управления знаниями:

1. Уровень анализа (используется семантическое моделирование), поддерживается интеллектуальной ИТ-средой.

2. Уровень коллективной выработки согласованных решений (может использоваться, в том числе, семантическое моделирование, методы согласования решений) – поддерживается интеллектуальной системой поддержки коллективной экспертной деятельности [20].

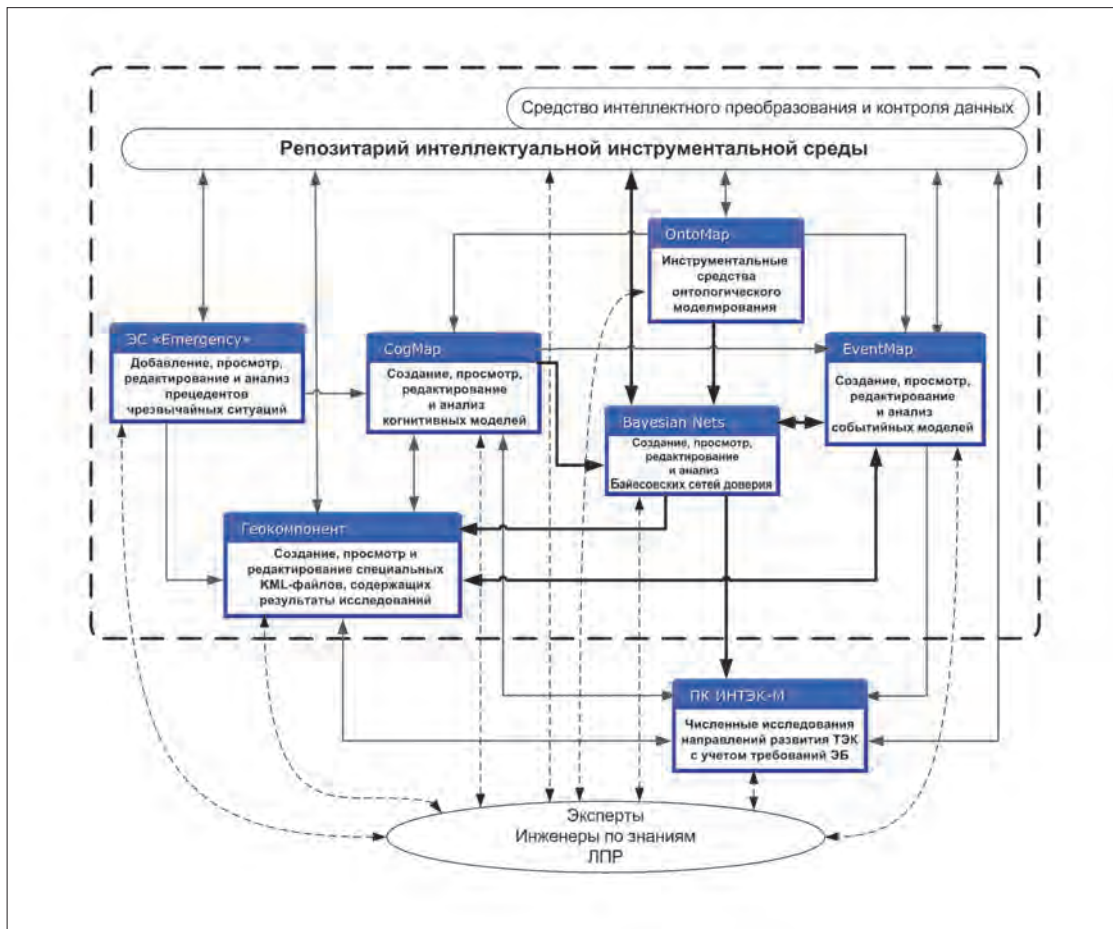


Рис. 2. Взаимодействие инструментальных средств интеллектуальной IT-среды

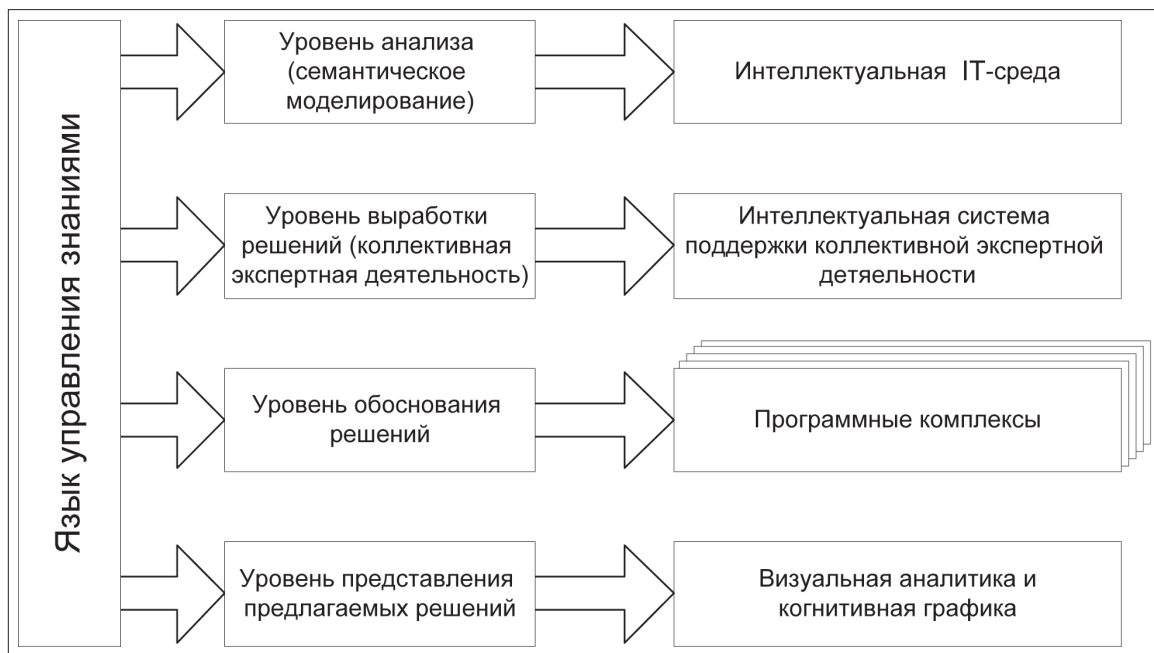


Рис. 3. Уровни (этапы) исследований и поддерживающие их инструментальные средства

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

3. Уровень обоснования решений (выполняются расчеты вариантов, предложенных на предыдущем этапе, с использованием традиционных программных комплексов для исследований ТЭК и СЭ).

4. Уровень представления предлагаемых решений (используются средства визуальной аналитики и когнитивной графики).

Для поддержки принятия стратегических решений в энергетике с использованием предложенного методического подхода и научных прототипов инструментальных средств разработана архитектура многоагентной интеллектуальной среды (МАИС) (рис. 4).

Основными компонентами (агентами) МАИС являются:

1. Программные комплексы и базы данных для исследований ТЭК и проблем энергетической безопасности (в перспективе – программные комплексы и базы данных для исследований отраслевых систем энергетики).

2. Хранилище данных и знаний (для хранения баз знаний, семантических моделей и баз данных).

3. Интеллектуальная ИТ-среда для поддержки семантического моделирования, интегрирующая инструментальные средства OntoMap, CogMap, EventMap, BayNet и компонент для интеграции семантических и математических моделей.

4. Интеллектуальная система поддержки коллективной экспертной деятельности, интегрирующая

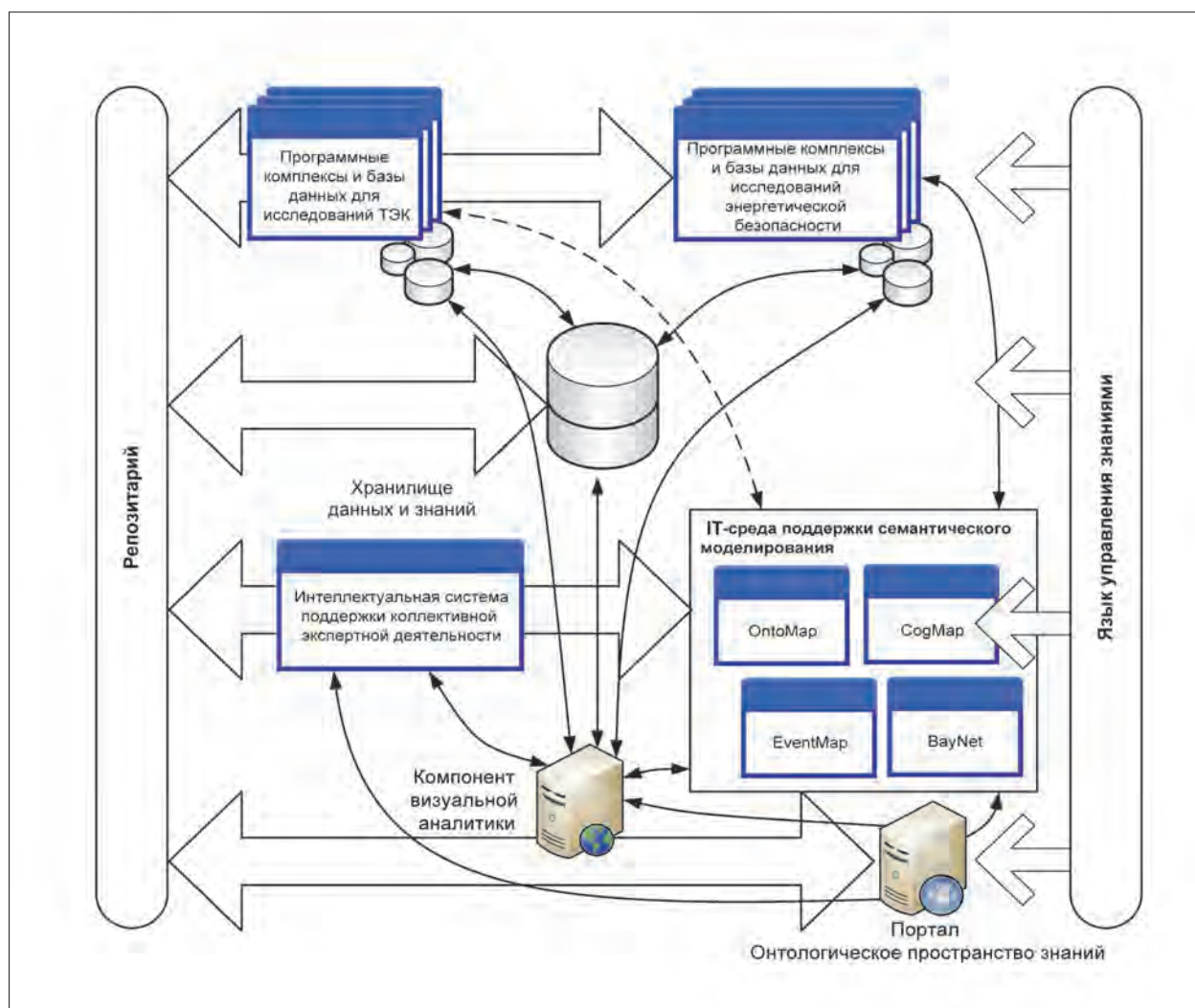


Рис. 4. Архитектура многоагентной интеллектуальной среды (МАИС)

ющая проблемно-ориентированные экспертные системы и обеспечивающая поддержку согласования экспертных решений.

5. Средства визуальной аналитики и когнитивной графики, основанные на 3D-визуализации (развитие геокомпонента).

6. Репозиторий для хранения описаний всех интеллектуальных и информационных ресурсов, поддерживаемых МАИС.

7. Язык управления знаниями (Knowledge Management Language – KML) для обеспечения взаимосвязи и взаимодействия всех компонентов (агентов) МАИС.

8. Портал, поддерживающий онтологическое пространство знаний в области энергетики.

Для реализации МАИС предлагается использовать авторский подход [21] к построению многоагентных систем (рис. 5).

Новизна его определяется тем, что предлагается метод управления взаимодействием агентов на основе алгебраических сетей, для реализации которого разрабатываются событийные модели сценариев взаимодействия агентов. Этот подход апробирован В.И. Гальперовым при разработке многоагентной системы оценивания состояний электроэнергетических сетей.

В настоящее время коллективом, возглавляемым автором, разработан ряд научных прототипов базовых компонентов, которые могут быть применены при реализации МАИС. Для полноценного включения в МАИС ПК и БД для исследований ТЭЖ и отраслевых СЭ, как агентов (п. 1), потребуется их реинжиниринг, поскольку большинство из них перешли в категорию унаследованного программного обеспечения. На первом этапе можно ограничить их



Рис. 5. Основные составляющие методического подхода к построению МАС

включение информационным обменом. В этом случае исследования выполняются автономно, а их результаты передаются в ХДЗ, а факт передачи фиксируется в репозитории.

В приведенную архитектуру не включаются средства обеспечения кибербезопасности, так как это должен быть комплекс мер, учитывающих возможные киберуязвимости и отражающих современное состояние средств киберзащиты (предотвращения кибератак); у авторов также имеются наработки в этой области [22].

Заключение

В статье рассмотрены проблемы перехода к цифровой энергетике, одной из которых является, с одной стороны, дефицит научных исследований и доступных прикладных технологических решений в этой области, а с другой – недостаточное внимание к существующим заделам в области исследований энергетике. Отмечается, что в концепции цифровой энергетике не уде-

ляется внимание таким направлениям, как интеллектуальная поддержка принятия стратегических решений по развитию технологической инфраструктуры энергетике и обеспечения кибербезопасности критически важных энергетических объектов. Предлагается для устранения этих недостатков использовать результаты исследований ИСЭМ СО РАН, направленные на разработку многоагентных интеллектуальных систем для обоснования и поддержки принятия стратегических решений. Для их реализации целесообразна интеграция существующих заделов в области математического и семантического моделирования, ситуационного управления, агентных, облачных и интеллектуальных вычислений. Рассмотрены: методический подход, архитектура многоагентной интеллектуальной среды, интегрирующей разнородные компоненты, и состояние разработки. Результаты получены при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 16-07-00474, 16-07-00569, № 18-07-00714, № 18-57-81001.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Воропай Н.И., Стенников В.А. *Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Изв. РАН. Энергетика*. – № 1. – 2014. – С. 64-78.

3. *Федеральный проект «Цифровая энергетика»*. URL: <http://minsvyaz.ru/uploaded/files/programma.pdf> (дата доступа 7.08.2018).

4. *Экспертно-аналитический доклад «Цифровой переход в электроэнергетике России»*. URL: <https://www.csr.ru/issledovaniya/tsifrovoy-perehod-v-elektroenergetike-rossii/> (дата доступа 10.08.2018).

5. *Материалы 2-й отраслевой конф. «Цифровая трансформация электроэнергетики России»*, Москва, октябрь 2017. URL: <http://digitenergy.ru/> (дата доступа 13.11.2017)

6. *Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай*. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.

7. Массель Л.В., Грибова В.В., Копайгородский А.Н. «Облачная» структура энергоинформационных систем // В кн.: *Инновационная электроэнергетика-21 / под ред. Батенина В.М., Бушуева В.В., Воропай Н.И.* – М.: Энергия, 2017. – С. 556-577.

8. Массель Л.В. *Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения / Онтология проектирования*. – 2016. – Т. 6, №2 (20). – С. 149-161. – DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.

9. Тузовский А.Ф., Чириков С.В., Ямпольский В.З. *Системы управления знаниями (методы и технологии)*. – Томск: изд-во НТЛ, 2005. – 260 с.

10. Массель Л.В., Массель А.Г. *Семантические технологии на основе интеграции онтологического, когнитивного и событийного моделирования // III Международная научно-техническая конф. OSTIS-2013: труды*. Минск. БГУИР, 2013. – С. 247-250.

11. Массель Л.В., Массель А.Г. *Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетике // Изв. ТПУ 2012*. – Т. 321.

- № 5. Управление, вычислительная техника и информатика. – С. 135-141.
12. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб: Питер, 2001. – 384 с.
13. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. М.: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.
14. Столяров Л.Н. Философия событийного моделирования на примере сценария энергетической катастрофы. Международная конф. «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе»: труды. Гурзуф, 2010. – С. 197-200.
15. Массель Л.В., Пяткова Е.В. Применение Байесовских сетей доверия для интеллектуальной поддержки исследований проблем энергетической безопасности // Вестник ИрГТУ. – № 2. – 2012. – С. 8-13.
16. Поспелов Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика. М.: Наука. 1986. – 284 с.
17. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М.: Радиотехника. 2009. – 392 с.
18. Пяткова Н.И., Массель Л.В., Массель А.Г. Методы ситуационного управления в исследованиях проблем энергетической безопасности // Изв. РАН. Энергетика. – № 4. – 2016. – С. 156-163.
19. Массель Л.В. Интеграция семантического и математического моделирования в исследованиях проблем энергетической безопасности. Международная конф. «Моделирование-2012»: труды. Киев. ИПМЭ НАН Украины, 2012. – С. 270-273.
20. Копайгородский А.Н. Управление знаниями в коллективной экспертной деятельности по обоснованию рекомендуемых решений в энергетике / Труды XX Российской научной конф. «Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ – 2017)». М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова. – С. 128-135.
21. Массель Л.В., Гальперов В.И. Разработка многоагентных систем распределенного решения энергетических задач с использованием агентных сценариев // Изв. ТПУ. – Т. 326. – № 5. – 2015. – С. 45-53.
22. Массель А.Г. Методика анализа угроз и оценки риска нарушения информационно-технологической безопасности энергетических комплексов / Труды XX Байкальской всероссийской конф. «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Т. 3. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 186-195.

REFERENCES

1. Kobets B.B., Volkova I.O. Innovatsionnoye razvitiye elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid. М.: Energiya, 2010. – 208 s. (in Russian).
2. Voropay N.I., Stennikov V.A. Integrirovannyye intellektual'nye energeticheskiye sistemy // Izv. RAN. Energetika. – № 1. – 2014. – S. 64-78 (in Russian).
3. Federal'nyy proyekt «Tsifrovaya energetika». URL: <http://minsvyaz.ru/uploaded/files/programma.pdf> (data dostupa 7.08.2018).
4. Ekspertno-analiticheskiy doklad «Tsifrovoy perehod v elektroenergetike Rossii». URL: <https://www.csr.ru/issledovaniya/tsifrovoj-perehod-v-elektroenergetike-rossii/> (data dostupa 10.08.2018).
5. Materialy 2-y otraslevoy konf. «Tsifrovaya transformatsiya elektroenergetiki Rossii», Moskva, oktyabr' 2017. URL: <http://digitenergy.ru/> (data dostupa 13.11.2017).
6. Sistemnyye issledovaniya v energetike: Retrospektiva nauchnykh napravleniy SEI-ISEM / otv. red. N.I. Voropay. – Novosibirsk: Nauka, 2010. – 686 s. (in Russian).
7. Massel' L.V., Gribova V.V., Kopyagorodskiy A.N. «Oblachnaya» struktura energoinformatsionnykh sistem // V kn.: Innovatsionnaya elektroenergetika-21 / pod red. Batenina V.M., Bushuyeva V.V., Voropaya N.I. – М.: Energiya, 2017. – S. 556-577 (in Russian).
8. Massel' L.V. Fraktal'nyy podkhod k strukturirovaniyu znaniy i primery ego primeneniya / Ontologiya proyektirovaniya. – 2016. – Т. 6, № 2 (20). – S. 149-161. – DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161 (in Russian).
9. Tuzovskiy A.F., Chirikov S.V., Yampol'skiy V.Z. Sistemy upravleniya znaniyami (metody i tekhnologii). – Tomsk: izd-vo NTL, 2005. – 260 s. (in Russian).

10. Massel' L.V., Massel' A.G. *Semanticheskiye tekhnologii na osnove integratsii ontologicheskogo, kognitivnogo i sobytiynogo modelirovaniya // III Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konf. OSTIS-2013: trudy. Minsk. BGUIR, 2013. – S. 247-250 (in Russian).*
11. Massel' L.V., Massel' A.G. *Intellektual'nyye vychisleniya v issledovaniyakh napravleniy razvitiya energetiki // Izv. TPU 2012. – T. 321. – № 5. Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika. – S. 135-141 (in Russian).*
12. Gavrilova T.A., Khoroshevskiy V.F. *Bazy znaniy intellektual'nykh sistem. – SPb: Piter, 2001. – 384 s. (in Russian).*
13. Trakhtengerts E.A. *Komp'yuternaya podderzhka prinyatiya resheniy. M.: SINTEG, 1998. – 376 s. (in Russian).*
14. Stolyarov L.N. *Filosofiya sobytiynogo modelirovaniya na primere stsensariya energeticheskoy katastrofy. Mezhdunarodnaya konf. «Informatsionnyye tekhnologii v nauke, obrazovanii, telekommunikatsii i biznese»: trudy. Gurzuf, 2010. – S. 197-200 (in Russian).*
15. Massel' L.V., Pyatkova Ye.V. *Primeneniye Bayesovskikh setey doveriya dlya intellektual'noy podderzhki issledovaniy problem energeticheskoy bezopasnosti // Vestnik IrGTU. – № 2. – 2012. – S. 8-13 (in Russian).*
16. Pospelov D.A. *Situatsionnoye upravleniye. Teoriya i praktika. M.: Nauka. 1986. – 284 s. (in Russian).*
17. Vasil'yev V.I., Il'yasov B.G. *Intellektual'nyye sistemy upravleniya. Teoriya i praktika. M.: Radiotekhnika. 2009. – 392 s. (in Russian).*
18. Pyatkova N.I., Massel' L.V., Massel' A.G. *Metody situatsionnogo upravleniya v issledovaniyakh problem energeticheskoy bezopasnosti // Izv. RAN. Energetika. – № 4. – 2016. – S. 156-163 (in Russian).*
19. Massel' L.V. *Integratsiya semanticheskogo i matematicheskogo modelirovaniya v issledovaniyakh problem energeticheskoy bezopasnosti Mezhdunarodnaya konf. «Modelirovaniye-2012»: trudy. Kiyev. IPME NAN Ukrainy, 2012. – S. 270-273 (in Russian).*
20. Kopaygorodskiy A.N. *Upravleniye znaniyami v kollektivnoy ekspertnoy deyatel'nosti po obosnovaniyu rekomenduyemykh resheniy v energetike / Trudy XX Rossiyskoy nauchnoy konf. «Inzhiniring predpriyatii i upravleniye znaniyami (IP&UZ – 2017)». M.: REU im. G.V. Plekhanova. – S. 128-135 (in Russian).*
21. Massel' L.V., Gal'perov V.I. *Razrabotka mnogoagentnykh sistem raspredelennoy resheniya energeticheskikh zadach s ispol'zovaniyem agentnykh stsensariyev // Izv. TPU. – T. 326. – № 5. – 2015. – S. 45-53 (in Russian).*
22. Massel' A.G. *Metodika analiza ugroz i otsenki riska narusheniya informatsionno-tekhnologicheskoy bezopasnosti energeticheskikh kompleksov / Trudy XX Baykal'skoy vserossiyskoy konf. «Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii». T. 3. – Irkutsk: ISEM SO RAN, 2015. – S. 186-195 (in Russian).*

Поступила в редакцию
19.09.2018 г.

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 изолировано. 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 // Energoexpert. – 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. – M.: 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.

УДК 621.311.1

Н.И. Воропай, И.Н. Колосок, Е.С. Коркина, А.Б. Осак¹

ПРОБЛЕМЫ УЯЗВИМОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация. Развитие электроэнергетических систем (ЭЭС) на основе инновационных технологий и технологической платформы интеллектуальной энергосистемы радикально изменит структуру и свойства будущих систем, порождая новые проблемы в их функционировании. В статье анализируется трансформация свойств ЭЭС по мере их цифровизации, в результате чего информационно-коммуникационная подсистема становится сопоставимой по сложности и уязвимости с физической подсистемой. Это актуализирует проблемы живучести таких киберфизических ЭЭС и обеспечения их кибербезопасности.

Ключевые слова: электроэнергетические системы (ЭЭС), киберфизические ЭЭС, живучесть, упругость, кибербезопасность.

N.I. Voropai, I.N. Kolosok, E.S. Korkina, A.B. Osak²

ПРОБЛЕМЫ УЯЗВИМОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Abstract. Electric power system (EPS) development based on innovative technologies and technological platform of Smart Grid will radically change structure and properties of future systems, what will lead new problems in their operation. The paper deals with properties transformation of digitalized EPS, in the result of that information-communication sub-system is become similar like physical sub-system from the points of view of complexity and vulnerability. As the result, the problems of survivability and cyber security such cyber-physical EPS are more actual.

Keywords: electric power systems (EPS), cyber-physical EPS, survivability, resilience, cyber security.

Введение

Электроэнергетическая система (ЭЭС), объединяющая посредством развитой электрической сети высоких и сверхвысоких напряжений на параллельную работу множество электростанций различных типов и мощностей, снабжающих по этой сети электроэнергией огромное количество потребителей, – один из сложнейших технических объектов, созданных человеком. ЭЭС постоянно развиваются под влиянием мно-

гих объективных факторов при использовании инновационных технологий для производства, передачи, распределения и хранения электроэнергии.

Функционирование такого чрезвычайно сложного территориально распределенного объекта в принципе невозможно без адекватной по сложности системы управления. В теории управления известен ставший уже классическим принцип так называемой необходимой (или достаточной) сложности, в соответствии с которым

¹ Николай Иванович Воропай – научный руководитель, чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор, *e-mail:* voropai@isem.irk.ru;

Ирина Николаевна Колосок – ведущий научный сотрудник, д.т.н., *e-mail:* kolosok@isem.irk.ru;

Елена Сергеевна Коркина – старший научный сотрудник, к.т.н.;

Алексей Борисович Осак – научный сотрудник, *e-mail:* osakalexey@mail.ru;

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН.

² Nikolay I. Voropai – Academic Director, Corresponding Member of the RAS, Doctor of Engineering, Full Professor, *e-mail:* voropai@isem.irk.ru;

Irina N. Kolosok – Leading Researcher, Doctor of Engineering, *e-mail:* kolosok@isem.irk.ru;

Elena S. Korkina – Senior Researcher, PhD in Engineering;

Alexey B. Osak – Researcher, *e-mail:* osakalexey@mail.ru;

Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

уровень сложности системы управления должен соответствовать уровню сложности управляемой системы и происходящих в ней процессов [1]. Соответственно, современные ЭЭС и их объединения имеют многоуровневые эшелонированные многофункциональные системы управления нормальными, аварийными и послеаварийными режимами.

Эффективность управления сложными ЭЭС и их объединениями обеспечивается представительной, многочисленной, постоянно обновляемой и достоверной информацией, конкретные значения соответствующих параметров и переменных состояния ЭЭС с необходимой периодичностью измеряются, обрабатываются, передаются, анализируются и визуализируются развитой информационно-коммуникационной подсистемой с использованием современных технических средств и информационных технологий. Эта подсистема так же вырабатывает, передает и реализует необходимые управляющие воздействия.

Уже в настоящее время, а в будущих ЭЭС – в еще большей степени, физическая (силовая) и информационно-коммуникационная подсистемы становятся сопоставимыми по сложности и ответственности с точки зрения обеспечения нормального функционирования ЭЭС и возрастающих требований потребителей к надежности их электроснабжения и качеству поставляемой им электроэнергии. В условиях цифровизации ЭЭС во все большей мере требуется рассматривать сложные комплексные киберфизические электроэнергетические системы, имеющие новые свойства и обостряющиеся проблемы надежности, уязвимости и живучести таких систем [2, 3 и др.].

С учетом представленных тенденций в данной статье рассмотрены некоторые аспекты аварийных явлений и процессов в киберфизических ЭЭС, а также обсуждается сравнительно новая проблема кибербезопасности таких систем.

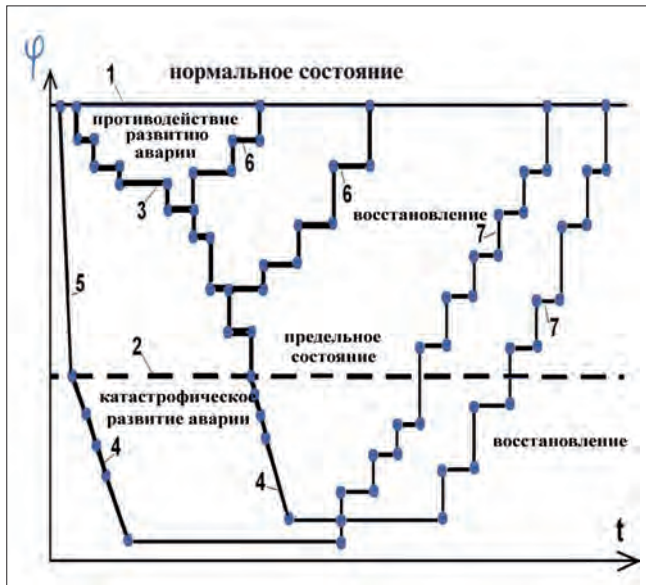
Характеристика проблем

Живучесть и уязвимость современных, а тем более будущих ЭЭС объективно становятся главной проблемой с точки зрения обеспечения их нормального функционирования.

Эта проблема стала актуальной в начале 1960-х годов после известной крупной каскадной «аварии века» в июле 1965 г. в энергообъединении Северо-Востока США и Востока Канады [4 и др.] и последовавших за ней системных аварий в Северной Америке и Европе в конце 1960-х – 1980-е годы. Каскадные системные аварии происходили в этот период и в СССР, но со значительно меньшими последствиями [5]. Участвовавшие случаи крупных системных аварий послужили причиной формализации понятия живучести сложных ЭЭС.

В соответствии с [6] применительно к ЭЭС живучесть определяется как свойство системы противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением электроснабжения потребителей и восстанавливать исходное состояние системы или близкое к нему. В переводе на английский живучесть – это *survivability*, однако в англоязычной литературе прижился термин *vulnerability* (уязвимость) [7 и др.]. Различие этих терминов очевидно: живучесть предполагает определенную активность системы при ее противостоянии возмущениям за счет рационально организованной структуры, целесообразных режимов функционирования, эффективного управления; уязвимость отражает своего рода пассивную реакцию системы на возмущения. Таким образом, уязвимость является в некотором смысле дополняющим (противоположным) свойством системы по сравнению с живучестью [6, 8].

Проведенные в 1970-е – 1980-е годы исследования [5, 8-10 и др.] позволили выработать однозначную трактовку свойства живучести ЭЭС, условно представленную на рис. 1. В соответствии с этим рисунком следует говорить о двух случаях аварийных процессов. В первом случае процесс начинается с ординарного возмущения, затем вследствие отказов устройств управления, ошибок диспетчерского персонала, а также дополнительных внешних возмущений, происходит каскадное развитие аварии 3, на каждой стадии которого система противоаварийного управления пытается прервать это нежелательное развитие аварийного процесса 6. После достижения предельного состояния системы 2 каскадное развитие аварии приобретает необратимый неуправляемый характер 4, лавино-



Источник: [8].

Рис. 1. Иллюстрация поведения ЭЭС с точки зрения живучести

образный процесс развивается быстро, противоаварийная автоматика либо не успевает среагировать, либо к этой стадии она уже исчерпала свои возможности.

Второй случай в проблеме живучести связан с неординарным экстремальным возмущением 5 (к таким возмущениям относятся ураганы, смерчи и др., а в последнее время – кибератаки на информационно-коммуникационную подсистему [11 и др.]), после которого система оказывается ниже предельного состояния и происходит лавинообразное неуправляемое развитие аварийного процесса 4.

В обоих рассмотренных случаях ключевое значение с точки зрения живучести имеет предельное состояние ЭЭС, положение которого по отношению к нормальному состоянию 1 характеризует определенный запас прочности системы. Предельное состояние связано с недопустимыми снижениями частоты и напряжений, приводящими к потере собственных нужд электростанций и расстройству технологических процессов потребителей, с отсутствием включенной составляющей резерва генерирующей мощности и запасов пропускной способности связей, минимально допустимыми по условиям технологии ряда потребителей значениями потребляемой ими мощности и предельной длительностью перерыва их электроснабжения, от-

меченным выше исчерпанием ресурса системы управления [6, 8].

Современные ЭЭС обладают достаточным уровнем упомянутого запаса прочности за счет их внутренних свойств самоадаптации и самоустойчивости, а также управления режимами. Эти возможности достигаются существованием регулирующих эффектов нагрузки по напряжению, частоте и частотных характеристик генерации. Другой фактор обеспечения самоустойчивости ЭЭС – ее инерционность, определяемая инерционностью вращающихся механических масс роторов генераторов электростанций и двигательной нагрузки. Вследствие наличия указанных эффектов ЭЭС в определенной мере адаптируется к внезапным изменениям ее состояния и внешним воздействиям, а системы управления компенсируют указанные изменения и воздействия при выходе переменных состояния системы за определенные границы, возвращая эти переменные в допустимую область функционирования [12].

Для будущих ЭЭС XXI в. ожидаются принципиальные изменения их внутренней структуры и свойств, которые существенно снизят уровень самоустойчивости и самоадаптации этих систем. Внутренние факторы связаны с массовым использованием силовой электроники и выпрямительно-инверторных устройств для подключения к ЭЭС высокочастотных малых газотурбинных агрегатов и ветроустановок, фотоэлектрических панелей и накопителей электрической энергии, линий и вставок постоянного тока, частотно-регулируемой двигательной нагрузки, локальных выпрямительных устройств многих электроприемников. Это кардинально снижает регулирующий эффект нагрузки по напряжению и частоте и частотный регулирующий эффект генерации, а также инерционность ЭЭС. С другой стороны, намечаемый быстрый рост генерирующих установок с флуктуирующей случайным образом выдачей мощности, прежде всего ветроагрегатов, приведет к существенному увеличению негативного влияния таких флуктуаций на возможности самоадаптации ЭЭС [12].

В то же время системы регулирования многих перспективных устройств с использованием силовой электроники (FACTS, накопителей

электроэнергии, линий и вставок постоянного тока и др.) обладают высокой эффективностью по управлению и их широкое использование существенно повысит управляемость ЭЭС. Несомненный позитивный вклад в повышение управляемости будущих ЭЭС внесет развитие традиционных систем управления, прежде всего на основе технологий искусственного интеллекта.

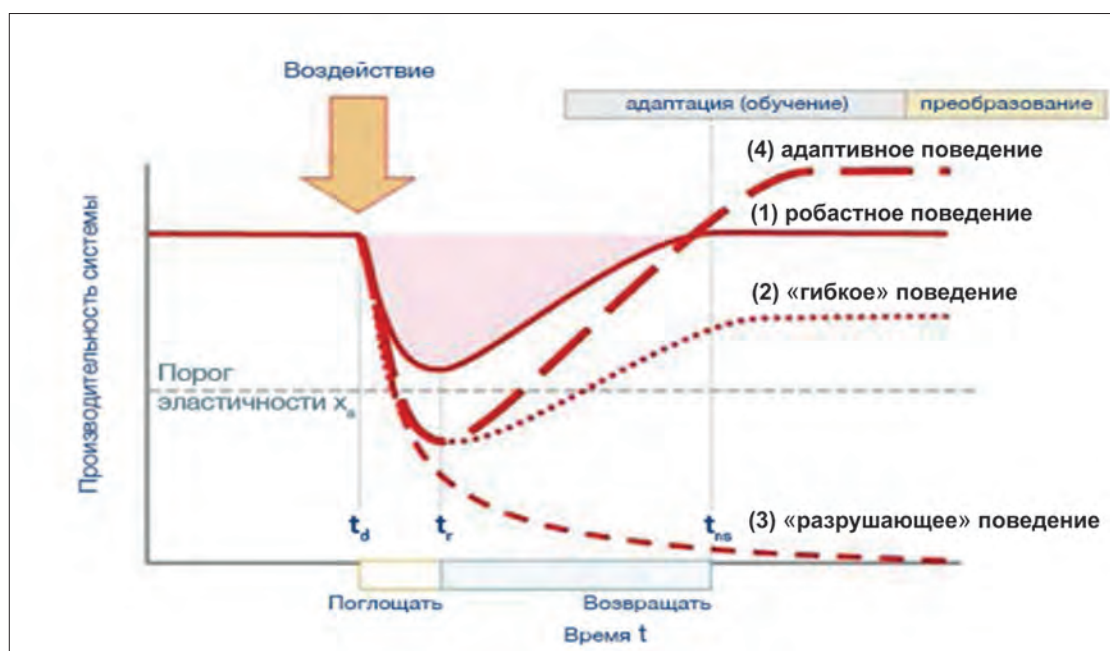
Из сказанного следует безусловная актуальность активизации и расширения области исследований уязвимости и живучести будущих киберфизических ЭЭС.

Соотношение понятий живучести и упругости ЭЭС

Актуализация проблемы живучести современных, а особенно будущих киберфизических ЭЭС привели к необходимости корректировки идеологии уязвимости (vulnerability) [7] этих систем в сторону придания им активности в отношении противодействия развитию тяжелых системных аварий. Это привело к введению нового понятия resilience (упругость, эластичность) [13-18 и др.].

Наиболее емкая трактовка термина resilience дана в [14], где этот термин определяется (см. рис. 2) как свойство системы выдерживать внезапные изменения состояния или прерывающиеся события путем снижения негативного их влияния и уменьшения последствий для системы (поглощающая способность), самоадаптации системы к этим изменениям и событиям с целью снижения последствий (адаптационная способность) и восстановления системы путем использования необходимых управляющих воздействий за минимально возможное время (способность к восстановлению). Целесообразно отметить, что приведенное определение относится к любым системам независимо от их природы. В [16] рассматриваемое свойство трактуется также для систем любой природы и представляется как комплексное, включающее экологическую, организационную и системную составляющие, при этом последняя определяется как способность минимизировать величину и продолжительность отклонений от целевых показателей системы.

Работы [13, 15, 17, 18] анализируют обсуждаемое свойство resilience применительно к ЭЭС, причем в [15, 17] акцентируется внимание на



Источник: [19].

Рис. 2. Основные закономерности устойчивого и неустойчивого поведения системы

внешних экстремальных возмущениях (например, ураганы и др.). В последние годы активно изучается проблема кибератак на информационно-коммуникационную систему ЭЭС как потенциальных внешних возмущений [11, 20 и др.]. В то же время в обзоре [15] – помимо экстремальных внешних явлений, а в [13, 18] – исключительно, речь идет о свойстве resilience по отношению к каскадным системным авариям. При этом в [13] для подтверждения тенденции роста актуальности рассматриваемой проблемы приводится информация об увеличении во времени масштабов последствий каскадных системных аварий для потребителей на основе статистики по ЭЭС США за 1991-2005 годы. Эта закономерность характерна для любых развивающихся ЭЭС.

Сопоставляя приведенные описания понятий «живучесть» и «resilience» и их графические иллюстрации на рис. 1 и 2, нетрудно увидеть, что эти понятия практически идентичны за исключением некоторых незначительных нюансов. Поэтому далее, рассматривая проблему кибербезопасности в ЭЭС, будем исходить из того, что эта проблема решается на основе исследований живучести информационно-коммуникационной подсистемы и в целом всей киберфизической ЭЭС и обоснования мероприятий по обеспечению живучести этой комплексной системы.

Проблема кибербезопасности в ЭЭС

В контексте решения задач исследования и обеспечения живучести информационно-коммуникационной подсистемы киберфизической ЭЭС в условиях кибератак необходимо рассматривать две составляющие этой подсистемы:

- 1) сбор, обработка, передача, достоверизация и представление текущей и прогнозируемой информации о состоянии системы;

- 2) определение, передача и реализация управляющих воздействий средствами релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА). Приведем некоторые результаты работ в этом направлении.

В последнее время проводятся исследования по повышению надежности системы мониторинга переходных режимов (СМПР) с опреде-

лением критических мест уязвимости по отношению к внешним воздействиям. Установлено, что рассинхронизация синхронизированных векторных измерений (СВИ) является наиболее серьезным воздействием на СМПР. Многие авторы отмечают, что выявить рассинхронизацию СВИ обычными методами оценивания состояния практически невозможно [21].

В [22] рассматривается подход к обработке и достоверизации потоков данных СВИ на основе вейвлет-анализа случайных процессов, позволяющий обнаружить как систематические ошибки, так и помехи, злонамеренно внесенные в результате кибератак. Рассмотрены структура и уязвимые места СМПР, проанализированы возможные кибератаки. Были смоделированы атаки внедрения ложных данных в СВИ, выполнен анализ вероятностных характеристик искаженных и не подвергшихся воздействию потоков данных, а также произведена достоверизация данных СВИ на основе теории вейвлетов.

В [23] на основе анализа возможных кибератак на СМПР определены условия невозможности работы процедуры оценивания состояния. Моделирование последствий, к которым могут приводить выявленные кибератаки, предложено с использованием дерева отказов. Верхний уровень дерева отказов представляет группу системных атрибутов – это алгоритмы, используемые при оценивании состояния, базовая схема ЭЭС и измерения. Средний уровень включает события, порождающие отказы процедуры оценивания состояния. Нижний уровень – это виды воздействий на причины отказов. На основе анализа поступившей измерительной информации и результатов оценивания состояния ЭЭС определяется уровень кибербезопасности (живучести) подсистемы оценивания состояния.

В [24] отмечается, что ключевыми элементами в подсистеме РЗ и ПА на основных уязвимых объектах ЭЭС – цифровых подстанциях, которые могут быть подвержены кибератакам с тяжелыми последствиями, являются коммуникационные сети, шины процессов и объектов, цифровые устройства РЗ, ПА, мониторинга и управления, внешние цифровые каналы. Предложено на цифровых подстанциях выделять критические функции защит и автоматики и реализовывать их не на цифровой базе, тем самым

исключая саму возможность кибератак на них. В [25, 26] обоснована необходимость в качестве «последнего эшелона» иметь подсистемы РЗ и ПА, не подверженные кибератакам. Остальные подсистемы РЗ и ПА должны иметь возможность работы не только в интегрированных информационных системах, но и в автономном изолированном режиме в период кибератаки или ее угрозы, а также в период восстановления ЭЭС.

В [25, 26] предлагается создать на электроэнергетических объектах имитационную подсистему, которая в автоматическом режиме на основе информации от регистратора аварийных событий (РАС), телемеханики и других источников будет имитировать работу устройств автоматического управления, верифицируя адекватность их работы. Учитывая, что программно-аппаратная часть такой имитационной подсистемы будет отличаться от таковой в устройствах РЗ и ПА, то в случаях кибератак будет наблюдаться различное поведение реальной и имитирующей подсистем, что позволит

идентифицировать кибератаки, а также выявлять потенциальные ошибки алгоритмов и программного обеспечения.

Заключение

Развитие ЭЭС на основе инновационных технологий, цифровизации электроэнергетики и технологической платформы интеллектуальной электроэнергетической системы приведет в будущем к существенной трансформации свойств ЭЭС. В связи с этим появляется необходимость актуализировать и модернизировать устоявшиеся понятия на новой основе и вводить новые с целью адекватного действительности понимания существа происходящих в ЭЭС процессов. При этом в создаваемых киберфизических электроэнергетических системах возникают новые проблемы, требующие глубоких исследований и нетривиальных решений по обеспечению нормального функционирования, живучести и кибербезопасности этих систем.

Работа выполнена по проекту III.17.4.2 Программы фундаментальных исследований Сибирского отделения Российской академии наук, рег. № АААА-А17-117030310438-1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. М.: URSS, 2005, 432 с.
2. Jin Wei, Kundur D. Two-tier hierarchical cyber-physical security analysis framework for smart grid // IEEE PES General Meeting, San Diego, USA, July 22-27, 2012, 5 p.
3. Khaitan S.K., McCalley J.D. Cyber physical system approach for design of power grids // IEEE PES General Meeting, Vancouver, Canada, July 21-25, 2013, 5 p.
4. Wueger H. Lehren aus Stoerungen in Stromversorgungetze // Bull. Schweiz. Elektrotechn., 1978, Bd. 69, No. 23, S. 1266-1270.
5. Гайснер А.Д. Анализ живучести ЭЭС на основе эксплуатационных данных об аварийных нарушениях их работы // Вопросы надежности при эксплуатации и управлении развитием энергосистем: Сб. науч. трудов НИИПТ. Л.: Энергоатомиздат, 1986, с. 50-54.
6. Надежность систем энергетики (сб. рекомендуемых терминов) / отв. ред. Н.И. Воронай. М.: Энергия, 2007, 192 с.
7. Fouad A.A., Zhou Qin, Vittal V. System vulnerability as a concept to access power system dynamic security // IEEE Transactions on Power Systems, 1994, Vol. 9, No/ 2, pp. 1009- 1015.
8. Воронай Н.И. Живучесть ЭЭС: методические основы и методы исследований // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1991, № 6, с. 52-59.
9. Авраменко В.Н. Об анализе живучести энергосистем // Вопросы надежности при эксплуатации и управлении развитием энергосистем: Сб. науч. трудов НИИПТ. Л.: Энергоатомиздат, 1986, с. 59-67.
10. Китушин В.Г. Методический подход к оценке устойчивости и живучести крупного энергообъединения // Вопросы надеж-

ности при эксплуатации и управлении развитием энергосистем: Сб. науч. трудов НИИПТ. Л.: Энергоатомиздат, 1986, с. 16-21.

11. Колосок И.Н., Коркина Е.С., Гурина Л.А. Анализ надежности результатов оценивания состояния по данным PMU при кибератаках на WAMS // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики, вып. 66. Минск: БНТУ, 2015, с. 66-75.

12. Вороняй Н.И., Осак А.Б. Электроэнергетические системы будущего // Энергетическая политика, 2014, вып. 5, с. 22-29.

13. Massoud A. Challenges in reliability, security, efficiency, and resilience of energy infrastructure: Toward smart self-healing electric power grid // IEEE PES General Meeting, Pittsburg, USA, July 20024, 2008, 5 p.

14. Cen Nan, Sansavini G., Kroeger W. Building an integrated metric for quantifying the resilience of interdependent infrastructure systems // 9th Int. Conf. on Critical Information Infrastructure Security, Limassol, Cyprus, October 13-15, 2014, 12 p.

15. Yezhou Wang, Chen Chen, Jianhui Wang, Baldick R. Research of resilience of power systems under natural disasters – A review // IEEE Trans. on Power Systems, 2016, Vol. 31, No. 2, pp. 1604-1612.

16. Zhonglin Wang, Nistor M.S., Pickl S.W. Analysis of the definitions of resilience // 20th IFAC World Congress, Toulouse, France, July 9-14, 2017, pp. 11136-11144.

17. Pantely M., Mancarella P., Trakas D., Kyriakides E., Hadziargiriou D. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems // IEEE Trans. on Power Systems, 2017, Vol. 32, No. 6, pp. 4732-4741.

18. Kezunovic M., Overbye T. Off the beaten path: Resilience and associated risk // IEEE Power and Energy Magazine, 2018, Vol. 16, No. 2, pp. 26-35.

19. Heinemann H.R. Future resilient systems. Singapore-Zurich: ETH Risk Centre, 2014, 60 p.

20. Mehrdad S., Mousavian S., Madraki G., Dvorkin Yu. Cyber-physical resilience of electrical power systems against malicious attacks: A review // Current Sustainable / Renewable Energy Reports, 2018, Vol. 5(1), pp. 14-22.

21. Колосок И.Н., Коркина Е.С. Роль задачи оценивания состояния в обеспечении киберфизической надежности интеллектуальной энергосистемы // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 67. Сыктывкар: Коми респуб. типография, 2016, с. 386-395.

22. Колосок И.Н., Гурина Л.А. Достоверизация данных синхронизированных векторных измерений при кибератаках на СМПР // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2017, № 1(5), с. 19-29.

23. Колосок И.Н., Коркина Е.С. Анализ киберустойчивости ПВК оценивания состояния ЭЭС на основе метода дерева отказов // Сб. докл. 3-й научно-техн. конф. «Пром-Инжиниринг», СПб, 2017, с. 265-270.

24. Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я. Влияние кибербезопасности объектов электроэнергетики на надежность функционирования ЭЭС // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 67. Сыктывкар: Коми респуб. типография, 2016, с. 377-385.

25. Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я. Обеспечение работоспособности комплексов противоаварийной автоматики и релейной защиты в условиях кибератак // Сб. докл. междунар. конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем». СПб, 25-28 апреля 2017 г., 6 с.

26. Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я. Повышение надежности комплексов противоаварийной автоматики и релейной защиты в условиях кибератак // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 68. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2017, с. 274-282.

REFERENCES

1. Ashby W.R. An introduction to cybernetics. New York: John Wiley & Sons, 1957, 356 p.

2. Jin Wei, Kundur D. Two-tier hierarchical cyber-physical security analysis framework for smart

grid // IEEE PES General Meeting, San Diego, USA, July 22-27, 2012, 5 p.

3. Khaitan S.K., McCalley J.D. Cyber physical system approach for design of power grids // IEEE

- PES General Meeting, Vancouver, Canada, July 21-25, 2013, 5 p.*
4. Wueger H. *Lehren aus Stoerungen in Stromversorgungnetze // Bull. Schweiz. Elektrotechn., 1978, Bd. 69, No. 23. S. 1266-1270.*
 5. Gaisner A.D. *Survivability analysis of EPS based on current data about emergencies in their operation // Reliability Problems by Operation and Expansion of Power Systems: Scientific Proceedings of NIPT. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, pp. 50-54 (in Russian).*
 6. *Reliability of energy systems (collection of recommended terms) / Edit. by N.I. Voropai. Moscow: Energiya, 2007, 192 p. (in Russian).*
 7. Fouad A.A., Zhou Qin, Vittal V. *System vulnerability as a concept to access power system dynamic security // IEEE Transactions on Power Systems, 1994, Vol. 9, No 2, pp. 1009-1015.*
 8. Voropai N.I. *Survivability of EPS: methodological base and methods of study // Proceedings of USSR Academy of Sciences. Energy and Transport, 1991, No. 6, pp. 52-59 (in Russian).*
 9. Avramenko V.N. *About survivability analyses of power systems // Reliability Problems by Operation and Expansion of Power Systems: Scientific Proceedings of NIPT. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, pp. 59-67 (in Russian).*
 10. Kitushin V.G. *Methodological approach to estimation of stability and survivability of large interconnection // Reliability Problems by Operation and Expansion of Power Systems: Scientific Proceedings of NIPT. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, pp. 16-21 (in Russian).*
 11. Kolosok I.N., Korkina E.S., Gurina L.A. *Reliability analyses of state estimation results based on PMU data considering cyber attacks against WAMS // Methodological Problems on Reliability Studies of Large Energy Systems. Issue 66. Minsk: BNTU, 2015, pp. 66-75 (in Russian).*
 12. Voropai N.I., Osak A.B. *Future electric power systems // Energy Policy (Russia), 2014, Issue 5, pp. 22-29 (in Russian).*
 13. Massoud A. *Challenges in reliability, security, efficiency, and resilience of energy infrastructure: Toward smart self-healing electric power grid // IEEE PES General Meeting, Pittsburg, USA, July 20-24, 2008, 5 p.*
 14. Cen Nan, Sansavini G., Kroeger W. *Building an integrated metric for quantifying the resilience of interdependent infrastructure systems // 9th Int. Conf. on Critical Information Infrastructure Security, Limassol, Cyprus, October 13-15, 2014, 12 p.*
 15. Yezhou Wang, Chen Chen, Jianhui Wang, Baldick R. *Research of resilience of power systems under natural disasters – A review // IEEE Trans. on Power Systems, 2016, Vol. 31, No. 2, pp. 1604-1612.*
 16. Zhonglin Wang, Nistor M.S., Pickl S.W., *Analysis of the definitions of resilience // 20th IFAC World Congress, Toulouse, France, July 9-14, 2017, pp. 11136-11144.*
 17. Pantely M., Mancarella P., Trakas D.N., Kyriakides E., Hadziargiriou N.D. *Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems // IEEE Trans. on Power Systems, 2017, Vol. 32, No. 6, pp. 4732-4741.*
 18. Kezunovic M., Overbye T.J. *Off the beaten path: Resilience and associated risk // IEEE Power and Energy Magazine, 2018, Vol. 16, No. 2, pp. 26-35.*
 19. Heinimann H.R. *Future resilient systems. Singapore-Zurich: ETH Risk Centre, 2014, 60 p.*
 20. Mehrdad S., Mousavian S., Madraki G., Dvorkin Yu. *Cyber-physical resilience of electrical power systems against malicious attacks: A review // Current Sustainable / Renewable Energy Reports, 2018, Vol. 5(1), pp. 14-22.*
 21. Kolosok I.N., Korkina E.S. *State estimation role to provide cyber-physical reliability of Smart Grid // Methodological Problems on Reliability Studies of Large Energy Systems. Issue 67. Syktyvkar: Komi Resp. Publishing, 2016, pp. 386-395 (in Russian).*
 22. Kolosok I.N., Gurina L.A. *Making more reliable of synchronized vector measuring under cyber attacks on WAMS // Information and Mathematical Technologies in Science and Management, 2017, No. 1(5), pp. 19-29 (in Russian).*
 23. Kolosok I.N., Korkina E.S. *Cyber resilience analyses of state estimation software based on fault tree method // Proceedings of 3rd Scientific and Practical Conference on Prom-Engineering, Saint Petersburg, 2017, pp. 265-270 (in Russian).*
 24. Osak A.B., Panasetsky D.A., Busina E.Ya. *Cyber security influence of electrical objects on reliability of EPS operation // Methodological Problems on Reliability Studies of Large Energy Systems. Issue 67. Syktyvkar: Komi Resp. Publishing, 2016, pp. 377-385 (in Russian).*

25. Osak A.B., Panasetsky D.A., Busina E.Ya. *Operability providing of emergency automation and protection systems under cyber attacks // Proceedings of International Conference on Protection and Automation of Power Systems, Saint Petersburg, April 25-28, 2017, 6 p. (in Russian).*

26. Osak A.B., Panasetsky D.A., Busina E.Ya. *Reliability enhancement of emergency automation and protection systems under cyber attacks // Methodological Problems on Reliability Studies of Large Energy Systems. Issue 68. Irkutsk: MESI, 2017, pp. 274-282 (in Russian).*

Поступила в редакцию
23.08.2018 г.

УДК [004.89 +004.56]:620.9

А.Г. Массель, Д.А. Гаськова¹

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация. В статье рассматривается проблема кибербезопасности в энергетике, которая усугубляется с переходом к интеллектуальной и цифровой энергетике. Для решения этой проблемы целесообразно ввести мониторинг кибербезопасности энергетических предприятий, включающий проведение аудита безопасности, выявления критических киберуязвимостей информационно-технологических систем, выработки и реализации мероприятий по их устранению. Для реализации мониторинга предложены «Методика анализа угроз и оценки риска нарушения информационно-технологической безопасности энергетических комплексов» и разработка интеллектуальной системы поддержки этой методики. Приведена архитектура и описаны компоненты интеллектуальной системы.

Ключевые слова: цифровая энергетика, кибербезопасность, интеллектуальная система, Байесовские сети доверия, сценарный риск-ориентированный подход.

A.G. Massel, D.A. Gaskova²

METHODS AND APPROACHES TO CYBERSECURITY ENSURING FOR ENTERPRISES OF DIGITAL ENERGY INDUSTRY

Abstract. The article deals with the problem of cybersecurity in the energy industry, which is exacerbated with the transition to intelligent and digital energy. To solve this problem, it is advisable to introduce monitoring of the cyber security of energy enterprises, including a safety audit, identification of critical cyberviability of information systems, development and implementation of measures to eliminate them. To implement the monitoring, we propose a «Methodology for analyzing threats and the risk assessing of violation of information and technological security of energy complexes» and developing an intelligent system to support this methodology. The architecture is shown and the components of the intelligent system are described.

Keywords: digital energy industry, cybersecurity, intelligent system, Bayesian trust networks, scenario risk-oriented approach.

Введение

Кибернетическая безопасность состоит в попытке достижения и сохранения свойств безопасности ресурсов организации или пользователя, направленных против соответствующих угроз безопасности в кибернетической среде. Процесс цифровизации энергетических сетей [1-3], использование интеллектуальных технологий, датчиков и сенсоров интернета вещей в работе энергетических систем повышают риски в области кибербезопасности энергетических

предприятий. По инициативе авторов предложено считать киберопасность одной из стратегических угроз энергетической безопасности страны [4, 5]. Для решения проблемы необходим мониторинг кибербезопасности энергетических предприятий, включающий проведение аудита безопасности, выявление критических киберуязвимостей информационно-технологических систем, выработку и реализацию мероприятий по их устранению.

Авторами предложена «Методика анализа угроз и оценки риска нарушения информаци-

¹ Алексей Геннадьевич Массель – старший научный сотрудник, к.т.н., *e-mail*: amassel@gmail.com;

Дарья Александровна Гаськова – аспирантка, *e-mail*: gaskovada@gmail.com;

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН.

² Alexey G. Massel – Senior Researcher, PhD in Engineering, *e-mail*: amassel@gmail.com;

Darya A. Gaskova – Postgraduate Student, *e-mail*: gaskovada@gmail.com;

Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

онно-технологической безопасности энергетических комплексов (ЭК)» [6], для поддержки которой разрабатывается интеллектуальная система, включающая три блока: экспертную систему для проведения аудита безопасности на предприятии и выявления критических киберуязвимостей информационно-технологической системы объекта; блок Байесовских сетей для анализа уязвимостей, угроз (кибернетических, энергетической безопасности и внешних по отношению к рассматриваемому объекту, окружающей среде и объектам) и последствий от их реализации, в совокупности приводящих к экстремальной ситуации, и блок оценки рисков наступления экстремальной ситуации. Ниже рассматриваются проблемы кибербезопасности при переходе к цифровой энергетике, краткое описание предлагаемой методики и реализующей ее интеллектуальной системы.

Проблема кибербезопасности при переходе к цифровой энергетике

Проблема кибербезопасности усугубляется еще и тем, что в России до сих пор нет однозначного понимания этого понятия. Часто ее считают синонимом информационной безопасности или ее составляющей, в силу чего кибербезопасности не уделяется достаточного внимания. Так, в отличие от большинства развитых стран, в России до сих пор не принята доктрина кибербезопасности, и, как следствие, отсутствуют соответствующие стандарты, как, например, в США – Guidelines for Smart Grid Cyber Security (Руководство по обеспечению кибернетической безопасности Smart Grid) [7]. В ряде стран, начиная с 2000-х гг., уже приняты стратегии кибербезопасности и ведется активная работа по обеспечению кибербезопасности (например, [8-11]). В Совете Федерации РФ в 2013 г. состоялись парламентские слушания, посвященные проекту Концепции стратегии кибербезопасности Российской Федерации, но она до сих пор не утверждена. В 2014 г. была принята «Концепция обеспечения информационной безопасности ОАО «Россети», решением Совета директоров ОАО «СО ЕЭС» утверждена Политика развития информационных технологий (ИТ) ОАО «СО ЕЭС» на период до 2018 г., важное ме-

сто в которой отводится ИТ-инфраструктуре и информационной безопасности. В 2018 г. вступил в силу Федеральный закон № 187 «О безопасности критической информационной структуры», требующий обеспечения информационной безопасности ресурсов предприятий, находящихся в сфере критических инфраструктур.

В соответствии с международными стандартами целесообразно рассматривать кибербезопасность как результат конвергенции пяти основных составляющих: безопасность приложений, информационная безопасность, сетевая безопасность, безопасность интернет-приложений, защита ключевых информационных систем объектов критических инфраструктур. Согласно стандарту ISO 27032:2012 [12], кибербезопасность базируется на этих пяти составляющих, но не является синонимом ни одного из них.

Цифровизация энергетических систем, использование интеллектуальных технологий, датчиков и сенсоров интернета вещей в энергетике, а также автоматизация бэк-офисных процессов существенно повышают риски кибербезопасности энергетических предприятий. При этом, по оценке Bloomberg, компании тратят на защиту от киберугроз менее 0,2% своих доходов. Это примерно в 3 раза меньше, чем, например, в финансовом секторе – при этом финансовые и репутационные риски от потери данных в энергетике крайне высоки. В работах [13-14], при участии авторов, выполнен анализ киберугроз и состояния в области кибербезопасности в энергетике (до 2015 г.), в [15] приведены результаты анализа Positive Technologies за 2017 год.

При реализации концепций интеллектуальной и цифровой энергетике необходимо учитывать следующие потенциальные риски использования современных информационных технологий (новые технологии – новые риски!) [16]:

- повышенная сложность информационной сети повышает количество уязвимостей для потенциальных атак и непреднамеренных ошибок;
- сети, взаимосвязанные с другими сетями, которые так же могут занимать несколько «умных» доменов сети, увеличивают вероятность каскадных аварий;
- большое количество взаимосвязей программных компонентов увеличивает уяз-

вимость программного кода, что упрощает злоумышленникам внедрение в программный код вредоносного кода и уязвимостей;

- по мере увеличения узлов сети увеличивается и число точек входа в систему для злоумышленников.

Помимо умышленных кибератак (намеренных попыток изменить, нарушить или остановить функционирование компьютерных систем или сетей, а также программ или информации, которые они содержат или передают), следует учитывать, что вред могут причинить действия неумышленные (можно назвать их киберхалатностью) [4], обусловленные, например, низкой компьютерной грамотностью или пренебрежением мерами, обеспечивающими кибербезопасность, которые по причиняемому ущербу сравнимы с кибератаками. Онтология кибератак [4] приведена на рис. 1. Снижению рисков от действий обоих видов может способствовать реализация методики [6], которая кратко описывается ниже.

Методика анализа угроз и оценки риска нарушения информационно-технологической безопасности энергетических комплексов (ЭК)

Предлагаемая методика основана на принципах, изложенных в [7-9, 12]. Ниже перечислены основные этапы методики, более детально она описана в [6].

1. *Порядок анализа угроз и оценки риска.* Анализ угроз и оценка риска (АУОР) нарушения ИТ-безопасности ЭК проводится в несколько этапов с учетом двух основных аспектов: критичности поддерживаемых ИТ-системой целевых функций ЭК и стоимости защиты ИТ-ресурсов ЭК. Методика АУОР содержит указания по определению: ресурсов, подлежащих оценке; потенциально уязвимых элементов ИТ-систем ЭК; потенциального влияния событий, связанных с реализацией угроз в отношении ИТ-системы ЭК; функций ЭК, которые поддерживает ИТ-система; приложений, которые используются для выполнения функций под-

разделения (участка) ЭК и требуют обеспечения информационной безопасности; мер, которые снизили бы риск нарушения информационной безопасности ЭК до приемлемого уровня. В ходе АУОР решаются следующие задачи:

- а) подготовка и планирование анализа угроз и риска;
 - б) сбор данных для анализа угроз и риска;
 - в) анализ соответствия политики безопасности нормативным документам;
 - г) анализ критичности ресурсов исследуемой системы;
 - д) анализ угроз ресурсам исследуемой системы;
 - е) анализ слабых мест (уязвимости) исследуемой системы;
 - ж) анализ общего риска;
- 3) оценка приемлемых рисков исследуемой системы.

2. *Подготовка и планирование анализа угроз и оценки риска.* АУОР необходимо проводить периодически, он должен начинаться с издания должностным лицом, отвечающим за информационную безопасность ЭК, или лицом, которому делегированы такие полномочия, приказа о проведении АУОР для части или ИТ-системы в целом. Необходимо определить физические и логические границы исследования. Физическая граница исследуемой системы включает: домены³, компоненты системы и подсистемы, физические связи с другими внешними и внутренними ИТ-системами ЭК. Логическая граница исследуемой системы включает: логические связи с другими внутренними ИТ-системами; информационные ресурсы, которые передаются от данной к другим внутренним ИТ-системам и через соединения к внешним ИТ-системам; способы передачи потоков данных; конечные источники (откуда информация исходит и пункт конечного назначения). Необходимо кратко и предельно точно установить: какие ресурсы должны быть защищены, уровни критичности защищаемых ресурсов, планируемый уровень приемлемого риска (максимальный). Далее необходимо составить описание организационной системы ЭК, включающее описание: структу-

³ Под «доменом» понимается физически и логически непрерывная область ИТ-системы, в пределах которой характеристики окружающей среды постоянны. Это может быть определяемая граница системы, в рамках которой выполняется (часть или весь) набор функций.

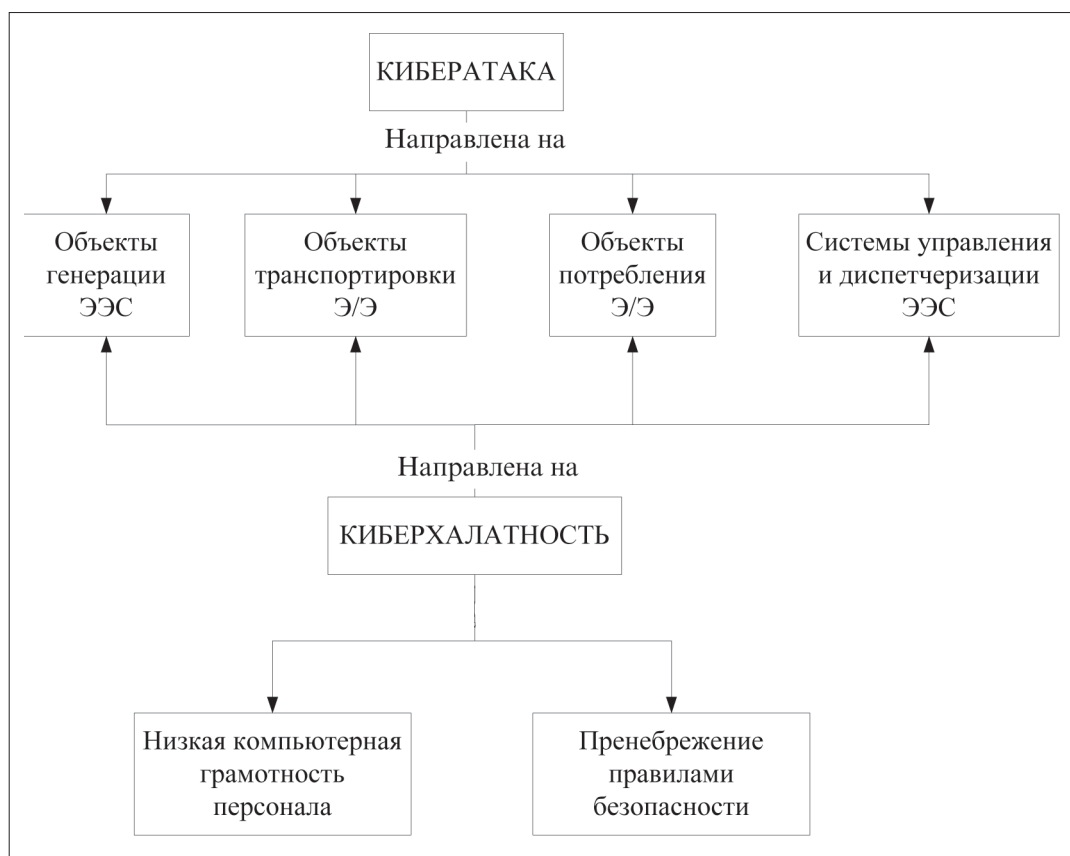


Рис. 1. Онтология кибератак

ры энергетического предприятия, взаимосвязей подразделений, обязанностей и полномочий персонала. Необходимо описать персонал, занимающий ключевые позиции в ИТ-системе, в том числе: ответственных лиц из числа руководства и пользователей по управлению, обработке и инструментальным средствам исследуемой ИТ-системы, владельцев ресурсов, которые будут оказывать содействие при описании и установлении стоимости ресурсов. Далее требуется составить описание ИТ-системы с использованием информации, собранной на предыдущих этапах, и описать относящиеся к ИТ-системе компоненты, основное содержание обработки, способы обработки.

3. Сбор данных для анализа угроз и оценки риска. Для предварительного анализа безопасности ИТ-системы необходимо собрать информацию об угрожающих факторах, событиях и слабых местах (уязвимости) анализируемой системы. Информация об угрозах и уязвимости должна способствовать выяснению, какие ресурсы подвергаются максимальному риску

от воздействия угрожающих факторов. Эта информация должна быть правильно истолкована с указанием ее относительной важности для исследования. Ретроспективная информация может быть получена из документации службы безопасности ЭК, данных государственных органов по защите информации, правоохранительных органов по расследованию правонарушений в рассматриваемой области, от специалистов других государственных учреждений и органов, а также основываться на открытой литературе (публикации в области безопасности ИТ-систем).

4. Анализ соответствия политики безопасности нормативным документам. Потребуется идентифицировать политику безопасности и нормативные правовые акты для ИТ-систем ЭК. Политика безопасности и нормативные правовые акты должны содержать правила, директивы и практические указания, которые определяют, каким образом управлять, защищать и распределять в ИТ-системах ЭК ресурсы, включающие критически важную информацию. Далее следует проанализировать описание ис-

следуемой системы на соответствие применяемым правилам нормативных правовых актов по обеспечению безопасности и внести записи любых недостатков организации защиты системы в перечень несогласованных областей. Документы по политике безопасности и нормативные правовые акты должны содержать описание имеющихся в наличии средств защиты ресурсов ИТ-системы и средств защиты, планируемых для уменьшения риска.

5. *Анализ критичности ресурсов исследуемой информационно-технологической системы.* Задача анализа критичности ресурсов решается при необходимости детализированного АУОР и базируется на предварительной оценке критичности ресурсов для определения основного направления работ. Оценивание ресурсов ИТ-системы должно установить их важность для функционирования ЭК путем их описания и определения стоимости и позволить анализирующему принять решение, какие области ИТ-системы имеют наибольший приоритет, и в соответствии с этим, на чем должны быть сконцентрированы усилия защиты. Уровень критичности ресурса должен определяться в соответствии с требованиями к обеспечению его конфиденциальности, целостности, доступности и стоимости восстановления. При оценивании критичности ресурса должен учитываться такой критерий, как потеря престижа учреждения, доверия потребителей или возможности вести дело в результате нарушения его конфиденциальности, целостности или доступности, а также затрат на восстановление. Критичность ресурса относительно конфиденциальности, целостности и доступности может быть оценена качественно (в соответствующих терминах) или количественно (в терминах денежного ущерба). Качественные и количественные элементы оценки должны быть согласованы между собой. Для получения истинной картины критичности ресурсов необходимо привести в соответствие предварительную и полученную в ходе выполнения настоящего этапа оценки критичности. Далее необходимо подвести итоги оценки критичности ресурсов, определив категории ресурсов с самым высоким уровнем критичности в каждом домене. Идентифицированные кри-

тически важные ресурсы должны рассматриваться для анализа на последующих этапах.

6. *Анализ угроз ресурсам исследуемой информационно-технологической системы.* Анализы угроз и уязвимости могут проводиться в любом порядке, который упростит и облегчит анализ риска для каждой ИТ-системы. Поскольку рассматриваются все возможные угрозы и уязвимости (даже с целью их отклонения), порядок рассмотрения не имеет решающего значения. Необходимо установить потенциально угрожающие факторы для каждого домена, проанализировать список угрожающих факторов и выбрать те, которые могут оказать воздействие на ресурсы, классифицированные как наиболее критичные; определить в пределах каждого домена потенциальные события, при которых угрожающие факторы могут создать угрозу компрометации ресурса. Далее следует определить события, при которых угрожающие факторы могут скомпрометировать любой или каждый из самых критически важных ресурсов.

7. *Анализ уязвимости исследуемой системы.* В пределах каждого домена необходимо идентифицировать уязвимости (слабые места), использование которых может нанести ущерб отдельным его ресурсам. При анализе уязвимости следует использовать перечень слабых мест и описание системы, полученные на предыдущих этапах. Для каждого слабого места необходимо установить вероятность его использования, применяя таблицы ранжирования уязвимости, а также уровень подверженности ресурса риску при использовании идентифицированного слабого места, рассмотреть возможные воздействия при использовании идентифицированного слабого места с точки зрения возможности раскрытия информации, модификации ресурсов, отказа в обслуживании (включая прерывание процессов, разрушение или удаление данных). Далее следует установить степень уязвимости, рассмотреть возможные воздействия на конфиденциальность, целостность, доступность информации и ресурсов ее обработки, определить общий уровень уязвимости и подходящие средства защиты, которые могли бы снизить степень атаки, использующей слабые места исследуемой ИТ-системы.

8. *Анализ общего риска нарушения безопасности информационно-технологической системы.* Исходя из анализа уязвимости системы, желательно описать все возможные сценарии угроз (сценарий угрозы состоит из одного или нескольких событий, вызванных угрожающим фактором, способных привести к компрометации ресурса), проанализировать каждое возможное событие угрозы и определить, насколько эффективно существующие средства защиты будут защищать конкретные ресурсы от угрожающих факторов, то есть оценить возможность угрожающего фактора нанести ущерб или уничтожить тот или иной ресурс с использованием логического сценария «что, если...». Для каждого домена требуется выбрать и внести в протокол риски, имеющие максимально возможное воздействие в пределах этого домена, и подвести итоги по анализу рисков в пределах каждого домена. Далее следует проанализировать потенциальное воздействие на ИТ-систему и/или ЭК каждого логического сценария угрозы, приняв в расчет критичность ресурса и степень его уязвимости, определенные ранее, и оценить уровень риска для каждого логического сценария угрозы, рассматривая одновременно возможность его осуществления и потенциальное влияние на ИТ-систему и ЭК в целом (возможен потенциальный сценарий угрозы с такими тяжелыми последствиями, что ни одна его реализация не допускается).

9. *Оценка приемлемых рисков исследуемой информационно-технологической системы.* Оценка приемлемого риска должна связывать степень риска с определенными ресурсами исследуемой ИТ-системы. Результаты оценки приемлемого риска важны как основа для выбора средств защиты ресурсов, выполняемого путем сравнения вариантов до тех пор, пока не будет выбрана приемлемая мера защиты (или комбинация мер). Далее следует определить максимальный приемлемый уровень риска, проанализировать полученные ранее оценки риска и утвердить уровень максимального остаточного риска, который будет приемлемым после принятия всех мер по защите. Максимальный приемлемый уровень риска должен быть утвержден руководителем энергетического предприятия.

Решения по принятию риска являются основой при выборе мер защиты. Необходимо проанализировать риски ИТ-системы, определенные ранее, с точки зрения их обоснованности и точности, подтвердив, что исследуемую ИТ-систему можно рассматривать как подверженную риску при воздействии описанных сценариев угроз. Требуется проанализировать существующие/планируемые средства защиты, определенные и зафиксированные на предыдущих шагах, и оценить, обеспечивают ли существующие/планируемые средства защиты адекватность защиты ИТ-системы. Если они не обеспечивают адекватную защиту, делается допущение о том, что имеет место уязвимость. Далее необходимо определить все оставшиеся слабые места (уязвимости), удостовериться, что для каждой вновь идентифицированной уязвимости предусмотрено одно или несколько действующих или планируемых средств защиты, и оценить необходимость всех существующих/планируемых средств защиты с учетом того, что: они могут не потребоваться, если другое средство защиты адекватно защищает ресурс; избыточная защита может оказаться дорогостоящей и увеличивать накладные расходы в эксплуатации. На следующем шаге необходимо выбрать средства защиты (или их комбинацию), которые будут эффективно защищать ресурсы ИТ-системы любой категории.

Поскольку реализация предложенной методики «вручную» затруднительна, для ее поддержки разрабатывается интеллектуальная система, которая описана ниже.

Интеллектуальная система анализа угроз и оценки рисков нарушения кибербезопасности энергетических объектов

Данная система разрабатывается для: проведения аудита безопасности объекта с целью выявления его киберуязвимостей и наиболее вероятных киберугроз (тривиальные атаки), построения вероятностных сценариев наступления экстремальной ситуации в результате реализации киберугроз на объекте, оценки рисков наступления экстремальных ситуаций, выявления критических объектов на основе ранжирования рисков экстремальных ситуаций [17].

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Интеллектуальная система (рис. 2) представляет собой совокупность трех основных компонентов:

а) экспертной системы для проведения аудита безопасности на предприятии и выявления критических киберуязвимостей информационно-технологической системы объекта;

б) блока Байесовских сетей для анализа уязвимостей, угроз (кибернетических, энергетической безопасности и внешних по отношению к рассматриваемому объекту, окружающей среде и объектам) и последствий от их реализации, в совокупности приводящих к экстремальной ситуации;

в) блока оценки рисков наступления экстремальной ситуации.

Байесовские сети доверия рассматриваются в качестве инструмента для анализа возможных экстремальных ситуаций в энергетике с учетом кибербезопасности. Сценарный подход предлагается для анализа угроз, приводящих к экстремальным ситуациям в энергетике.

В настоящее время реализована экспертная система «Cyber», архитектура которой приведена на рис. 3 [18].

Графический интерфейс пользователя (GUI) включает отображение данных, обработку событий пользовательского интерфейса и реализован на высокоуровневом языке Java с использованием библиотеки Swing. Интерфейс взаимодействия представляет собой JNI-механизм для запуска кода под управлением виртуальной машины Java и служит для взаимодействия GUI с CLIPS. Ядро экспертной системы реализовано в программной среде для разработки систем CLIPS и представляет собой механизм логического вывода и базу знаний.

Для развития экспертной системы предусматривается разработка пакета документов, называемого паспортом безопасности, содержащего полную информацию об информационной инфраструктуре объекта.

На основе риск-менеджмента авторами предложен риск-ориентированный подход, который учитывает ущерб от повреждения или уничтожения объекта с использованием качественных и количественных параметров, а также вероятность повреждения или уничтожения компонентов объекта с учетом возможности наступления каскадных аварий.

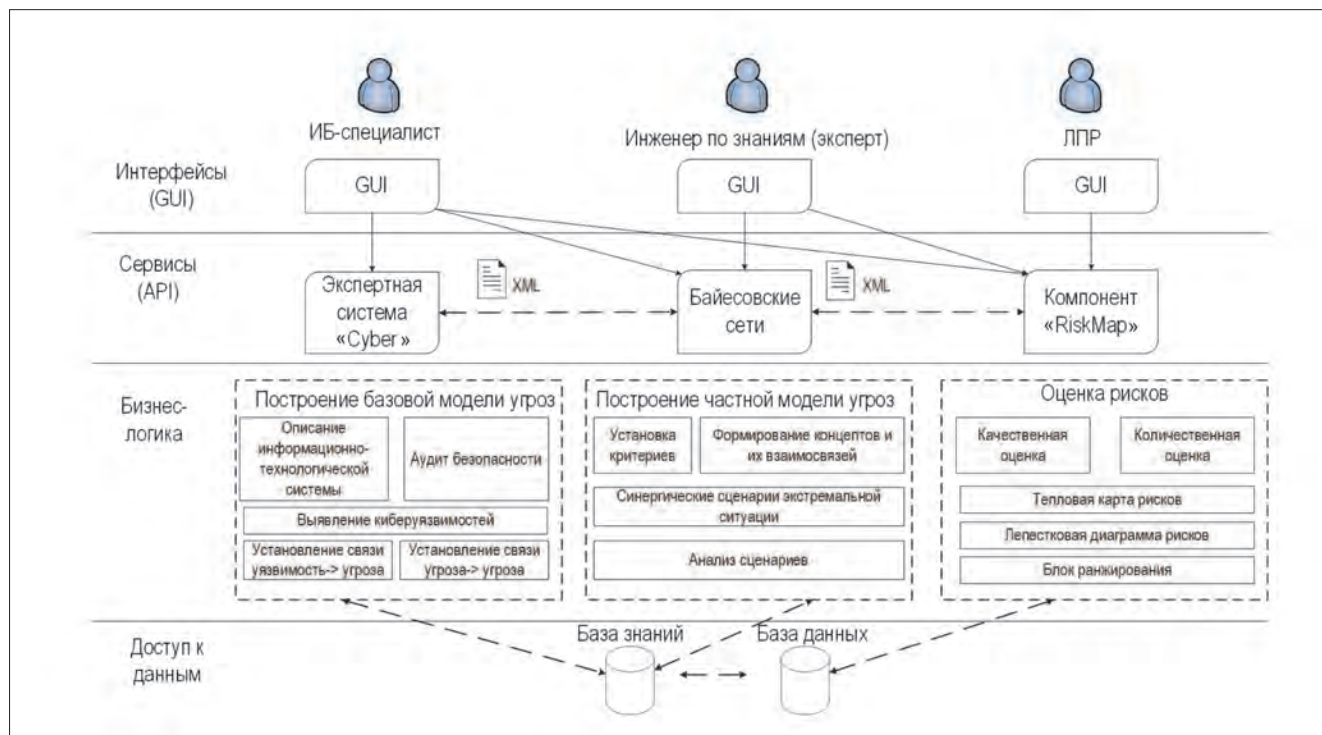


Рис. 2. Архитектура интеллектуальной системы для анализа угроз и оценки рисков нарушения ИТ-безопасности ЭК

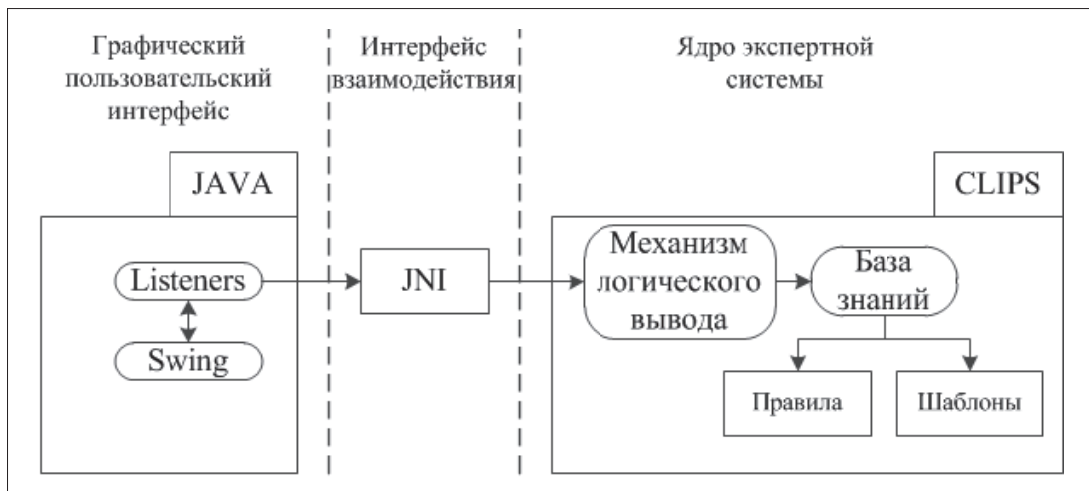


Рис. 3. Архитектура экспертной системы «Cyber»

Риски определяются тройкой $R = \{T, V, D\}$, где T – угрозы, V – уязвимости, D – ущерб при реализации угрозы. Угрозы определяются через вероятности наступления событий, приводящих к критическим ситуациям. Угрозы нарушения кибербезопасности могут вызывать последующую реализацию других угроз энергетической безопасности (ЭБ). Последовательность и взаимозависимость угроз определяют сценарий наступления критической ситуации, который наглядно можно представить в виде ациклического графа. Предлагается использовать Байесовские сети доверия для построения сценариев реализации киберугроз, где вероятность событий, приводящих к критическим ситуациям,

определяется через условные вероятности. Компоновка сценария по уровням экстремальных ситуаций представлена на рис. 4.

Оценку рисков так же предлагается осуществлять визуально, анализируя тепловую карту рисков или лепестковую диаграмму видов рисков. Главное окно реализованного прототипа модуля оценки риска (тепловая карта рисков) представлено на рис. 5 (в интерфейсе нижние прямоугольники (1) будут закрашены зеленым цветом, средние (2) – желтым, верхние (3) – красным).

В статье рассмотрена проблема кибербезопасности, значение которой возрастает с переходом к цифровой энергетике. В качестве одного

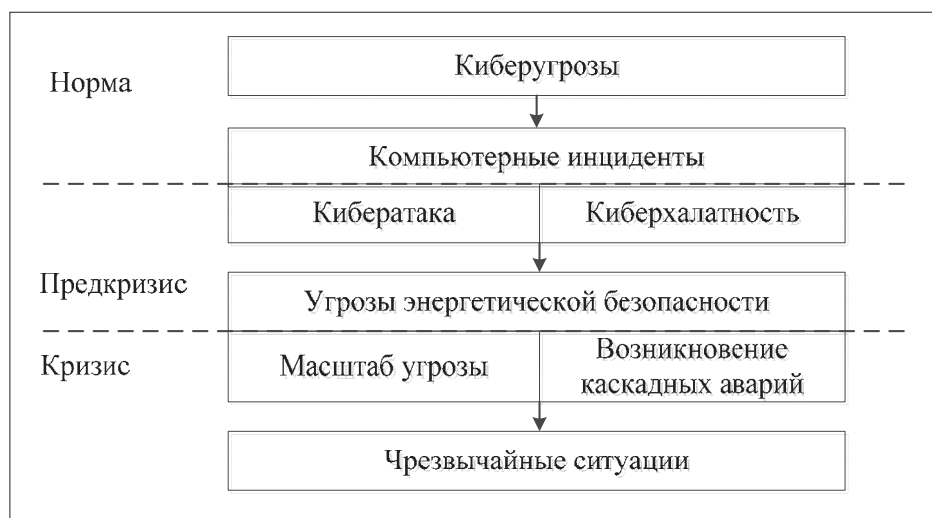


Рис. 4. Компоновка сценария по уровням экстремальных ситуаций

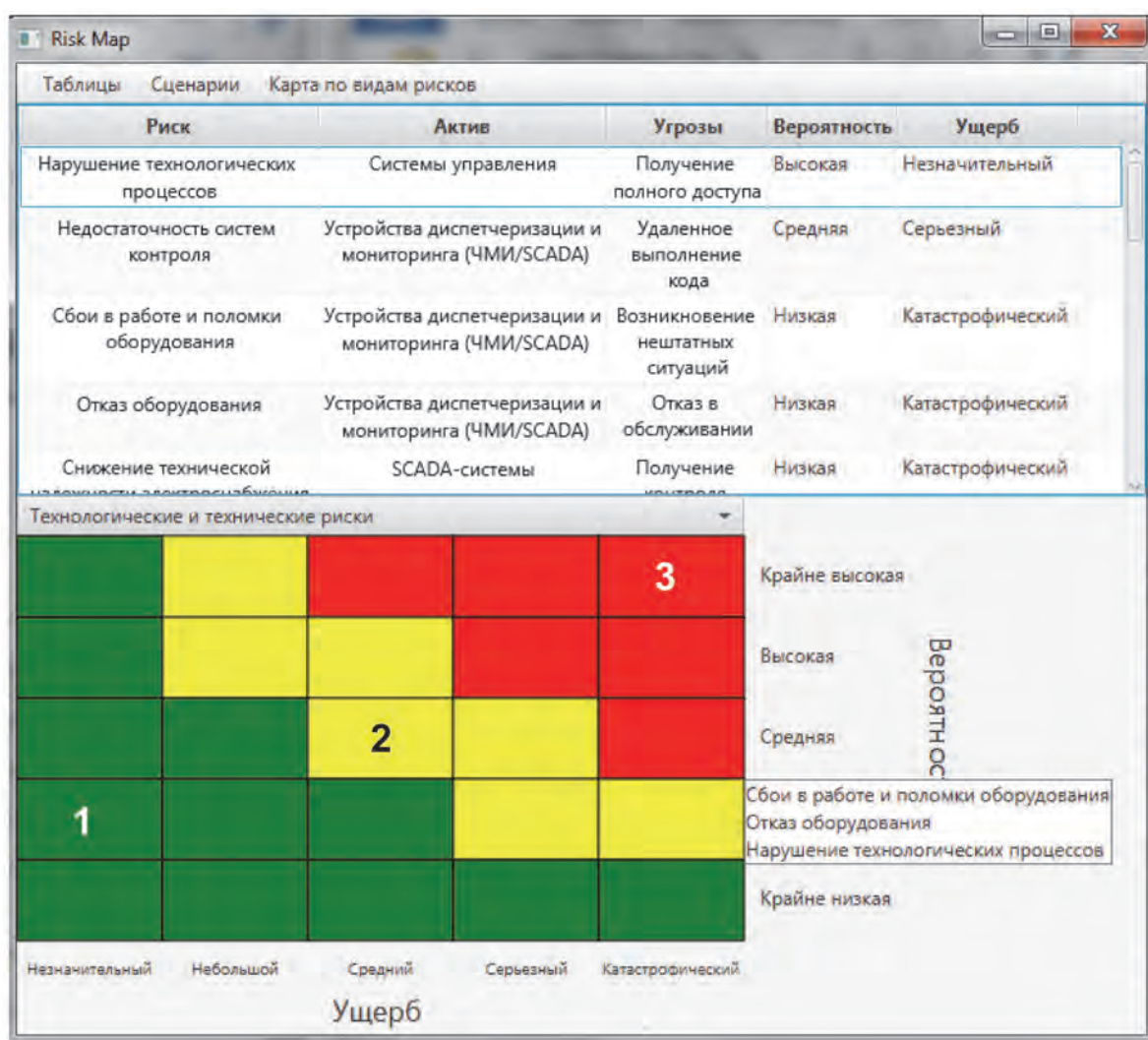


Рис. 5. Тепловая карта рисков

из подходов к решению этой проблемы предлагается «Методика анализа угроз и оценки риска нарушения информационно-технологической безопасности энергетических комплексов», которая может использоваться для организации мониторинга кибербезопасности энергетических предприятий. Для поддержки этой методики разрабатывается интеллектуальная система, основанная

на сценарном риск-ориентированном подходе и применении Байесовских сетей доверия. Описаны архитектура и реализованные компоненты этой системы. При использовании методики для мониторинга объектов электроэнергетических систем может также применяться разрабатываемый в ИСЭМ СО РАН подход [19].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Федеральный проект «Цифровая энергетика»*. URL: <http://minsvyaz.ru/uploaded/files/programma.pdf> (дата доступа 7.08.2018).
2. *Экспертно-аналитический доклад «Цифровой переход в электроэнергетике России»* URL: <https://www.csr.ru/issledovaniya/tsifrovoj->

- perehod-v-elektroenergetike-rossii/* (дата доступа 10.08.2018).
3. *Материалы 2-й отраслевой конф. «Цифровая трансформация электроэнергетики России»*, Москва, октябрь 2017. URL: <http://digitenergy.ru/> (дата доступа 13.11.2017).

4. Массель А.Г. Кибератаки как угроза энергетической безопасности России / *Information technology and security*. – Киев, Институт спецсвязи и защиты информации НТУ Украины «КПИ», № 1 (3) 2013. – С. 49-56.

5. Массель Л.В., Воронай Н.И., Сендеров С.М., Массель А.Г. Киберопасность как одна из стратегических угроз энергетической безопасности России // *Вопросы кибербезопасности*. – № 4 (17). – 2016. – С. 2-10.

6. Массель А.Г. Методика анализа угроз и оценки риска нарушения информационно-технологической безопасности энергетических комплексов / *Труды XX Байкальской всероссийской конф. «Информационные и математические технологии в науке и управлении»*, Т. 3. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 186-195.

7. *Security standards NERC CIP*. Available at: <http://www.slideshare.net/CiscoRu/nerc-cip> (accessed 16.03.2017).

8. *Руководство по передовой практике защиты важнейших объектов неядерной энергетической инфраструктуры от террористических актов в связи с угрозами, исходящими от киберпространства / ОБСЕ*, 2013. – 96 с.

9. *Нормативные документы по обеспечению безопасности КИИ (ОБСЕ)*. URL: <https://rvision.pro/blog-posts/normativnye-dokumenty-po-obespecheniyu-bezopasnosti-kii/>

10. Chun Che Fung. *A Proposed Study on Economic Impacts due to Cyber Attacks in Smart Grid: A Risk Based Assessment*.

11. Sridhar S., Hanh A., Govindarasu M. *Cyber-physical system security for the electric power grid // Proc. IEEE*. 2012. Vol. 100. No. 1. P. 210-224.

12. *BS ISO/IEC 27032:2012 Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Руководящие указания по кибербезопасности*. URL: <http://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5299196> (дата обращения 29.11.2017).

13. Massel L., Massel A. *Cyber security of Russia's energy infrastructure as a component of*

national security / Proceeding of the International Conference on Problems of Critical Infrastructures, 6th International Conference on Liberalization and Modernization of Power Systems. Ed. by Z.A. Styczynski, N.I. Voropai. – 2015. – Saint Petersburg. – С. 66-72.

14. Massel A., Massel L. *The current state of cyber security in Russia's energy systems and the proposed activities for situation improving / Proceeding of the International Conference on Problems of Critical Infrastructures, 6th International Conference on Liberalization and Modernization of Power Systems*. Ed. by Z.A. Styczynski, N.I. Voropai. – 2015. – Saint Petersburg. – С. 183-189.

15. *Positive Technologies. Безопасность АСУ ТП: итоги 2017 года*. URL: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/ICS-Security-2017-rus.pdf>

16. Массель Л.В. *Использование современных информационных технологий в Smart Grid как угроза кибербезопасности энергетических систем России / Information technology and security*. Киев, Институт спецсвязи и защиты информации НТУ Украины «КПИ», №1 (3) 2013. – С. 56-65.

17. Massel A.G., Gaskova D.A. *Application of risk-based approach to identify critical facilities in the energy sector with regard to cyber threats // Proceedings of the 19th International Workshop on Computer Science and Information Technologies*. Germany, Baden-Baden. Publisher Ufa: USATU. Vol. 1. 2017. – Pp. 159-163.

18. Гаськова Д.А., Массель А.Г. *Разработка экспертной системы для анализа угроз кибербезопасности в энергетических системах // Информационные и математические технологии в науке и управлении*. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. – № 1, – 2016. – С. 113-122.

19. Колосок И.Н., Гурина Л.А. *Определение показателя уязвимости к кибератакам задачи оценивания состояния по данным SCADA и синхронизированным векторным измерениям // Электротехника*, 2017, – № 1, – С. 52-59.

REFERENCES

1. *The federal project «Digital Energy Industry»*. URL: <http://minsvyaz.ru/uploaded/files/programma.pdf> (access date 7.08.2018).

2. *Expert-analytical report «Digital Transition in the Electric Power Industry of Russia»*. URL: <https://www.csr.ru/issledovaniya/tsifrovoj-perehod-v-elektroenergetike-rossii/> (access date 10.08.2018).

3. *Materials of the 2nd industry conference «Digital Transformation of the Electric Power Industry of Russia»*, Moscow, October 2017. URL: <http://digitenergy.ru/> (access date 13.11.2017).
4. Massel A.G. *Cyber attacks as a threat to Russia's energy security / Information technology and security*. Kiev, Institute of Special Communication and Information Protection of Ukraine NTU «KPI», № 1 (3) 2013. – Pp. 49-56 (in Russian).
5. Massel L.V., Voropai N.I., Senderov S.M., Massel A.G. *Cyber danger as one of the strategic threats to Russia's energy security / Cyber Security Issues*. – № 4 (17). – 2016. – Pp. 2-10 (in Russian).
6. Massel A.G. *A technique for analyzing threats and assessing the risk of violation of information and technological security of energy complexes // Proceedings of the 20th Baikal All-Russian Conference «Information and Mathematical Technologies in Science and Management»*, vol. III. – Irkutsk: ISEM SB RAS, 2015. – Pp. 186 – 195 (in Russian).
7. *Security standards NERC CIP*. Available at: <http://www.slideshare.net/CiscoRu/nerc-cip> (accessed 16.03.2017).
8. *Guidance on best practices in protecting critical non-nuclear energy infrastructure from terrorist attacks in connection with threats from cyberspace: Guidance / Organization for Security and Cooperation in Europe (OSCE)*, 2013. – 96 p.
9. *Normative documents on the safety of the CII (OSCE)*. URL: <https://rvision.pro/blog-posts/normativnye-dokumenty-po-obespecheniyu-bezopasnosti-kii/>
10. *Chun Che Fung A Proposed Study on Economic Impacts due to Cyber Attacks in Smart Grid: A Risk Based Assessment*.
11. Sridhar S., Hanh A., Govindarasu M. *Cyber-physical system security for the electric power grid // Proc. IEEE*. 2012. Vol. 100. No. 1. P. 210-224.
12. *BS ISO/IEC 27032: 2012 Information technologies. Methods of security ensuring . Guidelines for Cybersecurity*. URL: <http://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5299196> (access date 29.11.2017).
13. Massel L., Massel A. *Cyber security of Russia's energy infrastructure as a component of national security / Proceeding of the International Conference on Problems of Critical Infrastructures, 6th International Conference on Liberalization and Modernization of Power Systems*. Edited by Z.A. Styczynski and N.I. Voropai. – 2015. – Saint Petersburg. – Pp. 66-72.
14. Massel A., Massel L. *The current state of cyber security in Russia's energy systems and the proposed activities for situation improving / Proceeding of the International Conference on Problems of Critical Infrastructures, 6th International Conference on Liberalization and Modernization of Power Systems*. Ed. by Z.A. Styczynski, N.I. Voropai. – 2015. – Saint Petersburg. – Pp. 183-189.
15. *Positive Technologies. Security of automated management systems for technological processes: results of 2017*. URL: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/ICS-Security-2017-rus.pdf>
16. Massel L.V. *Use of modern information technologies in the Smart Grid as a threat to the cybersecurity of Russia's energy systems / Information technology and security*. Kiev, Institute of Special Communication and Information Protection of NTU of Ukraine «KPI», No. 1 (3) 2013. – Pp. 56-65 (in Russian).
17. Massel A.G., Gaskova D.A. *Application of risk-based approach to identify critical facilities in the energy sector with regard to cyber threats // Proceedings of the 19th International Workshop on Computer Science and Information Technologies*. Germany, Baden-Baden. Publisher Ufa: USATU. Vol. 1. 2017. – Pp. 159-163.
18. Gaskova D.A., Massel A.G. *The expert system development for the analysis of cybersecurity threats in power systems / Information and mathematical technologies in science and management*. Science Magazine. Irkutsk: ISEM SB RAS. – № 1, 2016. – Pp. 113-122 (in Russian).
19. Kolosok I.N., Gurina L.A. *Determination of the vulnerability index to cyber attacks of the state estimation problem based on SCADA data and synchronized vector measurements // Electrical Engineering*, – № 1, – 2017. – Pp. 52-59 (in Russian).

Поступила в редакцию
20.09.2018 г.

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

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

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-

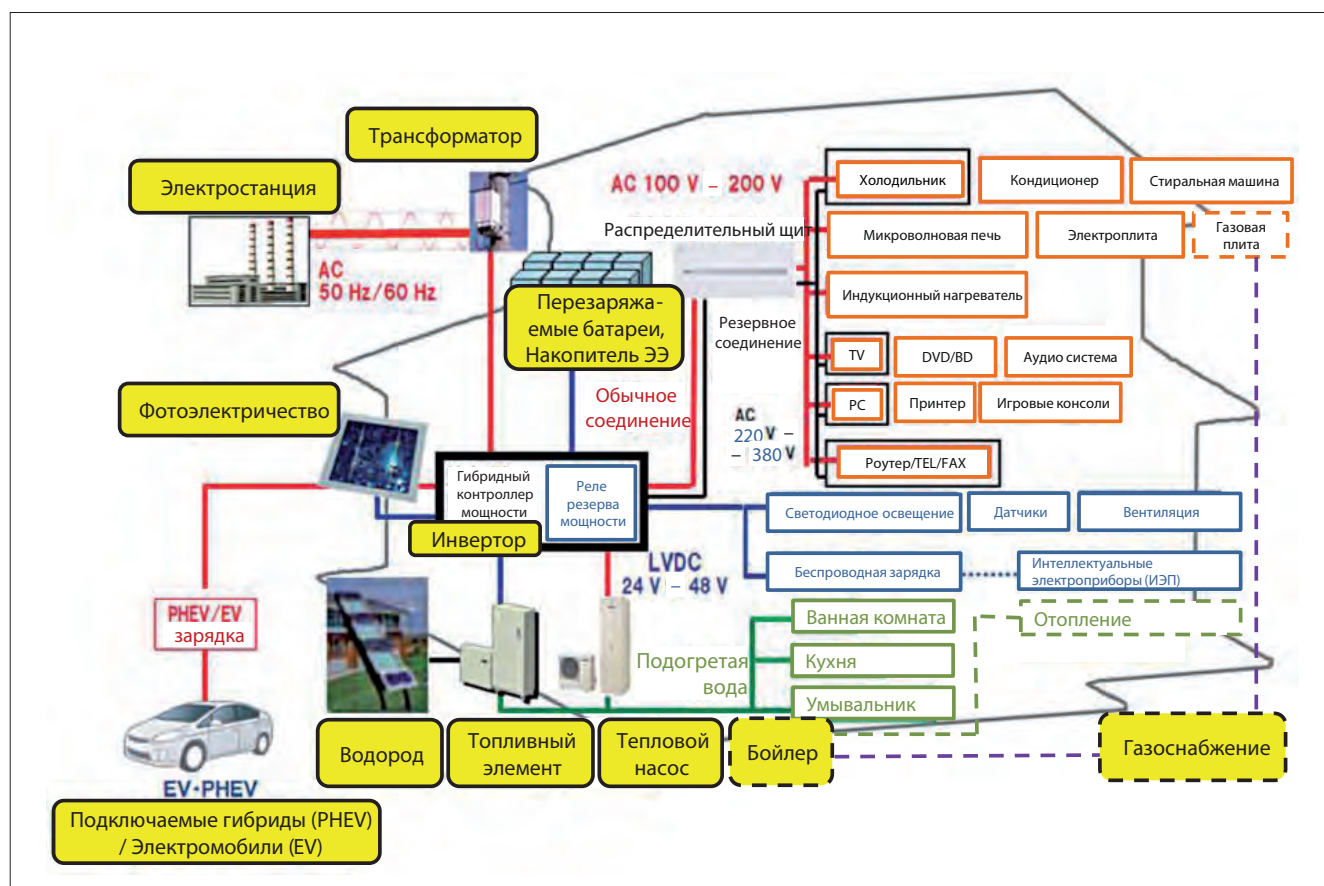


Рис. 1. Функциональная схема электроснабжения «умного» дома

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 электроэнергетического 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 мегаватт, 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

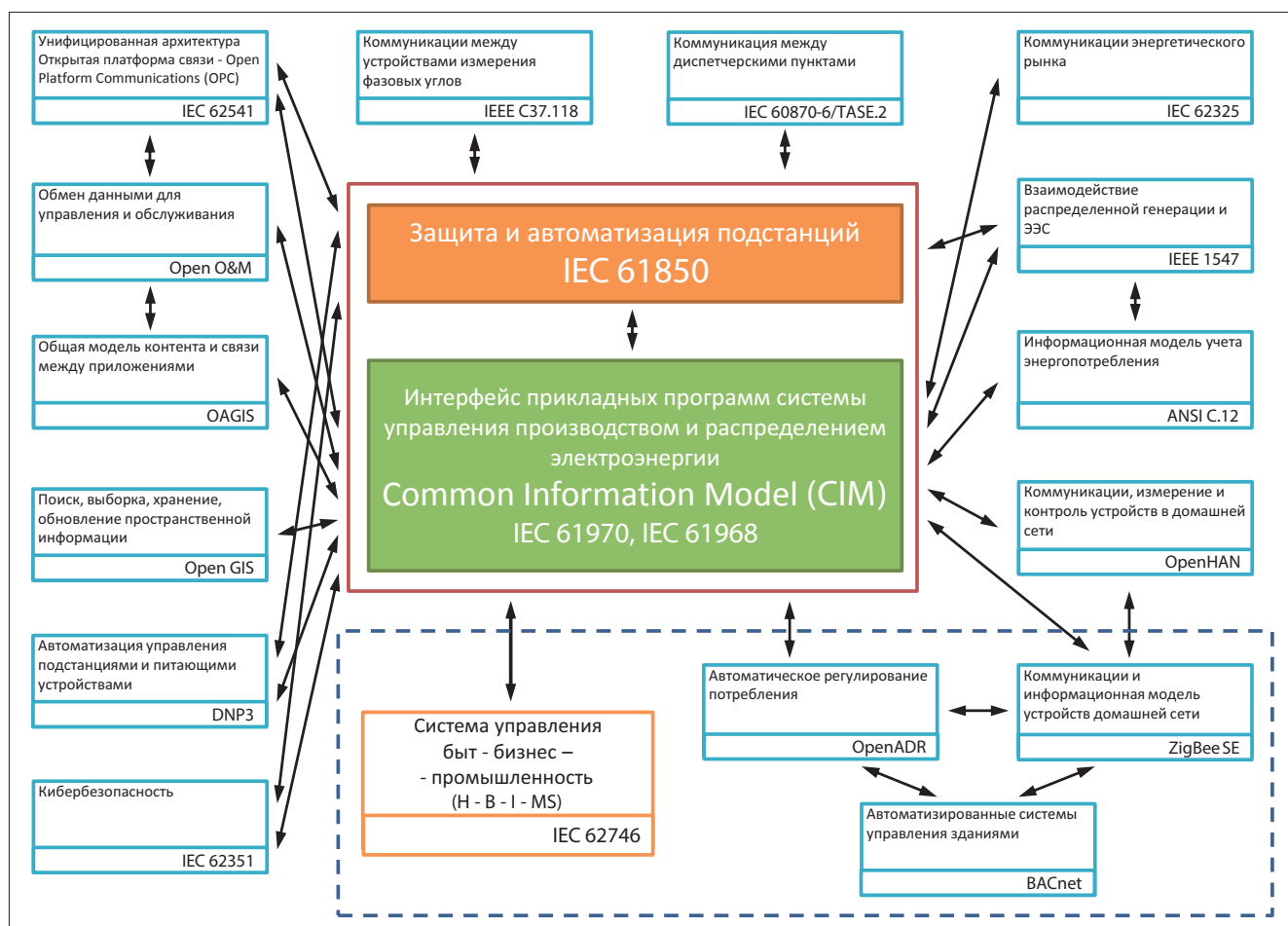


Рис. 2. Функциональная схема взаимосвязи ключевых стандартов Smart Grid

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

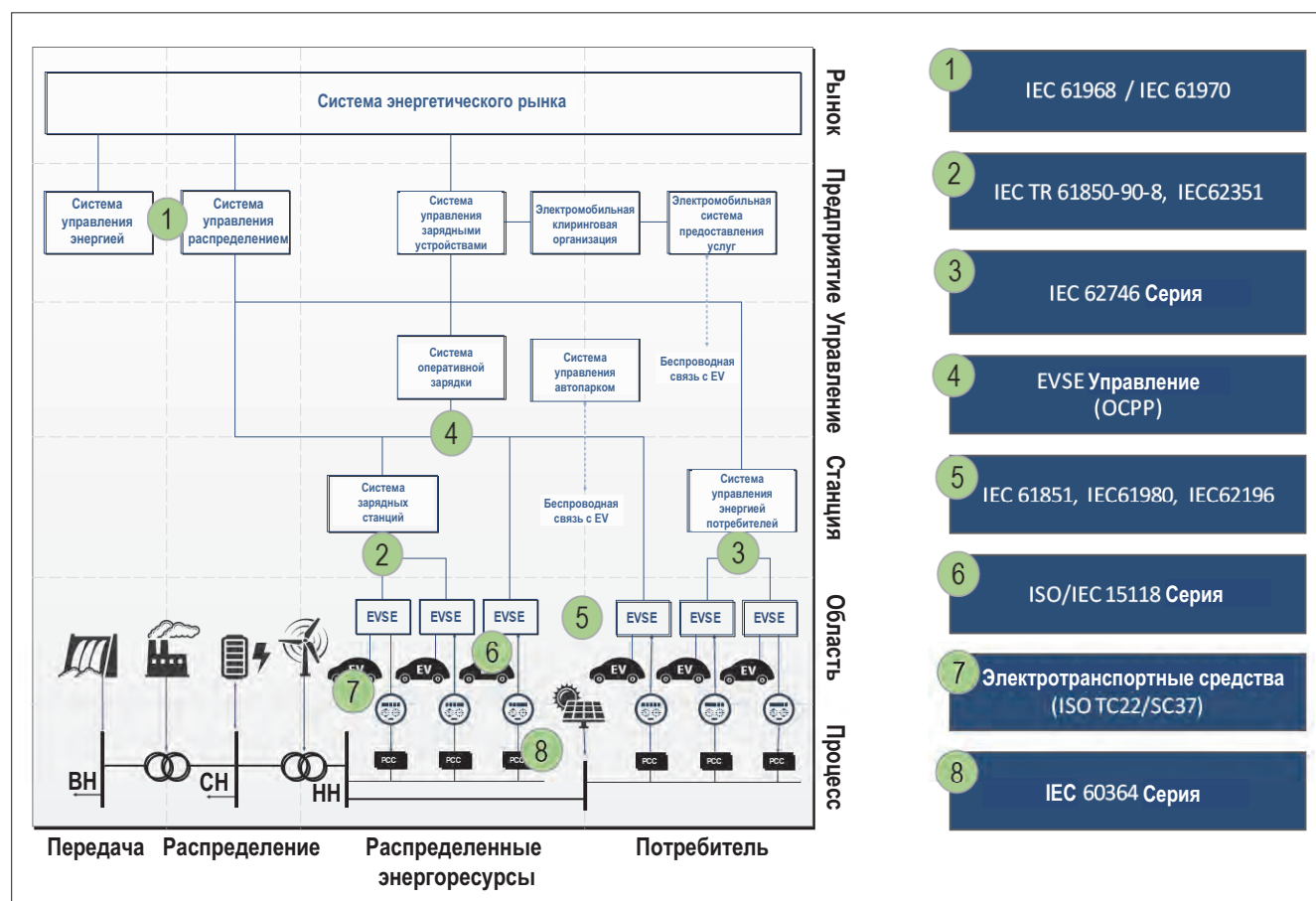


Рис. 3. Пример электрической системы и ее взаимосвязь со стандартами МЭК

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 отпаяк 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.

УДК 658.513.3

А.В. Путилов, В.Н. Червяков, И.Н. Матицин¹

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация. Реальный сектор экономики диктует правила реализации производственных и организационных процессов с применением цифровых технологий. В статье рассмотрено применение цифровых технологий и подходов цифровой экономики к созданию прогнозов и планов на предприятиях, обеспечивающих развитие атомной энергетики. Рассмотрены также семантические карты терминов, подходы к работе со структурными единицами предприятий и применение технологий цифровой экономики в данной области.

Ключевые слова: атомная энергетика, цифровая экономика, цифровые технологии, цифровая платформа, научно-технологическое прогнозирование, планирование, ядерная безопасность, семантическое ядро, моделирование.

A.V. Putilov, V.N. Chervyakov, I.N. Maticin²

DIGITAL TECHNOLOGIES FOR FORECASTING AND PLANNING THE DEVELOPMENT OF ATOMIC ENERGY

Abstract. Modernity dictates the rules for the implementation of production and organizational processes using digital technologies. The article deals with the application of digital technologies and digital economy approaches to the creation of forecasts and plans at enterprises that support the development of nuclear energy. Semantic maps of terms, approaches to work on structural units of enterprises and application of digital economy technologies in this field are considered.

Keywords: atomic energy, digital economy, digital technologies, digital platform, scientific and technological forecasting, planning, nuclear safety, semantic core, modeling.

Введение

Прогнозирование и планирование являются одними из важнейших процессов в современном развитии любой области, будь то производство, потребление или же атомная энергетика. Большое число переменных и различных научно-технологических деталей и подробностей должны быть учтены при проведении анализа

и формировании планов работ. Большие данные – основа формирования прогнозов и планов в таких высокотехнологичных отраслях, как атомная энергетика. Пока еще не сформировались технологии искусственного интеллекта, приходится использовать человеческий интеллект для обработки и анализа таких данных: форсайт-исследования – это системное использование экспертного потенциала для фор-

¹ Александр Валентинович Путилов – декан факультета бизнес-информатики и управления комплексными системами, д.т.н., профессор, *e-mail:* avputilov@mephi.ru;

Владимир Николаевич Червяков – заместитель декана факультета бизнес-информатики и управления комплексными системами, к.х.н., *e-mail:* vnchervyakov@mephi.ru;

Илья Николаевич Матицин – аспирант факультета бизнес-информатики и управления комплексными системами, *e-mail:* ilyamaticin789@gmail.com;

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

² Alexander V. Putilov – Dean of the Faculty of Business Informatics and Management of Complex Systems, Doctor of Engineering, Full Professor, *e-mail:* avputilov@mephi.ru;

Vladimir N. Chervyakov – Deputy Dean of the Faculty of Business Informatics and Management of Complex Systems, PhD in Chemical Sciences, *e-mail:* vnchervyakov@mephi.ru;

Ilya N. Maticin – postgraduate student of the Faculty of Business Informatics and Management of Complex Systems, *e-mail:* ilyamaticin789@gmail.com;

National Research Nuclear University MEPHI.

мирования научно-технологических прогнозов. Цифровые технологии позволяют эффективнее манипулировать данными и формировать прогнозы для создания долгосрочной стратегии развития атомной энергетики. Цифровая экономика все сильнее влияет на текущее положение реального производственного сектора и применение ее технологического базиса (так называемые «сквозные» технологии), на данный момент, является показателем конкурентоспособности компаний на рынке. В производственной сфере назревает так называемая третья промышленная революция [1, 2], форсайт-исследования которой приобретают все более развернутый характер, систематизируют прогнозную деятельность. Научно-технологическое прогнозирование является первым этапом стратегического планирования, что закреплено в Федеральном законе «О стратегическом планировании в Российской Федерации». На этой законодательной базе необходимо строить перспективные планы, которые будут реализовываться в условиях развивающейся цифровой экономики.

Переход к цифровой экономике – условие развития современной атомной энергетики

Ключевым конкурентным преимуществом отечественной атомной отрасли на мировом рынке атомной энергетики является интегрированное предложение по оказанию услуг сооружения, эксплуатации и обслуживания АЭС за рубежом [3-5]. Как ответственный поставщик атомных технологий, основной игрок отечественной атомной отрасли – Госкорпорация «Росатом» – обеспечивает комплексное решение при реализации проектов сооружения АЭС и активно содействует развитию атомной энергетики в странах-новичках.

Безопасность и охрана окружающей среды являются первым приоритетом [6] при создании новых атомных энергоблоков, а эффективность мирного использования атомной энергии – основной целью формируемых проектов. Комплексное решение включает в себя наряду с сооружением АЭС помощь в подготовке квалифицированного персонала, финансировании проекта, поставку ядерного топлива и пр.

Сегодня атомная отрасль является одним из лидеров по количеству и уровню научно-технических разработок в области проектирования реакторов, создания ядерного топлива, эксплуатации атомных станций и является кузницей кадров для формирования квалифицированного персонала АЭС. Отечественная атомная отрасль использует наиболее совершенные в мире технологии обогащения урана, в России и других странах строятся самые современные в мире ядерные энергоблоки с водо-водяными энергетическими реакторами поколения «три плюс» [7, 8].

В последние десятилетия в мире складывался консенсус относительно запуска нового инновационного цикла в энергетике. Это обусловлено базовыми трендами и ограничениями развития энергетических рынков: стабильным ростом спроса на электроэнергию (увеличение населения, урбанизация, индустриализация), возрастанием требований к экологичности генерирующих мощностей и качеству электроэнергии (бесперебойность, сглаживание колебаний напряжения в сети), распространением децентрализованного спроса. Наиболее распространенная во всем мире централизованная углеводородная модель энергосистемы все меньше способна отвечать на имеющиеся социально-экономические вызовы, что создает предпосылки для государственного стимулирования спроса на разработку новых энергетических технологий. Текущая модель энергосистемы будет постепенно трансформироваться, создавая вызов для всех существующих технологий, в том числе для атомной генерации [9, 10]. Этот вывод подтверждается устойчивым ростом инвестиций в энергетические НИОКР и технологии, увеличением вводов объектов альтернативной генерации в различных странах, масштабированием «умных» сетей и других инновационных энергетических технологий.

Согласно прогнозам МАГАТЭ к 2030 г. рост в секторе ядерной энергетики составит от 17% (по низкому прогнозу) до 34% (по высокому прогнозу). Эти цифры несколько ниже ранее выполненных прогнозов, что объясняется сохраняющимся эффектом от аварии на АЭС «Фукусима», низкими ценами на природный газ и ростом использования возобновляемых

источников энергии. Развитие технологий ограничено, во-первых, предельными значениями повышения эффективности; во-вторых, не до конца решенным вопросом накопления радиоактивных отходов (РАО) и облученного ядерного топлива (ОЯТ); в-третьих, в меньшей степени, чем по нефти и газу, но присутствующими ограничениями ресурсной базы. Нерешенность указанных вопросов на фоне растущего конкурентного давления со стороны новых энергетических технологий (альтернативная энергетика, «чистый» уголь и др.) могут привести при пассивной позиции разработчиков атомных технологий к сокращению доли атомной генерации. Активизировавшиеся из-за аварии на АЭС «Фукусима» антиядерные настроения во многих странах мира стали дополнительным фактором, влияющим на темпы развития атомной энергетики в среднесрочной перспективе. Решения относительно долгосрочных планов развития атомной отрасли с учетом продолжительности технологических циклов строятся на основе видения базовых трендов развития мировых энергетических технологий. Цифровые технологии,

которые стоят на пороге реального сектора экономики, позволят на новом уровне объединить преимущества базовой атомной генерации, пиковой углеводородной энергетики и новых возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Цифровые технологии прогнозирования развития энергетики

Технологический маркетинг энергетических систем [11, 12] подразумевает прогнозирование будущих рынков и сравнение возможных инженерных решений. В рамках форсайт-исследований в области энергетической политики был проведен анализ больших данных новостных, научных, патентных и иных открытых российских и зарубежных информационных ресурсов, включая ключевые стратегические и прогнозные документы, в том числе крупных корпораций и консалтинговых компаний. В рамках форсайт-исследований используются различные методы и технологии, объединение которых включается в так называемый форсайт-ромб (рис. 1). В настоящее время разработано около пятидеся-



Рис. 1. Структурная схема форсайт-ромба

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ти технологий прогнозирования (метод Дельфи, экспертные панели, библиографический анализ, моделирование и пр.), которые тяготеют к различным углам этого форсайт-ромба. Противоположные углы этого условного «вместилища» форсайт-технологий являются дополняющими друг друга подходами, обеспечивающими полноту и достоверность прогнозирования: творческий подход или креативность дополняется доказательными методами моделирования, а индивидуальность экспертов компенсируется коллективными методами их взаимодействия. В любом форсайт-исследовании используется несколько методов из той полусотни, которая накоплена к настоящему времени, важно, чтобы эти методы тяготели ко всем четырем углам форсайт-ромба, что обеспечивает полноту и обоснованность научно-технологического прогнозирования.

Проведенный в рамках форсайт-исследования библиометрический анализ выявил, что наибольшей статистической значимостью обладают зарубежные ресурсы, поэтому именно на их основе была проведена статистическая обработка больших данных. Рассматривались ис-

точники информации за последние 5 лет (2013-2017 годы). Всего было проанализировано более 20 млн документов, из которых в 114580 документах присутствовали упоминания релевантных сфере возобновляемой энергии терминов и в 36562 – упоминались термины связанные с ядерной энергией. Перечень ключевых слов, на основе которых проводился анализ, был подготовлен экспертами ОИВТ РАН (возобновляемая энергетика) и НИЯУ МИФИ (ядерная энергетика). При подготовке «Технологического прогноза – 2030» использовались аналогичные подходы, к этой работе были привлечены ведущие университеты. Структура университетов-координаторов при проведении форсайт-исследований научно-технологического развития представлена на рис. 2.

Одним из наиболее важных терминов, обладающих наибольшими показателями значимости и центральности стал термин «ядерная безопасность» (Nuclear safety and security). Кластер, в котором расположена эта тематика, является центральным – сразу несколько его направлений характеризуются высокими показателями ранга. Кроме ядерной безопасности в этом кла-

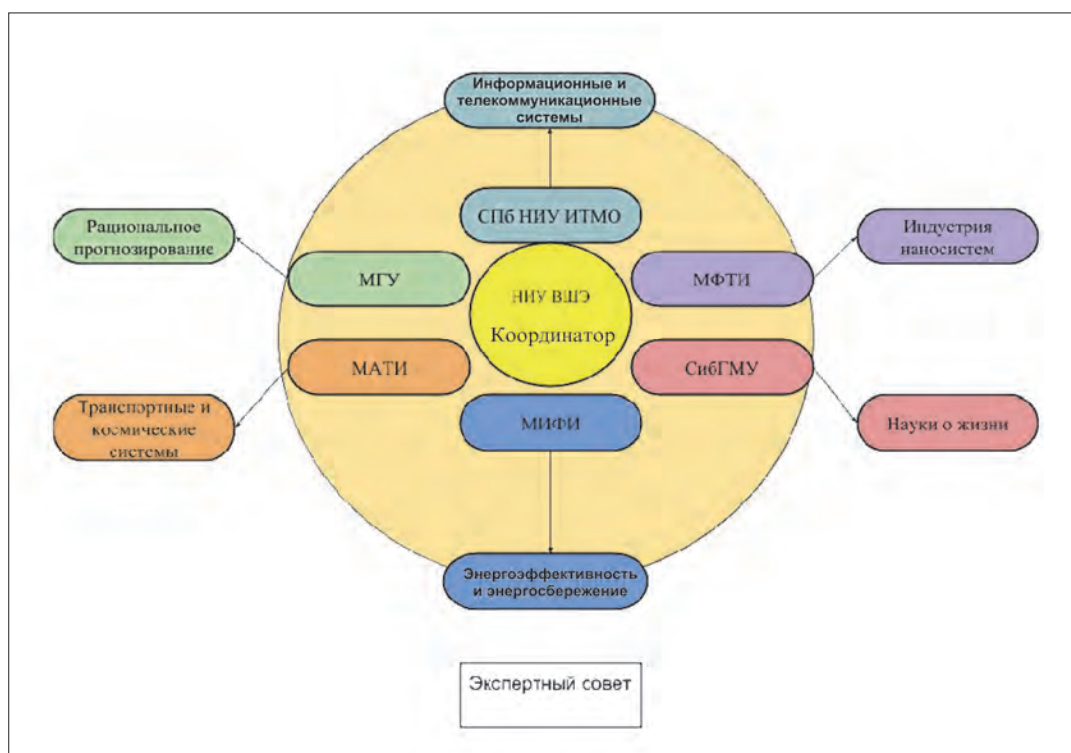


Рис. 2. Структура университетов-координаторов при проведении форсайт-исследований научно-технологического развития

ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

стере выделяются такие тематики, как «атомная энергия» (Nuclear power), «ядерный топливный элемент» (Nuclear fuel cell) и «ядерный материал» (Nuclear material). Кроме этого, на семантической карте были выделены следующие крупные кластеры:

- развитие энергетики, топливный элемент, ядерная физика (Energy development, Fuel cell, Nuclear physics);
- магнитное поле, компактный тороид, порядок величины (Magnetic field, Compact toroid, Order of magnitude);
- поглощенная доза излучения, гамма-луч, радиационное воздействие (Absorbed dose, Gamma ray, Radiation effect);
- охрана природы (этика), изменение климата, план действий (Conservation (ethic), Climate change, Action plan).
- химический элемент, организационное поведение, паровой котел (бойлер) (Chemical element, Organizational behavior, Steam generator (boiler));

- атомное ядро, электрическое поле, элементарные частицы (Atomic nucleus, Electric field, Elementary particle);
- электростанция, ядро ядерного реактора, оболочка реактора (Power station, Nuclear reactor core, Containment building) и др.

Также к лидерам относится кластер «Развитие энергетики, топливный элемент ядерная физика», встречаемость терминов которого в относительном выражении по годам значительно выросла в 2017 г. и составила 2,39%. Кроме того, в 2017 г. ощутимо повысилась упоминаемость направлений, объединенных в следующие кластеры:

- электроэнергия, Шаньдун, холодный синтез (Electric power, Shandong, Cold fusion) – с 0,19% в 2013 до 0,75% в 2017;
- деление клеток, ядерная мембрана, размер частиц (Cell division, Nuclear membrane, Grain size) – с 0,27% в 2014 до 0,71% в 2017;
- цепной реактор, расплавленная соль, «углеродный» налог (Chain reactor,



Рис. 3. Структура и соотношение «значимость-динамика» в области ядерных технологий на основе библиометрического анализа больших данных

Molten salt, Carbon tax) – с 0,12% в 2013 до 0,79% в 2017;

- устойчивая энергетика, просвечивание, вирус Зика (Sustainable energy, Transmission (medicine), Zika virus) – с 0,04% в 2013 до 0,57% в 2017.

К зрелым трендам относятся: радиоактивные отходы (Radioactive waste), ядерная физика (Nuclear physics), воздействие радиационного излучения (Radiation effect), ядерный реактор с засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов (Pebble-bed reactor), солнечная энергия (Solar power), малый модульный реактор (Small modular reactor), источник радиации (Radioactive source), протонный керамический топливный элемент (Protonic ceramic fuel cell), ториевый топливный цикл (Thorium fuel cycle).

Зарождающиеся тренды включают в себя следующие направления: элементарная частица (Elementary particle), цепная реакция (Chain reaction), развитие компетенций (Capacity building), атомное ядро (Atomic nucleus), катушка соленоида (Electromagnetic coil), природные ресурсы (Natural resource). Нишевые тематики содержат: нуклон (Nucleon), доза радиоактивного облучения (Radiation exposure), ветроэнергетика (Wind power), производство водорода (Hydrogen production), электроэнергия (Electric power), инерциально-термоядерный синтез (Inertial confinement fusion), пенометалл (Metal foam), отключение электроэнергии (Power outage), корпус реактора (Reactor pressure vessel), гранулированные материалы (Granular material). По этим направлениям необходимо проводить дополнительные исследования, которые обеспечат детализацию энергетических схем и типов ядерных энергоресурсов [13, 14], а также возможного применения энергоблоков для освоения полезных ископаемых [15], необходимого объема подготовки кадров [16].

В состав квадранта «Старые тренды» входят следующие тематики: ядерная безопасность (Nuclear safety and security), ядерная энергетика (Nuclear power), атомная электростанция (Nuclear power plant), ядерный реактор (Nuclear reactor), ядерная технология (Nuclear technology), ядерная реакция на быстрых нейтронах (Fast-neutron reaction), продукт распада атомного ядра (Nuclear fission product), защита от радио-

активного излучения (Radiation protection). В дополнение к проведенному анализу ключевых направлений были также проанализированы наиболее значимые организации в рассматриваемой сфере, которые, также как и термины на семантической карте, были разбиты по кластерам в соответствии с рис. 3. На сетевой карте коопераций и аффилированных структур в области ядерной энергетике выделяются несколько основных кластеров, объединяющие организации, которые часто упоминаются совместно. Точки, обозначающие организации из одного кластера, окрашены в один и тот же цвет. К центральному кластеру относятся такие организации в сфере ядерной энергетике, как Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Canadian Nuclear Safety Commission; World Nuclear Association, OECD Nuclear Energy Agency (NEA) и др. В кластере, включающем в себя крупные национальные правительственные организации, расположены такие организации, как NASA, Pentagon, US Department of Energy (DOE) и др. К кластеру, содержащему организации в сфере медиа, специализирующиеся в области финансов, относятся New Co, New York Times, Financial Times, Les Echos.

В кластер, объединяющий энергетические компании, включены Bloom Energy, EDF Energy, Westinghouse Electric Company и др. В целом детальный анализ тенденций и прогноз развития атомной энергетике еще предстоит завершить, но цифровые технологии для этого уже разработаны и используются [17]. В ближайшем будущем на базе результатов библиометрического анализа пройдут панели экспертов, будут использованы методы моделирования и другие технологии форсайт-исследований. Основная направленность дальнейшей работы – развитие инновационной парадигмы [18, 19] в реализации новых энергетических технологий и оценка «цифрового будущего» новых экономических отношений в энергетической сфере [20].

Цифровые технологии планирования развития атомной энергетике

Ближнесрочный прогноз убедительно свидетельствует о растущем спросе на мировом рынке отечественных технологий ядерных реакторов

типа ВВЭР. Для развития ядерных технологий и в целях обеспечения конкурентоспособности ядерной энергетической системы России на мировом рынке осуществлена разработка проекта типовой оптимизированной, информатизированной двухблочной АЭС по технологии ВВЭР, выполненной в современной информационной среде и соответствующей требованиям ядерной и радиационной безопасности (ВВЭР-ТОИ). Проведена демонстрация системы моделирования процесса сооружения АЭС с применением «мульти-D» информационной модели АЭС, информационная модель уже внедрена на трех площадках (Курск, Смоленск, Волгодонск), реализуется данная модель и при сооружении АЭС за рубежом. Дальнейшие разработки, связанные с технологией генерации тепловой и электрической энергии, проводятся в рамках проектов по внедрению информационных технологий и программы модернизации АЭС, обоснования безопасности строящихся и эксплуатируемых АЭС, в том числе с использованием пассивных методов безопасности без увеличения капитальной составляющей стоимости электроэнергии. Также осуществляется реализация проектов развития технологий по конверсии и обогащению урана, фабрикации и рефабрикации ядерного топлива, направленных на модернизацию производств, обеспечение увеличения энергоэффективности, снижения объема РАО и экологической нагрузки на окружающую среду, а также централизацию переработки оборотных урановых продуктов предприятий. Формируется проект создания отечественной суперкомпьютерной технологии расчетного анализа эффективности и долговечности конструкций, работающих в условиях интенсивных воздействий, характерных для эксплуатации перспективных АЭС, который предполагается к реализации в ближайшее время кооперацией предприятий ГК «Росатом». Целями проекта являются:

- сокращение затрат и сроков проектирования и НИОКР за счет отказа от сложных, дорогостоящих и длительных натурных ресурсных испытаний;
- возможность создания энергетического оборудования с улучшенными характеристиками и повышенной надежностью за счет выбора оптимальных конструк-

тивных и режимных решений на основе многовариантных результатов численного моделирования;

- обеспечение возможности продления сроков эксплуатации РУ сверх проектных в условиях ограниченности технического диагностирования.

Технология, создаваемая в рамках проекта, основывается на базе отечественного импортозамещающего пакета программ. В рамках проекта предполагается решение следующих задач:

- проведение численных исследований для подтверждения соответствия применяемых математических моделей и экспериментальных данных;
- получение представительных экспериментальных данных об усталостных свойствах конструкционных материалов при различных уровнях амплитуд напряжений, обусловленных интенсивными термоциклическими воздействиями;
- адаптация пакета программ для решения прикладных задач при проектировании ядерных энергетических установок различного типа.

Математические модели, использование которых позволяет планировать развитие атомной энергетики, требует постоянной верификации и модернизации. Проект «Сквозная технология верификации математических моделей виртуального энергоблока (ВЭБ) на базе 3D расчетов» реализуется в рамках концепции «Виртуальный энергоблок – 2.0» кооперацией предприятий ГК «Росатом», период реализации проекта – до 2020 года. Целью проекта является разработка технологии верификации одномерных математических моделей оборудования и узлов АЭС, используемых для моделирования теплогидравлических процессов. Под верификацией понимается уточнение одномерных математических моделей для узлов, обладающих сложной геометрией, за счет использования результатов моделирования этих узлов в трехмерных инженерных кодах. Данная технология позволит повысить качество комплексной математической модели АЭС. Реализация проекта является актуальной и имеет важное значение для создания математических моделей оборудования АЭС,

необходимых для оптимизации и обоснования безопасности проектных решений, а также сокращения сроков и трудоемкости пусконаладочных работ.

Вопросы безопасности АЭС в цифровых форматах также развиваются весьма интенсивно. Например, проект создания сквозной технологии обоснования водородной безопасности на базе суперкомпьютерной платформы предполагается к реализации до 2020 г. кооперацией предприятий ГК «Росатом» и направлен на устранение недостатков существующей технологии моделирования с использованием большого количества отдельных расчетных кодов, отсутствием единого графического интерфейса, необходимостью ручной передачи информации между кодами. В проекте предлагается создать технологию на базе суперкомпьютерной платформы, которая уже имеет верифицированные модели расчета теплообмена, аэродинамики и прочности, а также современные средства подготовки расчетных моделей и механизмы передачи распределений физических величин между различными этапами сквозного расчета и обработки результатов. В ходе проекта будут доработаны и верифицированы модели горения и расчета напряженно-деформированного состояния, реализованные в расчетных модулях пакета программ.

Для проектных и эксплуатационных расчетов и обоснования безопасности АЭС используются компьютерные коды по следующим тематическим направлениям: нейтронно-физические расчеты, моделирование аварий, радиационная нагрузка на корпус реактора, термомеханика и прочность, теплогидравлика, радиационная безопасность, водно-химический режим, ядерная безопасность при обращении с топливом, системы внутриреакторного контроля, анализ проектных, запроектных и тяжелых аварий, вероятностный анализ безопасности, симптомно-ориентированные аварийные инструкции. Развитие атомной энергетики требует постоянного развития и совершенствования расчетных кодов. Подготовка кадров для данной работы [21] будет обеспечивать успех этой достаточно масштабной деятельности. Для развития, совершенствования и подтверждения достоверности

(валидации) расчетных кодов в ближайшее время планируется:

- провести ряд экспериментальных исследований;
- организовать расчетные бенчмаркинговые сопоставления, в том числе международные;
- получить доступ к имеющимся экспериментальным данным и показателям эксплуатации АЭС;
- принять участие в разработке отраслевых методик и стандартов (анализа неопределенности, стандартов исходных данных и пр.).

Цифровые платформы развития энергетических систем

Приведенные выше примеры использования цифровых технологий должны в ближайшее время сложиться в единую цифровую платформу/набор цифровых платформ, нормативной основой которых является Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Реализацию конкретных мер по формированию цифрового экономического пространства и внедрению «сквозных» технологий данной программы по приоритетным направлениям на период до 2024 г. можно условно разбить на два этапа.

На первом этапе (2018-2020 гг.) основные действия должны быть направлены на запуск организационных изменений и пилотных проектов: этот этап может объединить все мероприятия, связанные с нормативным регулированием приоритетных сфер научно-технологической политики, организационными изменениями, разработкой новых стандартов и механизмов финансирования предлагаемых изменений.

Второй этап (2021-2024 гг.) должен быть связан с переходом к действию в регулярном режиме в масштабе всей экономики: вступление в силу и применение правовых норм и организационных изменений, совершенных на предшествующем этапе, масштабирование содержательных мер, предусмотренных к реализации по каждому из направлений. Целесообразно отметить, что для обеспечения дальнейших изменений по итогам двух этапов реализации программы может быть

подготовлен новый стратегический пакет действий на перспективу примерно до 2035 г., который будет отталкиваться от уже достигнутых результатов включения России в новую глобальную технологическую реальность, актуальных мировых тенденций технологического развития и позиций России на глобальных высокотехнологичных рынках. В этот период на базе передовых производственных технологий может быть совершена смена моделей развития ряда ключевых секторов российской экономики:

- в сфере энергетики – переход к цифровой и интеллектуальной энергетике, энергетическим мультиагентным системам, развитие технологий так называемой постуглеродной энергетики, включая масштабное развитие атомной энергетики;
- в сфере природных ресурсов – переход к предельно рациональному использованию природных ресурсов России, а в отдаленной перспективе – к использованию природоподобных технологий.



Рис. 4. Место крупных электростанций, включая АЭС, в будущей цифровой энергетической платформе

В достаточно отдаленной перспективе можно предположить создание глобальных цифровых платформ, объединяющих различные типы энергетических систем в единый энергетический комплекс. Скорее всего, такие платформы будут создаваться на базе систем распределенного реестра, известных как системы блокчейн. Экономические отношения в таких цифровых

платформах (рыночная конкуренция, посредники и пр.) постепенно будут вытесняться алгоритмическими отношениями производителей и потребителей энергии на базе долгосрочных контрактов («умные» договорные отношения). Для формирования подобных платформ, возможно, понадобится создание нового типа государственной поддержки (государственные энергетические гарантии) и межгосударственных отношений (энергетические союзы) перехода на новый уровень энергетической эффективности: максимизации внутреннего валового продукта на единицу затраченной энергии. Климатические ограничения (парниковые газы и пр.) в рамках таких платформ могут быть обеспечены эффективной комбинацией базовой нагрузки пиковых энергетических колебаний за счет использования наиболее природосберегающих энергетических систем. Вклад и тех и других за счет системы распределенного реестра будет учтен достаточно тщательно и достоверно, что позволит автоматизировать экономические расчеты между производителями и потребителями энергии. Первые работы по цифровым платформам сложных комплексных систем уже появились [22], дальнейшее развитие исследований и разработок следует проводить для максимального использования в таких платформах «сквозных» технологий цифровой экономики.

Заключение

Наступающую эру можно охарактеризовать как эпоху цифровых платформ, вытесняющих с рынка и из производства неэффективных посредников и заменяющих их эффективными алгоритмами. Существуют разновидности этих платформ, можно различить две большие группы: электронные торговые площадки и инструменты автоматической внерыночной координации совместной деятельности (виртуальные офисы, а также инструменты для более крупных хозяйственных единиц), производства товаров, оказания услуг, включая энергетические. Подключение к цифровым платформам дает субъектам рынка такие конкурентные преимущества, что по мере захвата этими платформами национальных и мировых рынков в полной мере начнется процесс кардинальной трансформации реального сектора экономики.

Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки России по лоту шифр 2017-14-573-0002 по теме: «Разработка прогноза реализации приоритета научно-технологического развития, определенного п. 206 «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии» Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» (шифр заявки «2017-14-573-0002-026», уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI60117X0014).

ЛИТЕРАТУРА

1. Рифкин Д. Третья промышленная революция. Как горизонтальные взаимодействия меняют энергетику, экономику и мир в целом. М.: Альпина нон-фикшн, 2015.
2. Daheim C., Uerz G. Corporate foresight in Europe: from trend based logics to open foresight // *Technology Analysis & Strategic Management*, 2008. Vol. 20, N 3, p. 321-336.
3. Путилов А.В., Воробьев А.Г. Принципы формирования «экономического креста» в прогнозировании развития атомного энергопромышленного комплекса // *Экономика в промышленности*, № 1, 2013, с. 35-40.
4. Абрамова Е.А., Апокин А.Ю., Белоусов Д.Р. и др. Будущее России: макроэкономические сценарии в глобальном контексте // *Форсайт*, Т. 7, № 2, 2003, с. 6-25.
5. Путилов А.В., Воробьев А.Г., Стриханов М.Н. Инновационная деятельность в атомной отрасли. Кн. 1. Основные принципы инновационной политики. М.: Руда и Металлы, 2010. 184 с.
6. Лукьянчиков Н.Н. Природная рента и охрана окружающей среды. М., 2004. 129 с.
7. Сидоренко В.А. О стратегии ядерной энергетики России до 2050 года / *Росэнергоатом*, № 6, 2012, с. 9-18.
8. Путилов А.А., Воробьев А.Г., Путилов А.В., Гольдман Е.Л. Государственные корпорации и развитие высокотехнологичных отраслей реального сектора экономики: исторический обзор и мировой опыт // *Экономика в промышленности*, № 2, 2009, с. 2-13.
9. Путилов А.А., Воробьев А.Г., Путилов А.В., Гольдман Е.Л. Государственные корпорации и развитие высокотехнологичных отраслей реального сектора экономики: экономические преимущества и роль в промышленной модернизации // *Экономика в промышленности*, №3, 2009, с. 13-21.
10. Ильина Н.А., Путилов А.В. Анализ становления, текущее состояние и перспективы развития основных участников мирового инновационного атомного рынка // *Инновации*, № 9, 2012, с. 10-15.
11. Путилов А.В., Быковников И.Л., Воробьев Д.А. Методы технологического маркетинга в анализе эффективности технологических платформ в области энергетики // *Инновации*, № 2, 2011, с. 82-90.
12. Путилов А.А., Воробьев А.Г., Путилов А.В. Экономические характеристики уранового сырья в дореакторном технологическом разделе ядерных энергоресурсов // *Цветные металлы*, № 4, 2010, с. 89-95.
13. Шимкевич А., Прошкин А., Седов А. Перспективное плотное топливо для энергетических реакторов // *Росэнергоатом*, № 10, 2011, с. 36-41.
14. Путилов А.В., Воробьев А.Г., Тимохин Д.В., Разоренов М.Ю. Использование метода «экономического креста» в расчетах потребности ядерного топлива для развития атомной энергетики // *Цветные металлы*, № 9, 2013, с. 18-26.
15. Путилов А.В., Воробьев А.Г., Тимохин Д.В., Разоренов М.Ю., Мякота Е.А. Методы совершенствования прогнозирования развития энергоснабжения месторождений полезных ископаемых // *Цветные металлы*, № 2, 2014, с. 11-18.
16. Ильина Н.А., Путилов А.В., Баранова И.А. Кадровое обеспечение управления знаниями в инновационной экономике // *Инновации*, № 10, 2016, с. 2-6.

17. Коптелов М.В., Гусева А.И. Особенности определения риска в инвестиционных проектах строительства АЭС // *Атомная энергия*, Т. 115, вып. 3, 2013, с. 170-176.

18. Иванов В.В. *Инновационная парадигма XXI (2-е изд.)*. М.: Наука, 2015. 383 с.

19. Иванов В.В., Малинецкий Г.Г. *Россия XXI век. Стратегия прорыва: технологии, образование, наука (2-е изд.)*. М.: Ленанд, 2017. 304 с.

20. Иванов В.В., Путилов А.В. *Цифровое будущее: следующий шаг в развитии атомных энергетических технологий // Энергетическая политика*, № 3, 2017, с. 31-41.

21. Путилов А.В. *Развитие технологий и подготовка кадров для цифровой экономики в энергетике // Энергетическая политика*, № 5, 2017, с. 58-65.

22. Соколов А.В. *Форсайт, взгляд в будущее*. URL: <https://foresight.hse.ru/data/380/621/1234/Whatforesight.pdf>

REFERENCES

1. Rifkin D. *Tret'ya promyshlennaya revolyutsiya. Kak gorizontallye vzaimodeystviya menyayut energetiku, ekonomiku i mir v tselom*. М.: Al'pina non-fikshn, 2015.

2. Daheim S., Uerz G. *Corporate foresight in Europe: from trend based logics to open foresight // Technology Analysis & Strategic Management*, 2008. Vol. 20, N 3, p. 321-336.

3. Putilov A.V., Vorob'yev A.G. *Printsipy formirovaniya «ekonomicheskogo kresta» v prognozirovaniy razvitiya atomnogo energopromyshlennogo kompleksa // Ekonomika v promyshlennosti*, № 1, 2013, s. 35-40.

4. Abramova Ye.A., Apokin A.Yu., Belousov D.R. *i dr. Budushcheye Rossii: makroekonomicheskiye stsensarii v global'nom kontekste // Forsayt*, Т. 7, № 2, 2003, s. 6-25.

5. Putilov A.V., Vorob'yev A.G., Strikhanov M.N. *Innovatsionnaya deyatel'nost' v atomnoy otrasli. Kn. 1. Osnovnyye printsipy innovatsionnoy politiki*. М.: Ruda i Metally, 2010. 184 s.

6. Luk'yanchikov N.N. *Prirodnaya renta i okhrana okruzhayushchey sredy*. М., 2004. 129 s.

7. Sidorenko V.A. *O strategii yadernoy energetiki Rossii do 2050 goda // Rosenergoatom*, № 6, 2012, s. 9-18.

8. Putilov A.A., Vorob'yev A.G., Putilov A.V., Gol'dman Ye.L. *Gosudarstvennyye korporatsii i razvitiye vysokotekhnologichnykh otrasley real'nogo sektora ekonomiki: istoricheskiy obzor i mirovyy opyt // Ekonomika v promyshlennosti*, № 2, 2009, s. 2-13.

9. Putilov A.A., Vorob'yev A.G., Putilov A.V., Gol'dman Ye.L. *Gosudarstvennyye korporatsii i razvitiye vysokotekhnologichnykh otrasley real'nogo sektora ekonomiki: ekonomicheskiye preimushchestva i rol' v promyshlennoy modernizatsii // Ekonomika v promyshlennosti*, №3, 2009, s. 13-21.

10. Il'ina N.A., Putilov A.V. *Analiz stanovleniya, tekushcheye sostoyaniye i perspektivy razvitiya osnovnykh uchastnikov mirovogo innovatsionnogo atomnogo rynka // Innovatsii*, № 9, 2012, s. 10-15.

11. Putilov A.V., Bykovnikov I.L., Vorob'yev D.A. *Metody tekhnologicheskogo marketinga v analize effektivnosti tekhnologicheskikh platform v oblasti energetiki // Innovatsii*, № 2, 2011, s. 82-90.

12. Putilov A.A., Vorob'yev A.G., Putilov A.V. *Ekonomicheskiye kharakteristiki uranovogo syr'ya v doreaktornom tekhnologicheskom peredele yadernykh energoresursov // Tsvetnyye metally*, № 4, 2010, s. 89-95.

13. Shimkevich A., Proshkin A., Sedov A. *Perspektivnoye plotnoye toplivo dlya energeticheskikh reaktorov // Rosenergoatom*, № 10, 2011, s. 36-41.

14. Putilov A.V., Vorob'yev A.G., Timokhin D.V., Razorenov M.Yu. *Ispol'zovaniye metoda «ekonomicheskogo kresta» v raschetakh potrebnosti yadernogo topliva dlya razvitiya atomnoy energetiki // Tsvetnyye metally*, № 9, 2013, s. 18-26.

15. Putilov A.V., Vorob'yev A.G., Timokhin D.V., Razorenov M.Yu., Myakota Ye.A. *Metody sovershenstvovaniya prognozirovaniya razvitiya energosnabzheniya mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh // Tsvetnyye metally*, № 2, 2014, s. 11-18.

16. Il'ina N.A., Putilov A.V., Baranova I.A. *Kadrovoye obespecheniye upravleniya znaniyami v innovatsionnoy ekonomike* // *Innovatsii*, № 10, 2016, s. 2-6.

17. Koptelov M.V., Guseva A.I. *Osobennosti opredeleniya riska v investitsionnykh proyektakh stroitel'stva AES* // *Atomnaya energiya*, T. 115, vyp. 3, 2013, s. 170-176.

18. Ivanov V.V. *Innovatsionnaya paradigma XXI (2-e izd.)*. M.: Nauka, 2015. 383 s.

19. Ivanov V.V., Malinetskiy G.G. *Rossiya XXI vek. Strategiya proryva: tekhnologii, obrazovaniye, nauka (2-e izd.)*. M.: Lenand, 2017. 304 s.

20. Ivanov V.V., Putilov A.V. *Tsifrovoye budushcheye: sleduyushchiy shag v razvitii atomnykh energeticheskikh tekhnologiy* // *Energeticheskaya politika*, № 3, 2017, s. 31-41.

21. Putilov A.V. *Razvitiye tekhnologiy i podgotovka kadrov dlya tsifrovoy ekonomiki v energetike* // *Energeticheskaya politika*, № 5, 2017, s. 58-65.

22. Sokolov A.V. *Forsayt, vzglyad v budushcheye*. URL: <https://foresight.hse.ru/data/380/621/1234/Whatforesight.pdf>

Поступила в редакцию
19.07.2018 г.

УДК 620.9+004.9

А.С. Гуменный, Л.В. Масленникова¹

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕРАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭНЕРГОМОЩНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГИИ

Аннотация. Публикуя в дискуссионном порядке данную статью в выпуске, посвященном цифровизации энергетики, редакция журнала отмечает принципиально новое направление использования блокчейн-технологий в энергетике на базе свободной энергии электрических станций в сочетании с цифровыми майнинговыми фермами для получения нового продукта – криптовалюты. Этот подход позволяет по-новому интегрировать энергетические и информационно-цифровые возможности на современном технологическом укладе для формирования новых типов эргатических (человеко-машинных) интеллектуальных систем.

Ключевые слова: энергетика, криптовалюты, блокчейн-технологии, инвесторы, цифровая экономика.

A.S. Gumenny, L.V. Maslennikova²

USING UNDISTRIBUTED POWER CAPACITIES WITH THE HELP OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY

Abstract. When publishing this article as a basis for discussion in the issue focused on the power industry digitalization, the editorial board of the journal acknowledges a fundamentally new use of blockchain technologies in power engineering based on free energy of power plants coupled with digital mining farms to obtain a new product – cryptocurrency. This approach makes it possible to integrate power-generating, information and digital capabilities in an innovative way under the modern technological paradigm in order to develop new types of ergatic (human-machine) intelligent systems.

Keywords: power engineering, cryptocurrencies, blockchain technologies, investors, digital economy.

Блокчейн в настоящее время – это одна из самых перспективно-развитых международных децентрализованных систем – сервисов хранения и отслеживания информации, выступающая универсальной технологией, обеспечивающей реализацию большой совокупности коммерческих сделок в самых разных сферах. Каждая сделка не будет считаться завершенной (исполненной), если ее не зарегистрируют в блоке информации по сделке с индивидуальным сложно генерируемым хеш-кодом. Эта цепочка может расти неограниченно долго, пока будет существовать система-блокчейн. Подлинность сделки одновременно определяют компьютеры, так называемые «майнеры», входящие и образу-

ющие систему блокчейн. Их задача состоит в том, чтобы подобрать и синхронизировать коды, которые будут соответствовать хэшу предыдущего блока, а также сумме всех прошлых транзакций за последние 10 минут и сгенерировать случайным образом математические коды ответственности сделкам блока. Все майнеры борются за лидерство нахождения кода, так как они получают вознаграждение в виде биткоинов за каждый полученный под контроль блок транзакций, а также комиссионное вознаграждение за отдельную транзакцию, обработанную с высокой скоростью майнинга, единицей измерения которой выступает хеш в секунду. Все биткоин-переводы записываются в общедоступную

¹ Александр Сергеевич Гуменный – студент факультета международного энергетического бизнеса РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, *e-mail:* alexandergumenny@mail.ru;

Людмила Васильевна Масленникова – заместитель декана факультета международного энергетического бизнеса РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, к.э.н., доцент, *e-mail:* l_maslennikova@list.ru.

² Alexander S. Gumenny – student of the Faculty of International Energy Business at the Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), *e-mail:* alexandergumenny@mail.ru;

Lyudmila V. Maslennikova – Deputy Dean of the Faculty of International Energy Business at the Gubkin Russian State University of Oil and Gas, PhD in Economics, Associate Professor, *e-mail:* l_maslennikova@list.ru.

цепочку транзакций, каждый зарегистрированный пользователь этой сети может посмотреть информацию о совершенной сделке.

Каждый новый блок, в котором заключена некоторая информация, защищен индивидуальным хэш-кодом, который невозможно изменить, так как, если попытаться внедрить новые данные в блок соответствующего кода, то не будет найдено соответствие предыдущим операциям по сделке и система этого изменения в блоке не воспримет и не исполнит.

Какова же роль биткоина как криптовалюты в этой системе? Валюта биткоина не анонимна, так как алгоритм майнинга, лежащий в основе технологии блокчейн, обеспечивает доступ к информации как минимум двум группам участников: первая – те, кто совершает транзакции, вторая – те, кто обрабатывают, кодирует и встраивает в боки информацию о транзакциях. Отсюда экономическая эффективность майнинга и, соответственно, курс биткоина зависят от двух важных факторов: скорости майнинга (хеш в секунду) и степени сложности и мощности компьютерного оборудования у майнера.

Здесь возможны три ситуации. Первая, когда скорость роста курса криптовалюты значительно выше, чем рост мощности и сложности компьютерной сети. В этом случае система обеспечивает полную окупаемость затрат и приносит накопление. Вторая ситуация, когда темпы роста курса биткоина и степени сложности (а значит и дороговизны) сети примерно одинаковы и происходят в одни и те же отрезки времени. В этом случае так же можно говорить об окупаемости и некоторой эффективности. Третья ситуация, когда высокие темпы роста курса криптовалюты сегодня были обеспечены огромными инвестициями в сверхмощное компьютерное оснащение системы, окупаемость которой растягивается на длительный период времени и возникает риск несоответствия периода высокого курса с периодом окупаемости затрат на систему. Биткоин рассматривается как инструмент технологии блокчейн, которая широко используется в бизнес-среде, где низка степень доверия как к традиционной валюте, так и между участниками сделок, а также велико количество и объемы сделок. Так, современные крупные энергетические корпорации, являющиеся гене-

раторах и хранителями гигантских объемов информации (Big Data), нуждаются в применении технологии блокчейн как некоторой распределенной по сети базе данных с высокой степенью защиты и децентрализованным доступом участников сделок. То есть создается большая синхронизированная информационная система, где невозможен обман.

Каким же образом новые блоки включаются в систему блокчейн? Добавление нового блока обуславливается усложненной процедурой (операцией) майнинга (добычи криптовалют). Чтобы создать блок системой решается сложная математическая задача по кодированию и взаимной увязке информации по огромной совокупности сделок, для чего, как показывает опыт, требуется мощнейшее компьютерное и, соответственно, энергетическое ресурсное обеспечение. Майнеры за каждый полученный блок транзакций получают вознаграждение в виде криптовалюты. Это так называемая open space технология, основным преимуществом которой является хранение больших объемов информации о транзакциях, а также совершения коммерческих сделок при высокой степени защищенности и децентрализованности доступа со стороны тех, кто обрабатывает эти транзакции, формируя с очень высокой скоростью большую базу данных – блоки транзакций.

Однако данная технология высокими темпами становится универсальной прикладной, распространяясь на различные отраслевые сферы масштабных транзакций в международных бизнес-процессах. В таком случае следует говорить об отраслевом интерфейсе технологии блокчейн, в которую встраиваются не только непосредственные участники – хозяйствующие субъекты, но и государственные, корпоративные, инфраструктурные, отраслевые и рыночные регуляторы. Однако, как заявляют эксперты, данная технология может вытеснить банковскую систему. Именно эти аспекты на сегодня представляются дискуссионными для российских отраслевых компаний. С правовой точки зрения система блокчейн в России не запрещена. Под нарушение действующего законодательства подпадает обналичивание (конвертация) биткоинов в реальные денежные суммы. Существует и ряд других проблемных аспектов, а именно: масштаби-

рованность количественного измерения сделок и участников, что вызывает аналогию некоего «пузыря» или пирамиды. Критикуют систему и с точки зрения потребляемой электроэнергии. Это вопрос экономической целесообразности, выбора майнера: до каких пределов наращивать мощности, чтобы обеспечить окупаемость и коммерческий интерес, но эту проблему можно решить, если реализовать проект по производству вторичной продукции, а именно – криптовалют на базе ГЭС и АЭС, на которых в данный момент есть переизбыток мощностей и энергии, которую некуда деть и нет возможности аккумулировать ее в полном объеме. При реализации подобного проекта компания, которая будет согласна предоставить свою «лишнюю» энергию, может получать дополнительную прибыль за счет реализации криптовалют на рынке, исчезнет проблема переизбытка энергии за счет того, что она пойдет на воспроизводство вторичной продукции – добычу криптовалют (майнинг).

Как мы знаем проблемы начинаются уже с прогнозных оценок. Минэнерго России годами упорно обещает стране рост потребления электроэнергии, но за все последнее время даже близко «не попало в цель». В каждой схеме и программе развития той же электроэнергетики, которые ежегодно выходят из-под пера чиновников этого ведомства, завывается спрос на мощность, в реальности стремящийся к стагнации. Аналогичные ошибочные прогнозы ранее уже привели к реализации дорогостоящей программы договоров предоставления мощности (ДПМ), которые обошлись промышленным потребителям в сотни миллиардов рублей без очевидных эффектов.

Если говорить о потенциальном рынке, который захочет испытать данный товар, то, скорее всего, это будут гидро- и атомные станции. В связи отсутствием развитых технологий по накоплению энергии им будет предоставлена возможность не терять свою потенциальную прибыль, а направить вырабатываемую энергию в нужное русло для эффективной, экономически выгодной и качественной стратегии развития. По некоторым данным, в настоящее время АЭС загружены на 81%, ГЭС – на 42%.

ДПМ подписывались после 2008 г., когда РАО ЕЭС прогнозировало ежегодный рост потребления электроэнергии в 2008-2017 гг. на уровне 3,7-4,3% в год. Но на деле рост оказался гораздо меньше, а в некоторые годы даже фиксировался спад. К 2017 г. избыток мощности в энергосистеме составил, по разным оценкам, 20-50 ГВт, то есть 8,4-21%. Из-за условий ДПМ пока недогрузка этих мощностей для генерирующих компаний особой проблемы не составляет, она оплачивается в любом случае. Проблемы могут начаться, когда срок оплаты по ДПМ закончится и эта мощность выйдет на рынок. Российская энергосистема достаточно консервативна и построена на принципе резервирования. При отсутствии механизма закрытия неэффективных мощностей никто из генерирующих компаний за свой счет делать это не хочет, но энергокомпании сами не заинтересованы в излишках мощности, так как это приводит к снижению их капитализации.

Если говорить о цифре, которая более приближена к минимальной (20 ГВт), то на имеющийся энергии можно установить максимальное количество ~ 20000 ASIC-майнеров, доход каждого из которых будет 0,03867569 BTC (23133 руб.) в месяц и 0,46410828 (277599 руб.) в год, в сумме мы получаем 9200 биткоинов за 1 год (~ 3961032400 руб.). Если использовать свободную энергию по максимуму и поставить 20 тыс. ASIC-майнеров, мы потратим 2300 долл. · 20000 · 65 = 29900000000 руб., окупаемость вложений наступит через 7,5 лет.

Поэтому мы предлагаем условия на бартерной основе, когда используется ваша нераспределенная энергия, а взамен вы получаете процент (в виде фиатной валюты по курсу криптовалют на момент обналичивания) от добытой криптовалюты. Это будет новшеством для нашей страны и не только.

Также есть и второй путь развития нашей экономики за счет перепродажи нераспределенной мощности российских энергостанций инвесторам из других стран. Например, в приоритете инвесторы из стран Азии, в частности – Китай. В Китае, крупнейшем в мире производителе систем для майнинга, многие фермы получают энергию от «грязных» угольных

электростанций, при этом правительство законодательно ограничило вредные выбросы в атмосферу и рассматривает возможность введения новых налогов, призванных контролировать внутренний рынок электроэнергии и операции с криптовалютами. Следует понимать, что около 70% основных майнинговых биткоин-пулов основаны в Китае или принадлежат китайским компаниям.

В настоящее время, в связи с перспективой новых ограничений, инвесторы ищут новые места. В России стоимость 1 МВт·ч находится на уровне 60 долл., что значительно ниже среднемирового показателя 125 долларов. В нашей стране благоприятный климат для установки майнинг-ферм, например в Сибири, инвесторам потребуется значительно меньше собственных средств для обеспечения охлаждения установок.

Гидроэнергетика заняла прочное место в списке фаворитов у тех, кому небезразлична окружающая среда. Китайские майнинговые фермы давно используют дешевую избыточную энергию гидроэлектростанций, особенно в провинции Сычуань. Одна из первых ферм, BW, стала первопроходцем в этой практике. Предприятие было основано в 2014 г. и уже с 2015 г. питает свои установки от возобновляемых источников энергии.

Майнинг на основе гидроэнергетики распространен и в других регионах, которые предлагают дешевую гидроэнергию. В Австрии сестры Дамблон, основательницы компании HydroMiner, подключили свое оборудование к гидроэлектростанциям в Альпах. Надин и Николь создали HydroMiner Limited в 2016 г. вместе с сообществом майнеров из Вены. К 2017 г. команда создала свой первый объект в австрийском Шёнберге, который потреб-

ляет базовую мощность – 290 кВт·ч для своих 120-ти майнинговых установок. Их вторая ферма в Вайдхофен-ан-дер-Иббсе – 250 видеокарт Antminer 29 и 1152 – потребляет 600 кВт·ч.

Команда построила вторую ферму на средства, собранные при ICO токена H2o. Каждый токен H2o позволяет выкупить мощность не менее 5 кВт·ч для майнинга на оборудовании фермы, и ее можно конвертировать в любые криптовалюты через портал проекта. По мере расширения производства компания планирует запустить токен H3o, который будет иметь свойства ценной бумаги и позволит своим владельцам получать дивиденды. Создатели называют его первым токеном со свойствами ценной бумаги, который полностью соответствует европейскому финансовому законодательству.

Выручка от ICO HydroMining пойдет на создание объектов за пределами Австрии – в Канаде, Грузии или других странах, где есть доступ к недорогой «чистой» энергии. Как утверждают Дамблон, гидроэнергия в Австрии на 85% дешевле стоимости электроэнергии в целом. Она обходится в 3-5 евроцентов за кВт·ч, а австрийский климат идеально подходит для охлаждения оборудования. Если происходит перегрев – есть возможность перенаправить воду из рек для охлаждения аппаратуры.

В заключение отметим то, что нашей стране нужно не только решать проблему с нераспределенными мощностями АЭС и ГЭС, но и развивать экономическую сферу, реализовывать возможность перехода к цифровой экономике, с блокчейном и криптовалютами, которые, возможно, в скором будущем выведут на новый уровень совершенствования и развития страны, не упустившие эту возможность.

Поступила в редакцию
03.10.2018 г.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. На первой странице статьи необходимо указать: индекс УДК (над заголовком статьи слева), имя, отчество, фамилию автора, название статьи. В статье должна быть аннотация — не более 400–600 печатных знаков с пробелами и перечень ключевых слов (5-6).

2. Статьи должны быть структурированы. Рекомендуется стандартная рубрикация разделов: введение, постановка проблемы (задачи исследования); основная часть — обсуждение проблемы; заключение (выводы).

Текст предоставляется в распечатанном виде и на электронном носителе. Текст должен быть распечатан шрифтом Times New Roman, 12 кегля, через 1,5 интервала, с полями по 2 см сверху, снизу, слева и справа. Страницы должны быть пронумерованы снизу справа. Объем статьи — 10–15 стандартных страниц (не более 30 тыс. знаков с пробелами) и 2–3 рисунка (сюда же входят таблицы и список литературы).

3. Таблицы предоставляются в тексте статьи, через 1,5 интервала, кегль 11.

4. Нумерация формул (сплошная по всей статье) указывается в скобках (в порядке возрастания) цифрами (1, 2 и т.д.) с правой стороны (в правый край набора).

5. Иллюстрации предоставляются в тексте статьи в электронном виде. На рисунках нужно избегать лишних деталей и надписей (надписи необходимо заменять цифрами или буквами, разъяснение которых дается в подрисуночных подписях или в тексте). Линии на рисунках должны быть четкими (5–6 рix), ширина рисунков не должна превышать 140 мм, высота — 200 мм. Шрифт буквенных и цифровых обозначений на рисунке — Times New Roman (9–10 кегль). Рисунки должны быть черно-белыми, с разными типами штриховки (с размером шага, позволяющим дальнейшее уменьшение).

6. Подрисуночные подписи предоставляются в тексте статьи, через 1,5 интервала, кегль 12.

7. Минимально необходимый список литературы приводится в конце статьи, имеет сплошную нумерацию арабскими цифрами. По тексту статьи даются ссылки на номер в квадратных скобках: [1]. Библиографическое описание дается в следующем порядке: фамилия, инициалы автора (авторов), полное название монографии, место издания, издательство, год издания; для периодических изданий — фамилии, инициалы авторов, название статьи, название журнала, год выпуска, том, номер, страницы. Библиографические записи на русском языке должны быть также указаны в латинской транслитерации.

8. После списка литературы необходимо указать сведения об авторе (авторах): должность, ученую степень, звание, e-mail (если нет — контактный телефон).

9. Рукописи авторам не возвращаются.

10. Плата за публикации не взимается.

Благодарим за соблюдение наших правил и рекомендаций!

