

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

Н.И. Воропай, М.В. Губко, С.П. Ковалев, Л.В. Массель, Д.А. Новиков,
А.Н. Райков, С.М. Сендеров, В.А. Стенников

Отмечено, что в условиях исчерпания потенциала экстенсивной эксплуатации сырьевых ресурсов цифровая трансформация является для России «окном» больших возможностей. Показано, что в таких условиях возрастает необходимость цифровизации энергетических систем с учетом усложнения и снижения уровня самоадаптации и самоустойчивости к множеству дестабилизирующих факторов. Даны сравнительные оценки уровня внимания специалистов к сквозным цифровым технологиям в различных отраслях, из которых следует, что в энергетическом секторе экономики это внимание имеет явный резерв роста. Отмечено, что значительная часть сложного современного цифрового оборудования поставляется в энергетическую отрасль зарубежными фирмами, что представляет собой явную угрозу энергетической безопасности страны и требует усиленного внимания к решению проблемы импортонезависимости. Обоснована потребность в обеспечении лидирующей системообразующей роли Российской академии наук в прорывном развитии российской цифровой энергетики.

Ключевые слова: искусственный интеллект, компьютерное моделирование, прорывное развитие, цифровые технологии, цифровая энергетика, энергетическая безопасность.

ВВЕДЕНИЕ. ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА В РАМКАХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ. МИРОВЫЕ ТРЕНДЫ

Цифровая энергетика создается и развивается в рамках и с учетом «Стратегии научно-технологического развития (СНТР) Российской Федерации¹» (которая определяет одним из больших вызовов «переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике,... формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии...»), Программы «Цифровая экономика Российской Федерации», «Дорожной карты "Энерджинет"». Есть и весомые отраслевые программы, например, государственная информационная система ТЭК реализуется в рамках Федерального закона № 382-ФЗ от 03.12.2011 г. «О государственной информационной системе топливно-энергетического комплекса»; Минэнерго запуска-

¹ Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».

ет программу «Цифровая трансформация электроэнергетики России».

В Указе Президента «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» № 204 от 7 мая 2018 г. поставлена задача: «...преобразование приоритетных отраслей экономики и социальной сферы, включая... энергетическую инфраструктуру, посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений» путем «...внедрения интеллектуальных систем управления электросетевым хозяйством на базе цифровых технологий».

В СНТР к наиболее значимым вызовам в смысле научно-технологического развития Российской Федерации отнесено исчерпание возможностей экономического роста России, основанного на экстенсивной эксплуатации сырьевых ресурсов, на фоне формирования цифровой экономики и появления ограниченной группы стран-лидеров, обладающих новыми производственными технологиями и ориентированных на использование возобновляемых ресурсов. Создание технологий происходит все больше на цифровой основе, по-



этому **цифровая трансформация является для России и вызовом, и «окном» больших возможностей.**

Энергетика — базовый сектор экономики, обеспечивающий нормальное функционирование остальных отраслей и жизнедеятельность населения. Она представлена инфраструктурными энергетическими системами электро-, тепло-, газо-, нефте- и нефтепродуктоснабжения. Современные энергетические системы — сложнейшие технические объекты, созданные человеком и развивающиеся с применением инновационных, в том числе интеллектуальных, технологий для производства, передачи, распределения и хранения энергоресурсов. Актуально технологическое объединение энергетических систем в виде взаимосвязанных по режимам функционирования и решениям по развитию интеллектуальных интегрированных энергетических систем [1]. Функционирование таких чрезвычайно сложных территориально распределенных энергетических систем, включающих в себя десятки тысяч и более элементов (объектов), в принципе невозможно без соответствующих им по сложности систем управления. Эффективность управления обеспечивается представительной обширной регулярно обновляемой достоверной информацией о параметрах и переменных состояния управляемых систем. Эта информация измеряется, обрабатывается, передается и представляется для мониторинга состояния и выработки управляющих воздействий, которые, в свою очередь, передаются к соответствующим исполнительным устройствам и реализуются ими. Все эти операции с информацией выполняются развитой информационно-коммуникационной подсистемой конкретной энергетической системы.

Уже в настоящее время, а в будущих энергетических системах — в еще большей мере, физическая (силовая) и информационно-коммуникационная подсистемы становятся сопоставимыми по сложности и ответственности с точки зрения обеспечения возрастающих требований потребителей к надежности их энергоснабжения и качеству предоставляемых им энергоресурсов. Возрастание требований потребителей в части надежности и качества объективно обусловлено массовой компьютеризацией и цифровизацией их технологических процессов. В свою очередь, удовлетворение этих существенно возросших требований единственно возможно путем цифровизации энергетических систем. Это означает применение цифровых технологий и устройств на всех стадиях работы информационно-коммуникационных подсистем от измерения параметров и переменных состояния цифровыми измерительными приборами, через цифровую передачу и обработку этой информации до реализации управляющих воздействий исполнительными цифровыми устройствами. С учетом

активного применения современных информационных технологий и методов искусственного интеллекта энергетические системы становятся интеллектуальными киберфизическими системами.

Объективная необходимость цифровизации энергетических систем возрастает еще и в связи с их усложнением и снижением самоадаптации и самоустойчивости к внутренним и внешним дестабилизирующим факторам, что наиболее характерно для электроэнергетических систем (ЭЭС) вследствие массового применения силовой электроники для подключения некоторых типов генерирующих установок, локальных электроприемников и частотного регулирования электродвигателей. Это требует существенного повышения эффективности управления режимами ЭЭС путем обработки больших объемов данных и уменьшения интервалов выработки управляющих воздействий, что может быть рационально организовано на основе цифровизации процесса управления [2].

По имеющимся оценкам, цифровизация энергетических систем имеет широкий спектр достоинств, таких как снижение текущих и капитальных затрат на реконструкцию и развитие систем, снижение затрат на техническое обслуживание и ремонты и увеличение срока службы оборудования, повышение производительности работы персонала и ряд других. Чрезвычайно важно общее качественное повышение эффективности реализации всего цикла задач информационно-коммуникационной и управляющей подсистемы. Цифровизация энергетических систем позволит существенно повысить эффективность принимаемых решений и качество функционирования энергетических систем, надежность энергоснабжения потребителей с учетом их возросших требований, качество энергоресурсов.

Мировые тренды в области цифровизации разительны. Скажем, мировой доход на рынке больших данных и бизнес-аналитики сейчас составляет около \$140 млрд., и он ежегодно растет на 12—15 %. Емкость глобального рынка систем искусственного интеллекта (ИИ) к 2024 г. может вырасти до \$3 трлн. Глобальные вложения, связанные с блокчейн-технологиями, в 2021 г. достигнут \$9,7 млрд. По квантовым компьютерам прогнозируется объем рынка к 2024 г. \$11 млрд. Общий глобальный доход от поставки IoT-технологий (интернет вещей) растет со среднегодовым темпом в 15 % и составит \$19 млрд. в 2025 г. Робототехника и сенсорика — в 2017 г. объем мирового рынка составил \$39,3 млрд., прогноз на 2020 г. — \$152 млрд. Беспроводные сети — прогноз на 2025 г. почти \$10 млрд.

В материалах [3] приведены оценки относительного уровня цифровизации различных отраслей (рис. 1).



Рис. 1. Оценки цифровизации отраслей экономики в России и Европе: ¹ Великобритания, Германия, Голландия, Италия, Франция и Швеция; ² за исключением химической и фармацевтической промышленности, производства нефтепродуктов, телевизионной аппаратуры и офисного оборудования; *ИКТ* — информационно-коммуникационные технологии

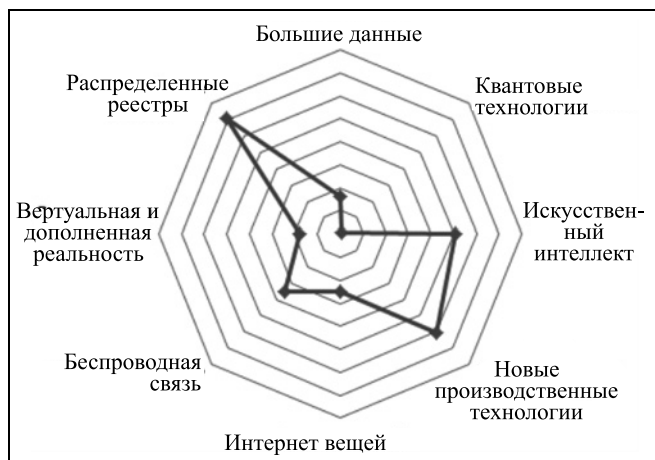


Рис. 3. Соотношение числа сообщений по сквозным технологиям СНТР

На рис. 2 (см. третью страницу обложки) проиллюстрировано число публикаций по различным сквозным технологиям СНТР и по отраслям (2018 г., массив 140 тыс. сообщений, Гугл/Новости).

Соотношение сообщений по сквозным технологиям СНТР на новостной ленте в самой энергетической отрасли приведено на рис. 3 (около 14 тыс. сообщений за 2018 г.).

Сравнение научно-технологических заделов по сквозным технологиям СНТР на международном уровне можно проиллюстрировать табл. 1, отражающей число публикаций в Web of Science (WoS, массив за 2008—2017 гг., без учета ESCI, данные Национального центра цифровой экономики МГУ им. М.В. Ломоносова).

В экспертно-аналитическом докладе [4] отмечаются следующие **мировые тренды** и констатируется **смена энергетических парадигм** (табл. 2).

- Удешевление новых технологий для применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Стоимость электроэнергии от различных источников меняется в пользу ВИЭ. Динамика ее снижения за последние годы значительна. Например, стоимость ветроустановок снизилась в 10 раз с 1980 по 2013 г.
- Глубокая децентрализация производства электроэнергии. Скорость и простота установки и обслуживания распределенной генерации (работающей на газе, местном топливе или возобновляемых источниках), более низкая ее стоимость по сравнению с подключением к сети общего пользования, — все это приводит к масштабному развитию распределенной энергетики в мире. Данная тенденция будет усиливаться благодаря появлению систем хранения (накопителей) электроэнергии.
- Распространение технологий и практики энергосбережения. По данным МЭА, ежегодно энергоемкость ВВП стран — членов организации сокращается более чем на 2 %.
- Распространение цифровых сетей и интеллектуальных систем управления. Инфраструктура благодаря цифровым технологиям и автоматике становится активно-адаптивным элементом энергетической системы. В сочетании с системами интеллектуального управления коммерческими и технологическими процессами сетевая инфраструктура преобразуется в новую киберфизическую платформу для гибкого и эффективного энергообеспечения потребителей.

Таблица 1

Научно-технологические заделы сквозных технологий СНТР

Где	Большие данные	Искусственный интеллект	Распределенные реестры	Квантовые технологии	Новые производственные технологии	Интернет вещей	Робототехника и сенсорика	Беспроводная связь	Виртуальная и дополненная реальности
В мире	2153	19 896	29	30	13 126	1291	4625	1664	1887
В России	10	115	0	2	272	10	41	4	65

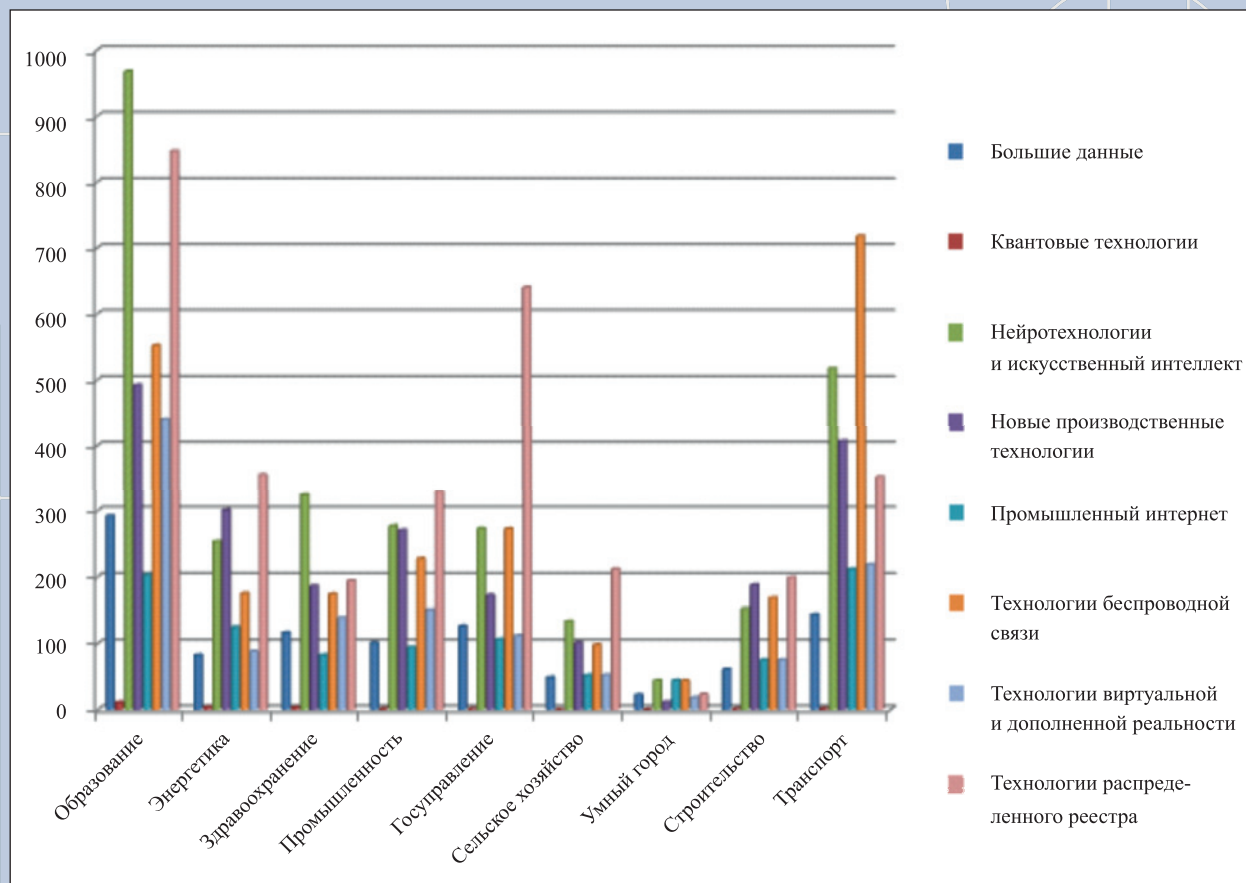


Рис. 2. Соотношение числа публикаций по различным технологиям

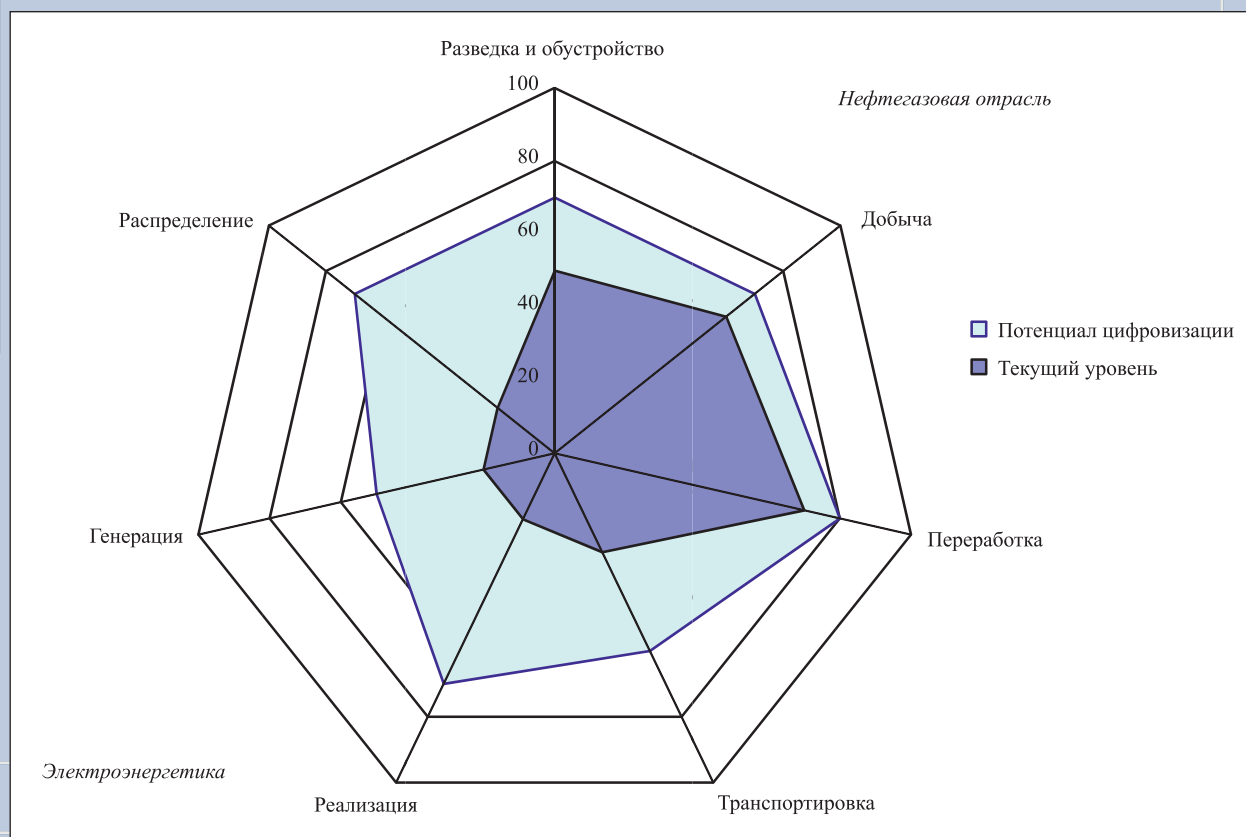


Рис. 4. Потенциал цифровизации в энергетике



Таблица 2

Энергетические парадигмы [4]

Действующая (доминирующая) энергетическая парадигма	Наступающая энергетическая парадигма
Доминирование источников электроэнергии на основе углеводородного топлива	«Чистая энергия» возобновляемых источников энергии. Глубокая децентрализация производства энергии. Рост роли электроэнергии в структуре потребления топливно-энергетических ресурсов
Крупные вертикально интегрированные энергетические компании с мощными энергоблоками, крупными месторождениями, большими перерабатывающими установками	Децентрализованные рынки, частные инвестиции
Централизованные электрические сети	Интеллектуализация базовой инфраструктуры, развитие технологий «умных» сетей (<i>Smart Grids</i>)
Однонаправленность потоков электроэнергии — от генератора к потребителю	Переход потребителей к активным моделям поведения (активный потребитель в центре энергосистемы)
Одновременность процессов производства и потребления электроэнергии	Технологии накопления энергии — энергия как «складируемый» товар. Рост эффективности использования энергии
Широкое использование органических топлив в промышленности и транспорте	Углубление электрификации промышленности и транспорта

- Изменение модели поведения потребителей и появление просьюмеров (потребителей и производителей энергии в одном лице). Потребление становится все более мобильным и гибким. Потребители могут быть поставщиками электроэнергии и конфликтуют с нормами традиционного регулирования рынка электроэнергии, требуют «энергетической демократии» (*Energy Democracy*).
- Распространение новых финансовых технологий. Появление новых технологий в финансовом секторе (*Blockchain, Smart Contract, Decentralized Autonomous Organizations*) создает возможности для масштабного привлечения частных инвестиций в энергетику, монетизации потребительских сервисов, формирования различных практик энергообмена.

1. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ: РЕВОЛЮЦИЯ ИЛИ ЭВОЛЮЦИЯ

Согласно Программе «Цифровая экономика Российской Федерации», «цифровая экономика — хозяйственная деятельность, ключевым фактором производства в которой являются **данные в цифровой форме**», обеспечивающие рост производительности труда. Революция в информационно-коммуникационных технологиях (ИКТ) дала на сегодняшний день *возможность* обеспечивать в реальном времени сбор, передачу, хранение и обработку гигантских массивов слабоструктурированных («больших») данных [5]. Цифровые (информационные) модели становятся нормой проектирования и производства, все больше виртуальных датчиков (использующих косвенные измерения, и/или комплексирование информации), вычисления и применение ИКТ стали повсеместными (*Ubiquitous Computing*). Но наличие возможности для применения недостаточно — между собираемыми об объекте или процессе данными и знаниями о нем иногда лежит целая «пропасть» [6]. Первичные данные должны быть преобразованы — превращены в более или менее структурированную информацию, из которой, желательно интеллектуальными методами, должны быть извлечены требуемые знания. Эти знания должны использоваться (иначе они бесполезны) для **управления** соответствующим объектом — осуществления целенаправленных воздействий, обеспечивающих требуемое его поведение. С этой точки зрения **цифровизацию можно рассматривать как эволюционный современный элемент цепочки «автоматизация — информатизация — цифровизация»**. А опыт успешной автоматизации и информатизации в энергетической отрасли огромен!

Действительно, идеи цифровизации проникли в нефтегазовую отрасль и стали активно обсуждаться более 15 лет назад («цифровой НПЗ» и др.) с подачи производителей оборудования и систем автоматизации; хотя в той или иной мере относимые сейчас к области цифровых технологий методы анализа данных и поддержки принятия решений применяются с середины XX в., охватывая все этапы от геологоразведки до переработки и производства энергии. Достаточно вспомнить полувековой давности работы по оконтуриванию месторождений на базе распознавания образов, применение обработки данных мультиспектральной аэро- и космической фотосъемки для целей геологоразведки, нелинейные модели технологических процессов нефтехимического производства. В нашей стране наличие транснациональных нефтяных и газовых трубопроводов, единой электроэнергетической системы рекордной протяженнос-

ти обусловило еще в конце прошлого тысячелетия создание автоматизированных систем управления ими.

Уже несколько лет в нефтегазовом комплексе употребляется понятие «интеллектуальное месторождение» (*Smart Field*) [7, 8 и др.], рассматриваемое как система автоматического управления операциями по добыче нефти и газа, предусматривающая непрерывную оптимизацию интегральной модели месторождения и модели управления добычей. Эта система позволяет управлять нефтегазовым пластом в целях увеличения показателей добычи углеводородов на основе значительного повышения эффективности разработки месторождения и максимального продления срока его эксплуатации.

Smart Field может управлять отдельными скважинами и их кустами благодаря специальной кустовой телемеханике. Также в ведении системы находятся процессы подготовки нефти и газа, включая дожимные насосные станции, факельные системы и др. Система управляет процессом поддержания пластового давления, в том числе водозаборными станциями, узлами учета воды, нагнетательными скважинами; контролирует нефтеперекачивающие станции и резервуарные парки. Применяются различные интеллектуальные и многопараметрические датчики. Интеллектуальные технологии обеспечивают удаленный доступ к географически распределенному оборудованию, позволяет диагностировать его состояние.

Один из важнейших элементов Smart Field — организация интеллектуального электроснабжения с гибкой системой распределения электроэнергии и возможностью управлять потребляемой мощностью. Верхний уровень Smart Field — автоматизированное управление всем производственным процессом, позволяющее согласовать извлечение углеводородов с сопутствующими вспомогательными процессами. Интеллектуальная система обеспечивает управляющий персонал необходимой информацией в режиме реального времени и позволяет адекватно и практически моментально реагировать на изменение параметров, гибко подстраиваться к меняющимся условиям.

В России количество цифровых месторождений достигло 26, количество цифровых скважин превысило 2 тыс. Мировой опыт эксплуатации 240 интеллектуальных цифровых месторождений показывает, что применение таких технологий позволяет сократить текущие и капитальные затраты на 10—15 % и обеспечить прирост добычи нефти и газа от 5 до 15 % [7—9 и др.].

Посмотрим на саму энергетическую отрасль как объект внедрения цифровых инноваций и приложения научно-инженерных и фундаментальных научных усилий. Доля отрасли ТЭК в ВВП России

одна из самых больших среди отраслей промышленности — 27 % в 2014 г. и 25 % в 2016 г. Но гораздо важнее тот факт, что продукция отрасли первая в цепочке создания добавленной стоимости для многих других отраслей, поэтому мультипликативный эффект от роста эффективности развития цифровой экономики в отрасли ТЭК наибольший в стране. Он влияет на ВВП страны не только напрямую, но и опосредованно, увеличивая глобальную долгосрочную конкурентоспособность других отраслей народного хозяйства.

Цифровая трансформация в энергетической отрасли охватывает практически все ее объекты и ведется уже достаточно давно. Так, в последнее время на смену АСУТП приходят интеллектуальные системы усовершенствованного управления технологическим процессом. Их отличие заключается в применении многопараметрических программируемых контроллеров, обеспечивающих управление технологическими процессами на основе анализа больших данных, поступающих от виртуальных анализаторов в режиме реального времени. Источником данных для этих анализаторов служат многочисленные датчики и устройства, контролируемые технологические процессы. Огромные массивы цифровых данных собираются, анализируются, хранятся, распространяются и утилизируются в соответствии с алгоритмами обработки и анализа больших данных. Приведем несколько **примеров внедрения** таких схем:

— проект «Газпром нефть» по анализу данных, полученных от электрических центробежных насосов более чем 1,5 тыс. скважин;

— ПАО СИБУР построило модель зависимости обрывов полипропиленовой пленки от режимов производства на основе больших данных; обрывность пленок сократилась более чем на 50 %;

— промышленный холдинг РОТЕК создал систему, прогнозирующую остаточный ресурс энергетического оборудования;

— ПАО «Газпром нефть» совместно с МФТИ создали самообучающуюся систему прогнозирования свойств пород для новых месторождений;

— ПАО «Газпром нефть» создало систему анализа больших данных, в которую включены все информационные потоки о движении товара от заводских резервуаров до продажи конечного продукта на заправке, и ряд других проектов.

Компанией РОССЕТИ разработаны основные положения концепции цифровизации электрических сетей, которые обсуждены и одобрены Президиумом Научно-технического совета в августе 2018 г. Обсуждаются проблемы и задачи применения цифровых технологий в ЭЭС [10 и др.], разработчиками оборудования предлагаются конкретные технические решения для их реализации. В октябре 2017 г. в Москве состоялась 2-я отрас-



левая конференция «Цифровая трансформация электроэнергетики России» (www.digitenergy.ru), ее организаторами выступили Минэнерго РФ и Национальная ассоциация участников рынка промышленного интернета (НАПИ).

Электроэнергетические сети достаточно подготовлены к цифровой трансформации. Электроэнергетические компании в той или иной мере уже проводят мероприятия и реализуют проекты, отвечающие задачам цифровизации ЭЭС. В частности, в статье [11] приведена информация о запуске трех пилотных проектов, реализующих цифровые технологии:

— расчет и мониторинг показателей надежности оказываемых услуг территориальными сетевыми организациями, реализуемые на базе ситуационно-аналитического центра Минэнерго РФ путем прямого сбора данных со средств телеизмерений с помощью цифровой модели сети и технологий больших данных;

— система мониторинга и анализа функционирования устройств релейной защиты и автоматики, реализуемая компаниями СО ЭЭС, ФСК ЭЭС и РТСОфт с применением риск-ориентированного подхода путем организации прямого информационного обмена между субъектами;

— система удаленного мониторинга, оценки и прогнозирования изменения технического состояния электроэнергетических объектов генерирующего оборудования и пилотная подстанция; проект реализуется компаниями РОССЕТИ и АО «Мобильные газотурбинные электрические станции».

Цифровизация теплоснабжающих систем (ТСС) рассматривается в рамках двух технологических парадигм — «Умный город» [12] и интегрированные интеллектуальные энергетические системы [13, 14]. Будучи частью инфраструктурной энергетической метасистемы, ТСС интегрирует опыт других систем. Свидетельством технологического преобразования ТСС могут служить многие процессы, происходящие в теплоснабжении. К их числу следует отнести: формирование информационно-аналитической платформы, в основе которой лежат цифровые модели реальных теплоснабжающих систем городов, расчетный и оптимизационный инструментарий [15–17] с выработкой управляющих воздействий; переход к более гибкой архитектуре систем в результате выноса пиковой мощности в районы потребления и вовлечения распределенных источников теплоснабжения [18]; все более широкое применение информационных технологий, систем передачи и хранения энергии; расширение сферы услуг в результате надстройки систем холодоснабжения на базе абсорбционных технологий преобразования энергии; трансформация системы регулирования и модели организации рынка тепловой энергии [19] и др. Они обуслов-

ливают эволюционный характер изменения поведения не только самих теплоснабжающих систем, но и потребительского сектора, что в конечном итоге выступает стратегическим драйвером трансформации в теплоснабжении и в целом в энергетике.

Наглядными представителями реализации концепции цифровой интеллектуализации систем теплоснабжения служат следующие пилотные проекты.

- Создание в крупных и средних городах согласно Федеральному Закону от 27.07.2010 г. № 190-ФЗ «О теплоснабжении» цифровых информационно-вычислительных систем для прогнозирования параметров теплоносителя, распределения нагрузки между теплоисточниками, расчета и оптимизации режимов, оценки надежности, расчета управляющих параметров. Они непосредственно интегрируются в систему диспетчерского и технологического управления, а также в систему принятия решений по развитию ТСС.
- Внедрение в ТСС г. Тюмени и других городов беспроводной системы автоматизированного учета и управления распределением тепловой энергии, объединяющей датчики и счетчики тепла в контрольных точках тепловых сетей, автоматизированных тепловых пунктов, передающие устройства информации с возможностью оперировать большими объемами данных, аналитические программаторы, обеспечивающие прозрачные взаимоотношения теплоснабжающей компании с потребителями, в целях эффективного регулирования и выстраивания процессов энергоснабжения [20].
- Формирование в Набережных Челнах одной из передовых в стране систем диспетчеризации и автоматизации управления процессами транспортировки и распределения тепловой энергии, в которую легко интегрируется цифровая информационно-вычислительная платформа, во многом идентичная интеллектуальной системе, внедряемой в г. Копенгагене (Дания). Она последовательно реализуется в виде проекта «Умное тепло» [21, 22].
- Реализация ОАО «Московская объединенная энергетическая компания» (МОЭК) в Южном административном округе Москвы проекта по внедрению технологии «Умных сетей» (*Smart Grid*) в системах теплоснабжения [23].

Цифровизация в теплоснабжении обеспечивает новый уровень внутренних коммуникационных процессов, организации и осуществления на интеллектуальном уровне технологического управления, взаимоотношений со смежными партнерами, а главное, формирует цифровую коммуникацию с потребителями тепловой энергии. Наиболее ак-

тивно в этом направлении работают ОАО «Интер РАО», ООО «Газпром энергохолдинг», ООО «Корпорация СТС», ОАО «МОЭК», ПАО «Татэнерго» и др.

Различные виды деятельности в рамках энергетической отрасли имеют различный «потенциал цифровизации» — возможность решения проблем отрасли с помощью цифровых технологий. Понятно, что цифровизация вряд ли решит проблему обледенения проводов ЛЭП или существенно повысит эффективность работы буровых установок. Сейчас в наименьшей степени цифровые технологии внедрены в области реализации продуктов нефтегазовой отрасли и распределения электроэнергии. В то же время, возможности появления новых продуктов и рынков, развития цифровых услуг для потребителей в этих областях наибольшие. На диаграмме (рис. 4, см. третью страницу обложки) представлена экспертная оценка (сделанная сотрудниками ИПУ РАН в 2018 г.) текущего уровня и потенциала цифровизации в отрасли.

Отметим, что **стремление к массовой цифровизации не должно замещать или мешать эволюционному развитию «традиционных» для энергетики исследований и технологий.**

Термин «цифровая энергетика» сегодня употребляется в двух смыслах — широком (общем) и узком смысле — как Интернет энергии.

2. ИНТЕРНЕТ ЭНЕРГИИ

Интернет энергии (*Internet of Energy, IoE*) — «экосистема» производителей и потребителей энергии, которые беспрепятственно интегрируются в общую инфраструктуру и обмениваются энергией [24]. Вместо традиционной системы «производство — распределение — сбыт — потребление» появляется принципиально новая модель, где участники рынка свободно обмениваются энергоресурсами и услугами.

Главный полезный эффект от внедрения цифровых технологий и особенно платформенных решений в энергетике заключается в радикальном **повышении доступности** крупномасштабных экономических эффектов для массовых рядовых субъектов. Действительно, многофункциональные интегрированные цифровые платформы позволяют каждому человеку выполнять экономические транзакции любого содержания, объема и сложности, с минимальными издержками на поиск и выбор контрагентов, коммуникации с ними, верификацию взаимных обязательств, обеспечение конфиденциальности и др.

Соответственно, цифровое преобразование энергетики должно быть направлено на обеспечение высококачественного равного доступа массовых рядовых участников энергетического рынка к

полному спектру возможностей и функций субъектов энергетики, на базе интегрированных отраслевых цифровых платформ нового поколения. Каждый человек должен иметь возможность не только потреблять энергетические ресурсы, предоставляемые уполномоченными операторами централизованных энергосистем, но и самостоятельно генерировать, добывать, передавать, хранить, перерабатывать ресурсы. Цифровые платформы в энергетике должны также давать прямой доступ к сопутствующим услугам, таким как диспетчирование, техническое обслуживание и ремонт оборудования, проектно-изыскательские, инжиниринговые и строительно-монтажные услуги, трейдинг на рынках энергетических ресурсов, энергетический менеджмент, информационное обслуживание и др.

Например, в перспективе каждый человек, имеющий дачный участок, сможет при желании установить на нем ветряк и солнечную панель, чтобы не только покрывать собственные потребности в электричестве, но и продавать излишки на розничном рынке через имеющиеся распределительные сети. Такие возможности уже широко реализуются в Европейском союзе. Разрабатываются силовое электронное оборудование и автоматизированные системы управления, поддерживающие такую деятельность и организующие энергетическую инфраструктуру по аналогии с информационной инфраструктурой сети Интернет. В рамках «интернета вещей» (IoT) необходима разработка технологий распределенного регулирования частоты и мощности. В целом понятно, как построить и отказоустойчивую финансовую инфраструктуру такой деятельности, на основе технологии блокчейн и смарт-контрактов. Однако существенная проблема заключается в полном **отсутствии нормативной базы** для такого децентрализованного рынка прямого транзакционного обмена энергией. Цифровое преобразование энергетики, которое позволит воплотить в жизнь описанную картину, немыслимо без широкого спектра научных исследований и разработок. Возникают как совершенно новые научные задачи, например связанные с блокчейном в энергетике, так и новые аспекты традиционных задач типа моделирования для оценки устойчивости.

3. ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Выделим три класса проблем — проблемы как научно-технологические задачи в области цифровой энергетики, требующие решения; проблемы-ограничения (как правило, возникающие на стыке со смежными предметными областями) и проблемы-угрозы, которые необходимо парировать.

3.1. Проблемы-научные задачи

Начнем с «атомарного» кирпичика цифровизации — «сквозной» технологии. С нее начинается сборка проектных решений под конкретные задачи, формируются технологические цифровые комплексы и платформы, происходит стыковка через соответствующие программные интерфейсы между участниками различных процессов, в том числе межотраслевых. В результате появляются эффекты.

Сквозная технология — это ключевое научно-техническое/технологическое решение, внедрение которого обеспечивает прорывное и меняющее правило игры улучшение положения отрасли на существующих рынках работ, продукции и услуг или способствует формированию новых рынков.

В контексте цифровой экономики фундаментальные научные исследования направлены на развитие сквозных технологий, находящих свое применение во всех областях энергетической отрасли. В целом, потенциальное влияние развития сквозных технологий цифровой экономики на объекты и процессы энергетической отрасли можно отобразить в виде диаграммы, приведенной на рис. 5.

Так, например, развитие интеллектуального анализа больших данных вкпе с распространением беспроводной связи и сенсорных сетей в рамках концепции Connected Enterprise выводят на качественно новый уровень процессы оценки и прогноза технического состояния оборудования, в частности, электромеханических систем (насосов, электрогенераторов, трансформаторов и др.) [25], что дает возможность существенно снизить затраты на обслуживание путем повсеместного внедрения ремонта по состоянию, в то время как технологии дополненной реальности полностью меняют сам процесс подготовки, проведения и контроля качества ремонта («цифровой монтер»).

Задачи энергоаудита и энергосбережения существенно упрощаются с применением методов интеллектуального анализа энергопотребления и векторных измерений [26], позволяющих восстановить детальную картину энергопотребления, построить топологию электрической сети и предсказать ее текущее и будущее состояния по измерениям электрических характеристик в ограниченном числе точек.

Технологии виртуальной и дополненной реальности всегда применялись в САД-системах проектирования, теперь же они широко применяются, например, и в системах охраны, в сочетании с повсеместным применением видеокамер и сенсорных сетей, снижая потребности в патрулировании территории.

Методы искусственного интеллекта (искусственные нейронные сети и алгоритмы обучения с подкреплением) позволят предсказать спрос на

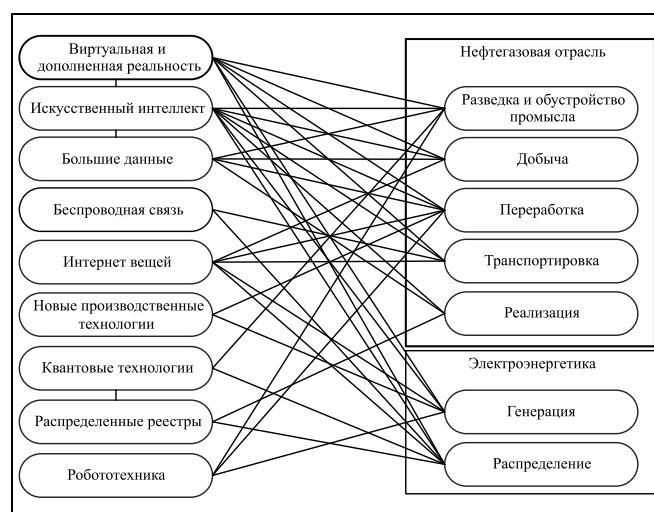


Рис. 5. Влияние развития сквозных технологий цифровой экономики на объекты и процессы в энергетике

электроэнергию даже для небольших энергорайонов и отдельных потребителей [27, 28], управлять спросом [29, 30], что позволит розничным потребителям получить доступ к оптовому рынку электроэнергии посредством интеллектуальных программных агентов (Energy Brokers) [31], а технологии распределенного реестра обеспечат надежность и безопасность расчетов.

Рост точности прогноза потребления позволит также оптимизировать загрузку генерирующего оборудования и сетевой мощности, снизить потребность в горячем резервировании, уменьшить волатильность балансирующего рынка, что в конечном итоге приведет к более стабильным ценам на оптовом рынке электроэнергии.

Применение современных вычислительных технологий и алгоритмов позволит более эффективно управлять режимом электрической сети, в частности, работать ближе к границе области устойчивости, в том числе, в перспективных электрических сетях, включающих в себя ВИЭ и распределенную генерацию.

В нефтегазовой сфере повышение точности прогнозирования потребления энергоресурсов (нефти, газа и производных) позволит оптимизировать графики добычи, передачи и хранения ископаемого топлива, что повысит операционную эффективность отрасли, снизит интегральные затраты на доставку до потребителя, повысит энергоэффективность работы оборудования.

По всей видимости, из всего спектра сквозных технологий СНТР именно технологии больших данных и искусственного интеллекта являются «ядерными» цифровыми аналитическими технологиями для всей цифровизации, а энергетическая отрасль, как отмечалось выше, является «ядерной»

отраслью для всей экономики. Поэтому синергетический эффект от развития данных технологий мультиплицируется кратно и выражается в создании предпосылок для долгосрочной глобальной конкурентоспособности отечественной промышленности в целом, в повышении качества жизни граждан.

Энергетические объекты и системы — один из ключевых предметов исследований и приложений современной теории управления — в последние 10—15 лет доля докладов, посвященных цифровой энергетике, на всемирных конгрессах Международной федерации по автоматическому управлению (около 3000 чел. со всего мира) составляет около 15—20 %, значительно обгоняя такие традиционные области как аэропейс или робототехника [5]. Нельзя забыть и об образовательном сегменте. Здесь отметим внедрение тренажеров виртуальной и дополненной реальности. Такие тренажеры могут применяться как элементы системы управления знаниями для подготовки и переподготовки персонала, для проведения имитационного моделирования сложных технологических процессов (например, проходки сложных пластов с учетом динамики изменения геофизической подосновы грунтов или ремонтных процессов энергетического оборудования и др.).

3.2. Проблемы-ограничения

К основной из этого класса проблем, общей почти для всех отраслей народного хозяйства России, относится **отсутствие национальной элементной базы** и предприятий, осуществляющих на ее основе выпуск высокотехнологичной продукции.

Второй проблемой можно считать необходимость регулярной **модернизации образовательных программ**, обеспечивающих подготовку для энергетической отрасли инженеров, владеющих современными ИКТ и сквозными технологиями.

В качестве третьей проблемы (иллюстрирующей, что применение сквозных технологий далеко не тривиально) упомянем так называемую **«энергетику больших данных»**. Действительно, давно стало окончательно ясно, что источником научных знаний, помимо теории и эксперимента, является моделирование на ЭВМ. Это кардинально поменяло отношение к суперкомпьютерным технологиям. На июнь 2011 г. самым мощным в мире суперкомпьютером был японский K computer, энергопотребление которого составляло приблизительно 5 МВт (мощность первой АЭС в Обнинске). Энергопотребление современного суперкомпьютера Summit (США) составляет около 15 МВт. Один из выходов из этой «гонки» состоит в смене вычислительной парадигмы — например, российские ученые из Сарова разработали и запатентовали оптический суперкомпьютер, чье энер-

гопотребление в сотни тысяч раз меньше, чем у полупроводниковых ЭВМ при аналогичной производительности.

3.3. Проблемы-угрозы

Сегодня человечество в рамках «цифровой революции», хотя и осознает, что, наверное, любые данные бесполезны, но не до конца понимает, что делать и как использовать их нарастающую лавину. Проблема эта не нова, так как за последнее время возник целый класс подобных проблем, и носят они цивилизационный характер. Условно их можно назвать **проблемами опережающего развития технологий**: если рассмотреть соотношение между наукой, технологиями и практикой, то в различные периоды развития человечества иногда наука инициировала развитие и последующее внедрение тех или иных технологий, а иногда последовательность была (и зачастую является в наше время!) «обратной». Технологии продолжают развиваться, причем все более быстрыми темпами. Более того, например, в последнее десятилетие скорость развития ИКТ стала опережать и практику, в том числе способности человечества по осознанию новых технологических возможностей, перспектив развития и соответствующих угроз. Именно этот эффект называют «опережающим развитием технологий» [5]. Осознать соответствующие цивилизационные проблемы, в том числе в разрезе цифровой энергетики, и научиться реагировать на них еще предстоит.

Необходимость **импортозамещения**: большая часть сложного современного цифрового оборудования в отрасль поставляется зарубежными фирмами, и часто такая поставка сопровождается заключением договора на его сервисное обслуживание. По условиям договора производитель оборудования получает полный доступ к системе мониторинга технологических параметров обслуживаемого оборудования. Оборудование оснащается активными (интеллектуальными) датчиками, которые не только собирают и передают в единый центр информацию о состоянии оборудования, но и могут управляться из такого центра, что, конечно, формирует повышенную угрозу энергетической безопасности страны. Поскольку, например, для газовых энергетических турбин около 70 % поставок приходится на долю Siemens и General Electric, а оставшиеся почти 30 % — это французские, американские и японские компании. С одной стороны, это одна из болевых точек отрасли. С другой стороны, для российского рынка это не только угроза, но и возможность, поскольку можно перевести критически важную технологическую информацию на территорию Российской Федерации, что, правда, потребует соответствующих мощностей, технологий и знаний.



Тема **кибербезопасности** выходит далеко за рамки одной только цифровой энергетики и требует отдельного глубокого анализа. Тем не менее, подчеркнем ее важные аспекты.

Прежде всего, говоря о безопасности в цифровой энергетике, необходимо понимать, что речь идет не о защите лишь информационных систем, а о безопасности информационных технологий, понимая под последней состояние информационной технологии, определяющее защищенность информации и ресурсов информационной технологии от действия объективных и субъективных, внешних и внутренних, случайных и преднамеренных угроз, а также способность информационной технологии выполнять предписанные функции без нанесения неприемлемого ущерба субъектам информационных отношений [32].

Далее, кибератаки на энергетические объекты начались далеко не вчера и закончатся отнюдь не завтра [33—35]. Достаточно вспомнить, например:

— атаку с помощью сетевого червя W32.Blaster, который стал причиной сбоя в работе электростанций в США 14 августа 2003 г. и привел к масштабному отключению электричества в электросетях Нью-Йорка и Канады;

— американо-израильскую разработку нового вида сетевого «червя» Stuxnet, поражающего контроллеры технологического оборудования, в частности центрифуг для разделения изотопов урана в Иране. И хотя официальными источниками в США данный факт не подтверждается, иранский президент М. Ахмадинежад подтвердил проблемы с технологическим оборудованием на обогатительных заводах. По имеющейся информации разработка червя заняла около двух лет. Эта программа достаточно универсальна и пригодна для нарушения работы, например, энергетических предприятий. Заразиться червем компьютер может при загрузке USB-памяти, при этом ни одна существующая на сегодня антивирусная защита его не обнаружит;

— сообщение CERT (англ. *Computer Emergency Response Team*) о том, что в октябре 2012 г. был нанесен вредоносный код в систему управления турбинами одной из электростанций США. Заражение произошло через USB, которая использовалась сотрудниками сервисной команды для обновления программ управления. И это, по свидетельству CERT, далеко не единственный случай подобного заражения энергетических предприятий США;

— «Лаборатория Касперского» в июне 2016 г. сообщила, что обнаружила уязвимость в терминале релейной защиты «Siemens Siprotec 4» — устройстве, широко используемом во всех областях энергетики для защиты сети от коротких замыканий и критических нагрузок;

— компания «Positive Technologies» в декабре 2016 г. сообщила о выявлении уязвимости в про-

граммном обеспечении «Siemens SICAM PAS» (Power Automation System), предназначенном для построения АСУТП в энергетике. Данное ПО используется на подстанциях различных классов напряжения в России, странах Европы и др.;

— «Лаборатория Касперского» и CERT опубликовали результаты исследований ландшафта угроз для систем промышленной автоматизации во втором полугодии 2017 г. Согласно отчету, в этот период две индустрии атаковали больше остальных: энергетику (38,7 % компьютеров АСУ подверглись хотя бы одной атаке) и инжиниринг/интеграторов АСУ (35,3 %).

Наконец, уже к 2007 г. хакерство перешло на коммерческую основу, в этой сфере возникла конкуренция, что способствовало быстрому росту качества вредоносных программных продуктов и падению цен на услуги в этой области. Темпы роста числа взломанных машин в мире заставляют говорить об индустриальной революции в этой сфере. С одной стороны, это стало одним из важнейших видов преступного бизнеса, с другой — уровень организации, автоматизации и разделение труда в этой отрасли достигли небывалых масштабов.

Более того, началась разработка наступательного информационного оружия. Этим занялись практически все развитые страны. Речь уже идет о подготовке и реализации информационных войн как одной из составляющих **войн гибридных**, нацеленных на поражения систем управления, приводящие к выходу из строя критических управляемых объектов, к которым относятся большинство объектов отрасли.

В последние годы ведется достаточно большое число работ по выявлению, определению и устранению критически уязвимых мест по отношению к внешним воздействиям. В статьях [36, 37] рассматривается подход, позволяющий обнаружить как систематические ошибки, так и помехи, преднамеренно внесенные в результаты кибератак. В работе [38] для выявления кибератак предложен подход, использующий иерархическое дерево отказов. Для исключения возможности кибератак на цифровых подстанциях в работах [20, 39], выделяются критические функции защит и автоматики, реализуемые не на цифровой базе, при этом обосновывается необходимость в качестве «последнего эшелона» иметь подсистемы релейной защиты и противоаварийной автоматики, не интегрированные в информационные системы, поэтому не подверженные кибератакам. Предложена имитационная подсистема, позволяющая идентифицировать кибератаки, а также выявлять потенциальные ошибки алгоритмов и программного обеспечения [40]. Отметим, что в создаваемых киберфизических энергосистемах постоянно возникают новые проблемы, требующие глубоких исследований и

нетривиальных решений по обеспечению нормального функционирования, живучести и кибербезопасности систем [41].

Отдельный и важный класс задач составляют проблемы, связанные с **устойчивостью и надежностью** энергетических систем, структура которых становится все более сложной и децентрализованной, что приводит к повышению чувствительности к локальным отказам, возможности развития каскадных эффектов. Адекватный ответ на этот вызов состоит в применении современных методов и средств анализа и управления устойчивостью [42], реконфигурации структуры и обслуживания по состоянию. С этим аспектом тесно связан будущий рост влияния электромобилей как элементов, интегрированных в систему систем «распределенная генерация — накопители энергии — IoT (цифровые датчики, актуаторы и средства коммуникации)» [43, 44].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как отмечалось во Введении, цифровизация является и вызовом, и актуальным «окном возможностей» резкого технологического и экономического скачка. Но необходимо помнить и о другой крайней точке зрения. История науки и технологий свидетельствует, что на ранней стадии развития любой успешной науки бывает «романтический» период. Романтизму свойственны, помимо полета мысли и бурных эмоций, завышенные ожидания и соблазн простых решений (первые теоретические успехи, а также интенсивное внедрение результатов создают иллюзию универсальности и неизбежности столь же быстрого дальнейшего прогресса, после чего число популяризаторов начинает превышать число профессионалов). На смену приходит «юность» — стремление к агрессивной экспансии, зачастую стимулируемой не только потребностью в признании, но и (особенно для технологичных приложений, дошедших до бизнес-реализации) вполне меркантильными интересами. За романтическим детством и энергичной юностью наступают разочарования зрелости, а затем и упадок. Со временем продолжительность этих характерных периодов становится все меньше, и одна «научная мода» все быстрее сменяет другую.

Нередко этим пользуется бизнес, быстро убеждая потребителя, что без соответствующей модной технологии последний обречен. При этом потребители оказываются в «ложном равновесии» — вложения в новации не окупаются (да и не всегда потребитель вообще понимает, что ему с этой новой технологией делать), но отказаться от нее нельзя, иначе прослывешь отставшим от жизни со

всеми вытекающими коммерческими последствиями.

Перечисленные закономерности жизненных циклов научно-технологических направлений ощутили на себе в полной мере, например, кибернетика, синергетика, системный анализ, автоматизация/информатизация и др., причем в XX в. характерным периодом были несколько десятилетий, а в XXI — годы; продолжают ощущать теории нечетких множеств, искусственных нейронных сетей, искусственного интеллекта и многие другие научные направления, которые в свое время в той или иной степени прошли или проходят сейчас через кризис, возникший в результате неизбежного краха соответствующих завышенных ожиданий. Вступают в кризис квантовые технологии и большие данные (последний термин впервые был употреблен в 2008 г., а уже через 10 лет появились оценки «большие данные — вчерашний хайп» [Forbes, 13.07.2018]), определенных разочарований не избежит и концепция «цифровой трансформации».

Также, чтобы сохранять объективность, отметим еще одну важную проблему, которая заключается в том, что у цифровизации, искусственного интеллекта и пр. есть обратная сторона. И оппоненты цифровизации имеют весомую аргументацию. Известно, например, что:

— мультифакторная производительность (труда и капитала) от внедрения технологий растет много медленнее, чем хотелось бы;

— искусственный интеллект еще долго будет искусственным, поскольку естественный на много порядков «мощнее»;

— рост производительности распознавания объектов при глубоком обучении требует экспоненциального увеличения объема данных и зачастую ресурсов;

— обостряются социальные проблемы и др.

Да и сама цифровизация явно не может объять необъятного. Ясно, что «цифра» сама по себе не может думать за руководителя и угадывать замыслы конкурентов, не может даже разогреть стакан воды.

Мировые вызовы, с которыми столкнулась энергетика, остро поднимают вопрос о необходимости ее цифровой трансформации. Это подтверждается и проявившимися в последние годы технологическими трендами. Все виды технологий претерпевают переход от аналоговых, физических и статических к цифровым устройствам со значительно возрастающей мобильностью. Повышаются требования к доступности, надежности и качеству поставляемой энергии, растет цифровой спрос. Значительно повышается активность потребителей по обеспечению своего энергоснабжения, они приобретают характер поставщиков и потребителей энергии. Вертикально интегрированная коммуникационная структура теряет свою актуаль-



ность, все большую востребованность получает горизонтальная сетевая организация энергетической архитектуры.

Ключевой вызов заключается в том, что энергетическая инфраструктура, созданная в середине прошлого века в рамках индустриального уклада, обладает значительным моральным и физическим износом, поэтому возникает вопрос о ее реформировании с учетом перехода к постиндустриальной организации на основе интеллекта, знаний и информационных коммуникаций.

Учитывая значительный вес в ВВП и системную значимость энергетической отрасли для страны, представляется весьма важным обеспечить государственную поддержку развития и внедрения в ней сквозных технологий. Целесообразно, чтобы такая поддержка, в основном, формировалась не финансовыми методами, а путем мотивации соответствующих субъектов к применению адекватных технологий. Мотивация со стороны государства формируется путем внесения изменений в нормативную правовую базу, требующую от субъектов отрасли использовать цифровые технологии путем применения мер налогового стимулирования, льгот в таможенной и тарифной политике государства, а также кредитной политике государственных банков.

Лидирующая системообразующая роль в развитии цифровой энергетики России может и должна принадлежать Российской академии наук. В состав основных исполнителей разработки и, как минимум, экспертов по внедрению цифровых платформ и технологий в энергетический сектор, должны включаться академические институты из профильного отделения РАН, а также институты из ряда смежных отделений РАН, специализирующихся на решении вопросов информационных технологий и искусственного интеллекта, физики, математики и др.

Именно РАН, в тесном сотрудничестве с ведущими профильными вузами и отраслевыми НИИ, проектными организациями, компаниями и корпорациями (в том числе, активно включившиеся в цифровизацию Россети, Газпром, Роснефть, Транснефть, Росатом, Ростех, Ростелеком) способна предоставить всеобъемлющий фундаментальный задел для последующего освоения в рамках программ институтов развития (НТИ Энерджинет, Фонд развития промышленности и др.) и коммерческого внедрения силами ведущих системных интеграторов при научном сопровождении профильных институтов РАН.

Удобной площадкой для научно-экспертной оценки накопленного задела и постановки задач по его развитию и внедрению является Секция по цифровой энергетике и силовой электронике Совета по НТР в области энергетики, поскольку

именно эти функции возложены на Совет согласно Постановлению Правительства России № 16 от 17 января 2018 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воропай Н.И., Стенников В.А.* Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия РАН. Энергетика. — 2014. — № 1. — С. 64–78.
2. *Воропай Н.И., Осак А.Б.* Электроэнергетические системы будущего // Энергетическая политика. — 2014. — Вып. 5. — С. 60–63.
3. *Аптекман А., Калабин В., Клинов В.* и др. Цифровая Россия: новая реальность. — URL: www.mckinsey.com/ru/~/media/McKinsey/Locations/Europe%20and%20Middle%20East/Russia/Our%20Insights/Digital%20Russia/Digital-Russia-report.ashx (дата обращения 04.12.2018).
4. *Цифровой переход* в электроэнергетике России. Экспертно-аналитический доклад / под общ. ред. В.Н. Княгинина и Д.В. Холкина. — СПб.: Центр стратегических разработок. — Северо-Запад. — URL: <https://www.csr.ru/issledovaniya/tsifrovoy-perhod-v-energetike-rossii/> (дата обращения 04.12.2018).
5. *Novikov D.* Cybernetics: from Past to Future. — Heidelberg: Springer, 2016.
6. *Ковалев С.П.* Применение онтологий при разработке распределенных автоматизированных информационно-измерительных систем // Автометрия. — 2008. — Т. 44, № 2. — С. 41–49.
7. *Дмитриевский А.Н., Мартынов В.Г., Абукова Л.А., Еремин Н.А.* Цифровизация и интеллектуализация нефтегазовых месторождений // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. — 2016. — № 2 (24). — С. 13–19.
8. *Еремин Н.А., Дмитриевский А.Н., Тихомиров Л.И.* Настоящее и будущее интеллектуальных месторождений // Нефть. Газ. Новации. — 2015. — № 12. — С. 44–49.
9. *Черкасов М.* Умные технологии в нефтегазовой отрасли // Control Engineering Россия. — 2015. — № 3 (57). — С. 20–22.
10. *Ремизова Т.С., Кошелев Д.Б.* Проблемы и задачи развития цифровых технологий в электроэнергетической отрасли России // Энергоэксперт. — 2018. — № 2. — С. 69–73.
11. *Медведева Е.А.* Острые углы цифровизации // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2018. — № 4 (49). — С. 18–20.
12. *Технология умных городов.* — СПб.: Центр стратегических разработок. — Северо Запад. — URL: http://csr-nw.ru/files/publications/doklad_tehnologii_dlya_umnyh_gorodov.pdf (дата обращения 04.12.2018).
13. *Voropai N., Stennikov V., Senderov S., et al.* Modeling of Integrated Energy Supply Systems: Main Principles, Model, and Applications // Journal of Energy Engineering. — 2017. — Vol. 143, iss. 5. — DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000443.
14. *Voropai N.I., Stennikov V.A., Barakhienko E.A.* Integrated Energy Systems: Challenges, Trends, Philosophy // Studies on Russian Economic Development. — 2017. — Vol. 28, N 5. — P. 492–499.
15. *Алексеев А.В., Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г.* и др. Современное состояние и опыт применения ИВС «АНГАРА» для решения задач проектирования, эксплуатации и диспетчерского управления системами водоснабжения / под ред. Н.Н. Новицкого. — Новосибирск: Наука, 2017. — С. 340–353.
16. *Алексеев А.В., Новицкий Н.Н.* Компьютерная технология «АНГАРА» для интеграции информационного и вычислительного пространства при моделировании трубопроводных систем // Научный вестник НГТУ. — 2017. — № 2. — С. 26–41.
17. *Stennikov V.A., Barakhienko E.A., Sokolov D.V.* Use of Multi-level Modeling for Determining Optimal Parameters of Heat

- Supply Systems // Thermal Engineering. — 2017. — Vol. 64, N 7. — P. 518–525.
18. *Стенников В.А., Жарков С.В.* Эффективные направления технической политики в энергоснабжении // Известия РАН. Энергетика. — 2017. — № 5. — С. 19–31.
 19. *Стенников В.А., Пенковский А.В., Хамисов О.В.* Поиск равновесия Курно на рынке тепловой энергии в условиях конкурентного поведения источников // Проблемы управления. — 2017. — № 1. — С. 10–18.
 20. *Тюмень* — единственный в России город с «Умной теплотсетью». — URL: <http://uralpolit.ru/news/tyumen/24-10-2017/123900> (дата обращения 04.12.2018).
 21. *Волков Д.А., Малкин В.В., Черкасова О.А.* и др. О системе теплоснабжения города Набережные Челны // Новости теплоснабжения. — 2017. — № 3. — С. 17–21. — URL: www.rosteplo.ru/nt/199 (дата обращения 04.12.2018).
 22. *Надежное и экономичное снабжение теплом своих потребителей.* — URL: <http://leo-mosk.livejournal.com/3883960.html> (дата обращения 04.12.2018).
 23. URL: <http://www.energsovet.ru/news.php?zag=1378450211> (дата обращения 04.12.2018).
 24. *Kafle Y.R., Mahmud K., Morsalin S., Town G.* Towards an Internet of Energy // Proc. of the 2016 IEEE Int. Conf. on Power System Technology (POWERCON). IEEE, 2016. — P. 1–6.
 25. *Li J., Tao F., Cheng Y., Zhao L.* Big Data in Product Lifecycle Management // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2015. — Vol. 81, N 1. — P. 1433–3015.
 26. *Faustine A., Mvungi N.H., Kajjage S., Michael K.* A Survey on Non-Intrusive Load Monitoring Methods and Techniques for Energy Disaggregation Problem // arXiv:1703.00785.
 27. *Hosein S., Hosein P.* Load Forecasting using Deep Neural Networks // Proc. of IEEE ISGT Conference. IEEE, 2017. — P. 1–5.
 28. *Kaytez F., Taplamacioglu M.C., Cam E., Hardalac F.* Forecasting Electricity Consumption: A Comparison of Regression Analysis, Neural Networks and Least Squares Support Vector Machines // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. — May 2015. — Vol. 67. — P. 431–438.
 29. *Бурков В.Н., Губко М.В., Новиков Д.А.* Организационные механизмы управления в электроэнергетике / Управление развитием крупномасштабных систем. — М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2012. — С. 261–278.
 30. *Гребенюк Г.Г., Ковалев С.П., Крыгин А.А., Середа Л.А.* Организация энергоменеджмента и планирование электрической нагрузки домохозяйств // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2015. — № 3. — С. 22–27.
 31. *Chen T., Su W.* Indirect Customer-to-Customer Energy Trading with Reinforcement Learning // IEEE Trans. on Smart Grid (Early Access). — 18 July 2018. — DOI: 10.1109/TSG.2018.2857449 (дата обращения 04.12.2018).
 32. *Калашников А.О., Ермилов Е.В., Чопоров О.Н.* и др. Атаки на информационно-технологическую инфраструктуру критически важных объектов: оценка и регулирование рисков. — Воронеж: Научная книга, 2013.
 33. *Логонов Е.Л., Райков А.Н.* Сетевые информационные атаки на системы управления энергетическими объектами критической инфраструктуры // Теплоэнергетика. — 2015. — № 4. — С. 3–9.
 34. *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. — 2017. — Вып. 68. — С. 274–282.
 35. *Caviglione L., Gaggero M., Cambiaso E., Aiello M.* Measuring the Energy Consumption of Cyber Security // IEEE Communications Magazine. — 2017. — Vol. 55, iss. 7. — P. 58–63.
 36. *Колосок И.Н., Коркина Е.С.* Роль задачи оценивания состояния в обеспечении кибер-физической надежности интеллектуальной энергосистемы // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. — 2016. — Вып. 67. — С. 386–395.
 37. *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.
 38. *Колосок И.Н., Гурина Л.А.* Повышение достоверности информационных потоков данных синхронизированных векторных измерений // Междунар. науч.-техн. конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем». — СПб., 2017. — С. 915–921.
 39. *Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я.* Влияние кибербезопасности объектов электроэнергетики на надежность функционирования ЭЭС // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. — 2016. — Вып. 67. — С. 377–385.
 40. *Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я.* Обеспечение работоспособности комплексов противоаварийной автоматики и релейной защиты в условиях кибератак // Междунар. науч.-техн. конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем». — СПб., 2017. — С. 931–939.
 41. *Массель Л.В., Вороний Н.И., Сендеров С.М., Массель А.Г.* Кибербезопасность как одна из стратегических угроз энергетической безопасности России // Вопросы кибербезопасности. — 2016. — № 4. — С. 2–10.
 42. *Yadykin I.B., Kataev D.E., Iskakov A.B., Shipilov V.K.* Characterization of Power Systems near their Stability Boundary using the sub-Gramian Method // Control Eng. Practice. — 2016. — Vol. 53. — P. 173–183.
 43. *Kabalci Y.* A Survey on Smart Metering and Smart Grid Communication // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2016. — Vol. 57. — P. 302–318.
 44. *Nefedov E., Sierla S., Vyatkin V.* Towards Electric Vehicles Integration to Distributed Energy Resources of Prosumer // Proc. of IEEE 15th Int. Conf. on Industrial Informatics (INDIN). IEEE, 2017. — P. 769–772.

Статья представлена к публикации членом редколлегии И.Б. Ядыкиным.

Вороний Николай Иванович — чл.-корр. РАН, науч. руководитель Института, зав. отделом, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, ✉ voronai@isem.irk.ru,

Губко Михаил Владимирович — д-р физ.-мат. наук, зам. директора, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ mgoubko@mail.ru,

Ковалев Сергей Протасович — д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ kovalyov@nm.ru,

Массель Людмила Васильевна — д-р техн. наук, зав. лабораторией, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, ✉ massel@isem.irk.ru,

Новиков Дмитрий Александрович — чл.-корр. РАН, директор, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ novikov@ipu.ru,

Райков Александр Николаевич — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ alexander.n.raikov@gmail.com,

Сендеров Сергей Михайлович — д-р техн. наук, зам. директора, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, ✉ ssm@isem.irk.ru,

Стенников Валерий Алексеевич — чл.-корр. РАН, директор, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, ✉ SVA@isem.sei.irk.ru.

*Поступила 23.11.2018.
Принята к публикации 12.12.2018.*