УДК 65.011.55

JEL O14, O31

DOI: 10.17213/2312-6469-2020-6-29-49

INDUSTRY 4.0 В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ: ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИФРОВИЗАЦИИ ОТРАСЛИ

© М.А. Алленых*, М.М. Осецкая** 2020

**Финансовый Университет при Правительстве
Российской Федерации, г. Москва, Россия*

***АНО ДПО «Техническая академия Росатома, г. Обнинск, Россия*

В статье рассмотрены мировые тенденции развития цифровых технологий, сформулированы факторы и ограничения цифровизации электроэнергетической отрасли России. Рассмотрены направления внедрения цифровых технологий в атомной энергетике: цифровая энергетика, цифровая АЭС, цифровые продукты с использованием технологий Smart Grid, Cyber security technology и кросс-технологий (IoT, IIoT, Machine learning, 3D/4D modeling, VR/AR/MR, BIM, Digital drone, Data mining, Digital twins и Digital footprint, Smart Big Data и других). Рассмотрены вопросы оценки экономической эффективности внедрения и использования цифровых технологий.

Ключевые слова: цифровизация, ядерная энергетика, атомная энергетика, АЭС, цифровая энергетика, цифровые продукты, эффективность.

INDUSTRY 4.0 IN NUCLEAR ENERGY: ECONOMIC EFFICIENCY OF THE DIGITALIZATION OF THE INDUSTRY

© М.А. Allenykh*, М.М. Osetskaya** 2020

**Financial University under the Government of the Russian Federation,
Moscow, Russia*

***Rosatom Technical Academy (RosatomTech), Obninsk, Russia*

The article examines the global trends in the development of digital technologies, formulates the factors and limitations of digitalization of the electric power industry in Russia. The directions of implementation of digital technologies in nuclear energy are considered: digital energy, digital nuclear power plants, digital products using Smart Grid technologies, Cyber security technology and cross-technologies (IoT, IIoT, Machine learning, 3D / 4D modeling, VR / AR / MR, BIM, Digital drone, Data mining, Digital twins and Digital footprint, Smart Big Data and others). The issues of assessing the economic efficiency of the implementation and use of digital technologies are considered.

Keywords: digitalization, nuclear power, nuclear power branch, digital power branch, digital products, efficiency.

Введение

Рост внутренних расходов на развитие цифровой экономики, создание стабильной и безопасной телекоммуникационной инфраструктуры для передачи, обработки и хранения больших объемов данных, использование отечественного программного обеспечения государственными структурами – основные цели национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» (Указ, 2018). Их достижение обеспечивается решением задач, среди которых преобразование энергетической инфраструктуры посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений.

В развитие направления цифровизации электроэнергетической отрасли Минэнерго России разработан ведомственный проект «Цифровая энергетика» (Ведомственный проект, 2018), заключающийся в создании благоприятных условий для внедрения цифровых технологий и платформенных решений: разработка системы координации цифровой трансформации ТЭК, формирование единой информационной среды энергетики, разработка нормативно-правовой и технической базы, обеспечение подготовки высококвалифицированных кадров для цифровой энергетики и другие.

Ядерная энергетика является частью ТЭК и представляет собой совокупность видов деятельности: генерации электроэнергии, сервиса и обслуживания оборудования АЭС, добычи и обогащения урана, производства ядерного топлива, ядерного и энергетического машиностроения, проектирования, инжиниринга и строительства, ядерной и радиационной безопасности (сайт Росатома <https://www.rosatom.ru/en/rosatom-group/nuclear-energy/>).

Продукты ядерных технологий относятся к перспективным технологиям шестого технологического уклада (Osetskaya, M.M. et al, 2019). Госкорпорация Росатом (ГК Росатом) реализует собственную стратегию и программу развития цифровизации, которые согласуются с основными принципами программы «Цифровая экономика Российской Федерации» (Распоряжение, 2017), концепции цифровой трансформации ТЭК и инструментами Industry 4.0 в электроэнергетике (Trusov A.V. et al., 2019), трансформированной в «Energy 4.0»:

- создание и развитие интеллектуальных сетей («Smart grid»);
- применение технологий кибербезопасности («Cyber security technology»);
- сквозные (базовые) технологии.

Ускоренное развитие цифровых технологий и наблюдающийся скачок к Industry 5.0, базирующейся на синергии человека и машины (Kuznetsov D.A. et al, 2018), формирует новые вызовы по повышению устойчивости и эффективности производства электроэнергии. Основным фактором развития Industry 5.0 является адаптация действующих цифровых технологий под индивидуальные запросы потребителей.

Разработка любой техники и технологии предполагает расчет экономической эффективности от ее внедрения, иначе, по нашему мнению, это удовлетворение собственного любопытства за чужой, зачастую государственный, счет. Недаром в последние годы в сфере ядерных технологий идет обсуждение вопросов коммерциализации полученных результатов исследований и разработок. Таким образом, оценка экономической эффективности внедрения и применения цифровых технологий в области ядерной энергетики является, бесспорно, актуальной задачей.

Методология

Методология цифровизации ядерной энергетики, по мнению авторов, представляет собой систему (комплекс, взаимосвязанную совокупность) принципов и подходов инженерно-технической деятельности, построенных на основе референтных, верифицированных системных решениях, позволяющую надежно и безопасно реализовывать функции энергетических объектов с применением цифровых технологий.

Высокая степень диверсификации направлений деятельности ГК Росатом и сложность взаимосвязей предопределяет необходимость внутренней цифровизации, разработки и вывода на рынок цифровых продуктов, участие в цифровизации экономики России, посредством организационных изменений в рамках цифровой трансформации и развития цифровой культуры (Annual report Rosatom).

Результаты исследования были получены с использованием основных положений системного анализа, прогнозных качественных и количественных методов.

1. Общие тренды развития цифровизации энергетики

В условиях стремительно развивающегося мирового рынка цифровых технологий первоочередной задачей является быстро выпустить новый продукт на рынок, что требует полной перестройки бизнес-модели предприятия или отрасли в целом. Консалтинговая фирма Гартнер (Gartner, <https://www.gartner.com/en>), оказывающая услуги по трансформации бизнеса, в свете развития перспективных технологий ежегодно формулирует ключевые технологические тренды на следующий год и визуализирует этапы развития основных цифровых технологий в виде «Кривой ажиотажа» (Gartner Hype Curve). По мнению Гартнера, этапами развития технологий являются запуск, пик завышенных ожиданий, долина разочарования, склон просвещения, плато продуктивности, представленные в виде кривой зависимости ожиданий от времени. Так, тренды-2020 включали (<https://vc.ru/future/151824-chto-interesnogo-est-v-gartner-hype-cycle-2020>):

1) «Цифровой Я» (Digital me), подразумевающая интеграцию технологий и человека – самого себя в виде цифрового двойника;

2) «Компонентное предприятие» (Composable enterprise), строящееся на модулях-компонентах, когда обеспечивается удаленная работа сотрудников с использованием технологий «пакетирования услуг»,

«фабрики данных», частного 5G, встроенного искусственного интеллекта (ИИ) и других;

3) «Алгоритмическое доверие» – тренды технологий, основанных на доверии к данным государственной власти, которые обеспечивают адекватную генерацию данных, конфиденциальность и безопасность;

4) «Формирующий ИИ» (Formative AI), представляющий собой динамически меняющийся ИИ, способный реагировать на изменение ситуации, путем адаптации с течением времени или путем автоматического создания новых моделей для решения новых задач;

5) «Не только кремний» (Beyond silicon), заключающихся в применении некремниевых технологий, например, биотехнологий с использованием ДНК, транзисторов на основе углерода, квантовых компьютеров и других.

На рис. 1 представлен прогноз развития цифровых технологий консалтинговой компании Гартнер на 2020 г.

Трендами 2021 г. являются (<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-strategic-technology-trends-for-2021/>):

1. «Интернет поведения» (Internet of Behaviors, IoB), обуславливающий использование данных для изменения поведения, бази-

Рис. 1. Прогноз развития технологий 2020 г., представленный на «Кривой ажиотажа» (<https://www.gartner.com/smarterwithgartner>)

рующихся на принципах ориентации на людей, независимости от месторасположения, устойчивости поставок. Принципы сформулированы в условиях социально-экономической нестабильности из-за глобальной пандемии коронавируса. Центром бизнеса являются люди, поэтому реализуется принцип ориентации на людей, которым требуются оцифрованные бизнес-процессы. Ввиду необходимости самоизоляции, дистанционной организации бизнеса независимость от месторасположения бизнеса является залогом его успешного функционирования. Аналогичны рассуждения об устойчивости поставок независимо от неопределенности внешних условий: будь то пандемия, рецессия или мировой экономический кризис. IoB позволяет корректировать поведение людей на основании полученных данных об их реакции на вызовы внешней среды. Например, телематика позволяет отслеживать поведение водителя (резкое торможение, агрессивные повороты и т.п.) в целях улучшения качества вождения, маршрутизации, безопасности, расчета страховки по ОСАГО и т.п.

2. «Общий опыт» (Total experience), представляющий собой обобщение мультиопыта, опыта клиентов, опыта сотрудников, опыта пользователей в целях улучшения общего опыта в областях, где пересекаются все эти элементы, от технологий до сотрудников, клиентов, пользователей. Например, предприятие информирует пользователя о наличии очереди и его места в этой очереди, а также о времени, когда будет выполнена заявка пользователя. Эти данные доступны как для пользователей, так и для сотрудников, позволяя планировать время обслуживания.

3. «Конфиденциальные вычисления» (Privacy-enhancing computation) включают три технологии, защищающие данные в процессе их использования: надежная среда, где данные обрабатываются и анализируются, децентрализация обработки и аналитики, а также шифрование данных и алгоритмов.

4. «Распределенное облако» (Distributed cloud) – место, где облачные сервисы распределяются по различным физическим точкам с сохранением за провайдером ответственности за эксплуатацию, управление и развитие общедоступного облака. Таким образом, предприятия экономят на содержании собственной облачной технологии, пользуясь услугами провайдера.

5. «Операции везде» (Anywhere operations) – технология, развитие моделей операций по принципу «первым цифровые, первым удаленные», когда отсутствует необходимость физического присутствия человека: бесконтактные операции, дистанционное обслуживание и т.п.

6. «Сеть кибербезопасности» (Cybersecurity mesh), представляющая собой распределенный архитектурный подход к масштабируемому,

гибкому и надежному управлению кибербезопасностью, позволяя определить периметр безопасности вокруг человека или объекта.

7. «Интеллектуальный модульный бизнес» (Intelligent composable business), который адаптируется и перестраивается в соответствии с текущей ситуацией, усиливая цифровую трансформацию бизнеса.

8. «ИИ-инженерия» (AI engineering), подразумевающая разработку ИИ, позволяющего повысить производительность, масштабируемость, интерпретируемость и надежность моделей ИИ, обеспечивая полную отдачу от инвестиций в ИИ. Основными сложностями при этом является адекватность, доверительность, этичность, правдивость и полнота используемых ИИ моделей, а также ремонтпригодность, масштабируемость и наличие инструментов управления самим ИИ.

9. «Гиперавтоматизация» (Hyperautomation), в основе которой лежит принцип «все, что может быть автоматизировано, должно быть автоматизировано».

2. Цифровая трансформация предприятий электроэнергетической отрасли

Важным инструментом цифровизации экономики страны является цифровая трансформация предприятий и отраслей народного хозяйства. Иллюстрацией концепции менеджмента жизненного цикла предприятия является модель И. Адизеса, которая показывает, как результативность и эффективность обеспечивается выполнением четырех функций (рис. 2):

- P – Providing needs: удовлетворение потребности рынка и клиентов;
- A – Administration: гарантия соблюдения установленного порядка;
- E – Entrepreneurship: поощрение предпринимательства;
- I – Integration: создание атмосферы сотрудничества на предприятии.

Рис. 2. Модель жизненного цикла предприятия И. Адизеса

Цифровая трансформация бизнес-модели обусловлена уровнем и темпами развития технологий и предприятия, когда необходимо адекватно оценить потенциал предприятия или отрасли с имеющимся уровнем развития технологий. Формируя бизнес-модель, необходимо учитывать текущие тенденции развития технологий, в основе которых лежит соблюдение принципов ориентации на людей, независимость от места расположения и устойчивость поставок, а также глобальное разделение труда, системный инжиниринг, использование многоуровневой матрицы целевых показателей и ограничений, которая позволяет оценить эффективность действий на всех этапах жизненного цикла объекта или производства. Чем больше показателей и ограничений включает модель прогнозирования поведения объекта или производства в реальных условиях нормальной эксплуатации или аварийной ситуации, тем точнее прогноз, а, следовательно, выше возможность снижения рисков отказа или неисправности объекта и последствий этих рисков в реальности.

Основные направления цифровизации в электроэнергетике сформировались примерно за последние два года. АО «Концерн Росэнергоатом» делает акцент на безопасность работы АЭС и радикальное повышение этого показателя, а также поиск и развитие новых бизнесов в отрасли. При этом необходимо учитывать факторы, влияющие на эффективность реализации программы цифровизации электроэнергетики России, которыми являются:

- усложнение решаемых задач;
- сокращение времени от момента зарождения идеи до момента ее реализации;
- сокращение финансовых ресурсов;
- глобальная конкурентоспособность, обусловленная ограниченностью по времени: время на принятие решения (time to decision), время на реализацию (time to execution), время на выход на рынок (time to market);
- повышение наукоёмкости технологий;
- мультидисциплинарность и трансдисциплинарность, предполагающие синергию новых цифровых технологий различных отраслей и компетенций экспертов разных областей науки и техники, что позволяет развивать так называемые кросс-технологии.

Министерством энергетики Российской Федерации озвучена необходимость повышения надежности функционирования национальных энергетических систем путем развития технологий активно-адаптивных электрических сетей, концепций Smart Grid и Энерджинет, внедрением систем автоматизированной защиты и управления электрическими подстанциями, нового электротехнического, электромеханического и электронного оборудования, применением новых конструкционных материалов. Перспективными направлениями, способными изменить будущий облик ТЭК, выбранными водородная энергетика, малая распределенная генерация с исполь-

зованием возобновляемых источников энергии, фотоэлектрические преобразователи и сетевые накопители (<https://minenergo.gov.ru/node/6366>). Рассматривая цифровые технологии, позволяющие трансформировать энергетику в энергетику будущего, целесообразно отметить следующие:

- создание и развитие интеллектуальных сетей («Smart grid»), представляющих собой совокупность разнородных технических решений, к которым относят, например, интеллектуальные измерительные приборы учета («Smart meter»), автоматическое подстраивание предложения под спрос на электроэнергию («Automated Demand Response»), «цифровую подстанцию» («Digital substation»), которая в режиме реального времени позволяет удаленно управлять отдельными участками сети, локальную копию «умной сети» («Micro grid»), обеспечивающую электроснабжением потребителей на удаленных и/или отдельных территориях, расчеты по электроэнергии без посредников («Block chain»), оплату в автоматическом режиме («Smart contracts») и другие. Отметим, что активно-адаптивную энергосистему интеллектуальной энергетической системы (ИЭС) или «Умную сеть» (Smart Grid) остроумно сравнивают с классической системой электроэнергетики как сотовый и проводной телефоны (Хузмиев, 2018);

- применение технологий кибербезопасности («Cyber security technology»);

- сквозные (базовые) технологии, такие как «интернет вещей» («IoT»), «машинное обучение» («Machine learning»), «3D/4D-моделирование» («3D/4D modeling»), виртуальная/дополненная/смешанная реальность («VR/AR/MR»), «информационное моделирование» («BIM»), «роботизация и сенсорика» («Digital drone»), «интеллектуальный анализ данных» («Data mining»), «цифровые двойники» («Digital twins») и «цифровые тени» (digital footprint), «большие данные» («Big data») и другие.

Прослеживается взаимосвязь трансформации бизнес-модели, о которой говорил И.Адизес, уровней развития цифровых технологий на кривой Гартнера и направлений цифровизации электроэнергетики России. Так, АО «Концерн Росэнергоатом» в программе развития цифровизации электроэнергетического дивизиона формулирует принципы формирования программы, которые обеспечивают успешную ее реализацию:

- единый подход к внедрению новых технологий;
- единая структура управления цифровизацией;
- управление изменениями, включая применение инструментов снижения сопротивления нововведениям, повышения вовлечения сотрудников в проекты цифровизации и обеспечения начала использования новых технологий.

Таким образом, АО «Концерн Росэнергоатом» осуществляет трансформацию бизнес-модели управления производственной деятельностью в соответствии с мировым уровнем развития цифровых технологий.

По нашему мнению, административным фактором, тормозящим развитие цифровизации электроэнергетики России, является недостаточная проработка нормативно-технической базы, организационным – недостаточная гибкость бизнес-моделей, не позволяющая быстро выпустить новую продукцию в соответствии с требованиями рынка, технологическим – слабая проработка прогностических моделей объектов и производств на этапе проектирования, что приводит к увеличению расходов:

- на один порядок на этапе опытной эксплуатации;
- на два и более порядков на этапе промышленной эксплуатации, а, следовательно, к снижению конкурентоспособности объекта или производства.

Наблюдается смещение акцента с этапа эксплуатации на этап проектирования: чем точнее модель описания объекта и производства на этапе проектирования, тем дешевле обходится производство объекта. Выводя на рынок технологию, предприятие должно быть готово к тому, что ее быстро скопируют и усовершенствуют, поэтому для обеспечения конкурентных преимуществ необходимо иметь в резерве несколько принципиально новых идей, которые находятся в виде прогностических моделей в виртуальном пространстве.

Многие исследователи, отмечая важность использования Big Data, фиксируют внимание на необходимости сбора, хранения и защиты информации, забывая о важной функции генерации данных. В настоящее время мы сталкиваемся с реальностью производства и накопления колоссального количества данных, непригодных для анализа и интерпретации, которые необходимо хранить и защищать, т.е. мы вынуждены хранить и защищать, по большому счету, мусор. Таким образом, первостепенной задачей применения технологии Big Data является генерация Smart Big Data – минимально необходимого количества данных, требующихся для максимально точных прогностических моделей.

Рассматривая цифровую трансформацию, приведем определения, используемые АО «Концерн Росэнергоатом» в программе цифровизации электроэнергетического дивизиона.

Цифровая энергетика представляет собой энергетическую отрасль, в которой меняются существующие отношения между производителями электроэнергии, потребителями и сетевыми компаниями в связи с появлением новых коммуникационных, информационно-вычислительных, электронных, измерительных технологий.

Цифровая трансформация в энергетике олицетворяет переход от настоящего технологического и экономического состояния Единой энергетической системы России к состоянию, в котором кардинально возросли показатели надежности и эффективности функционирования всей системы, появились доступность подключения к сети и выбора поставщика электро-

энергии, прозрачность ценообразования, при отсутствии роста цены $kВт \cdot ч$ для конечного потребителя выше роста инфляции в стране.

Цифровая трансформация для энергетических компаний представляет собой изменение бизнес-моделей и бизнес-процессов для укрепления существующих или создания новых конкурентных преимуществ за счет внедрения новых технологий в производство и управление. Иногда в процессе цифровой трансформации формируются новые виды бизнеса. Например, ценозависимое управление спросом, виртуальная электростанция, коммерческая диспетчеризация энергокластеров и другое.

Таким образом, ядерная энергетика нацелена на цифровую трансформацию при безусловном соблюдении приоритетов надежности и безопасности.

3. Перспективные направления исследований цифровизации ядерной энергетики

Ядерная энергетика, являясь высокотехнологичной и наукоемкой отраслью, проводит цифровизацию всех этапов жизненного цикла ядерного объекта, начиная с научно-исследовательских и конструкторских разработок, проектно-изыскательных работ, строительства объектов энергетике и ядерной инфраструктуры, до эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, вывода из эксплуатации.

Проектные институты в России и за рубежом переходят от классических подходов проектирования на основании документации и на базе узкоспециализированных дисциплинарных методов конструирования, к цифровому проектированию, основанному на моделях, принципах мультидисциплинарности и кросс-технологий. Например, в работе (Li Y. et al., 2017) описаны требования к динамическому тестированию цифровой распределенной системы управления и контроля АЭС (digital distributed I&C system, DCS) методом интерактивного виртуального тестирования (on-line virtual testing, OLVT). Использование предлагаемого метода позволяет осуществлять виртуальные испытания, необходимость которых возникла из-за невозможности проведения полевых испытаний и нехватки квалифицированных инженерно-технических работников в силу роста числа строящихся в Китае АЭС.

Исследования, опубликованные в работе (Shentu J., Zheng M., 2020), посвящены задачам цифрового проектирования в среде, состоящей из трех платформ проектирования (3D-схема компоновки станции, 2D-система конструирования, платформа расчета и анализа) и одной системы управления данными. Предлагаемая система управления данными (Data Management System, DMS) является ядром среды цифрового проектирования, представляя собой программный код. DMS берет на себя функции сбора, хранения, конфигурирования, контроля, отображения и использования данных проекта. Ввиду специфики проектируемых ядерных объектов коммерческое программное обеспечение не удовлетворяет функциональ-

ным требованиям, поэтому предлагаемый инструментарий DMS в работе описан подробно.

В связи с быстрой эволюцией современных информационных и коммуникационных технологий управление знаниями в ядерной отрасли приобретает новые драйверы развития в области генерации, передачи, обмена, использования инноваций в атомной отрасли. В работе (Wang M. et al., 2017) предлагается структура управления знаниями в ядерной энергетике на всем жизненном цикле АЭС с использованием цифровых технологий для создания высокоуровневой объектно-ориентированной рабочей среды, платформы интеграции автоматического проектирования и анализа, платформы цифровой динамической верификации и валидации, процедуры совместного производства, платформы цифрового строительства, онлайн-мониторинга и управления конфигурацией. Предлагаемая структура позволит повысить эффективность процесса проектирования с точки зрения безопасности на всем сроке службы станции.

В работе (Rejzek M., Hilbes C., 2018) исследованы вопросы безопасности современных цифровых систем КИПиА с использованием метода анализа рисков системно-теоретического анализа процессов (Systems-Theoretic Process Analysis, STPA). STPA рассматривает безопасность как свойство системы и исследует риски, возникающие в результате функционального взаимодействия между компонентами системы.

К сожалению, во многих отраслях наблюдается печальная картина, когда приобретает высокотехнологичное оборудование, позволяющее эффективно выполнять ряд функций или операций, но квалификации персонала для его использования не хватает. По нашему мнению, это приводит либо к «замораживанию» финансов в простаивающем оборудовании, либо к существенным расходам на обучение сотрудников, которые к тому же могут быть консерваторами, не готовыми использовать новые технологии в текущей работе. В ряде случаев имеет место устаревание программного обеспечения к закупленному оборудованию, что также приводит к дополнительным расходам. Дополнительно предъявляются требования согласованности нового программного обеспечения и уже используемого предприятием. Отдельно стоит упомянуть сертификацию, проведение которой требует тщательной верификации и валидации программного продукта.

Внедрение на атомных станциях современных цифровых систем КИПиА обусловило необходимость создания базы объединения функциональных возможностей программного обеспечения с количественной оценки его надежности. Результатами совместного исследования американских и корейских ученых (Kang H.G. et al., 2018, Guo J. et al., 2018) возможности моделирования цифровых систем КИПиА являются разработанные критерии оценки качества программного обеспечения. В исследовании предложена модель байесовской сети доверия (Bayesian Belief Network,

BBN), которая оценивает количество ошибок в программном обеспечении с учетом жизненного цикла разработки программного обеспечения (Software Development Life Cycle, SDLC). Структура и параметры модели устанавливаются экспертным методом и на основе информации, применяемой в системах, важных для безопасности. Обоснованность применения BBN для количественной оценки надежности программного обеспечения подтвердилась путем использования модели BBN в интегрированной цифровой системе аварийной защиты реактора, позволив оценить количество дефектов на каждом этапе SDLC, вероятность отказа программного обеспечения. Предлагается использовать разработанную модель BBN как инструмент оценки качества цифровых систем КИПиА, надежности программного обеспечения цифровой системы аварийной защиты реактора, потенциального риска отказа реактора из-за отказа программного обеспечения.

В развитие предыдущих исследований в работе (Cho J. et al., 2019) рассматриваются достоинства и недостатки аналоговых и цифровых систем КИПиА, проводится исследование количественной оценки надежности программного обеспечения. Предложен метод получения исчерпывающего набора тестовых данных, критически важного для безопасности программного обеспечения. Для получения минимально необходимого количества тестовых данных, удовлетворяющих принципу «исчерпываемости», необходимо рассмотреть диапазон переменных. Все переменные классифицированы на переменные станции и внутренние переменные программного обеспечения. Входные данные переменных станции получены по результатам теплогидравлического расчета с наилучшей оценкой, данные внутренних переменных получены путем анализа серого ящика, который представляет собой метод тестирования программного обеспечения с частичным знанием его кода, чтобы определить взаимосвязь между всеми внутренними переменными.

Увеличение сложности и масштабируемости объектов приводит к увеличению вероятности сбоя применяемого программного обеспечения. В работе (Zhang Q. et al., 2020) предложен метод количественной оценки надежности программного обеспечения цифровой системы управления безопасностью (DCS) с использованием неоднородной модели пуассоновского процесса.

Вопросы сертификации программного обеспечения и согласования его применения с регулирующими органами ядерной отрасли рассмотрены в работе (Yih S., Fan C.-F., 2012), в которой предложена модель принятия регулирующих решений по сертификации цифровых систем управления ядерных объектов.

Перспективными исследованиями в области цифровизации операций на объектах ядерной энергетики наиболее распространены изучение влияния цифровизации блочного щита управления (БПУ) АЭС на анализ

надежности человека (Human Reliability Analysis, HRA), когда внедрение новых цифровых интерфейсов человек-система (Human-System Interfaces, HSI) создают проблемы для традиционных методов анализа надежности человека.

В исследовании (Jiang J. et al., 2017) рассматривается использование оптимальных методов проектирования цифрового интерфейса человек-машина с точки зрения расчета количества компонент интерфейса с применением метода анализа надежности человека.

В работе (Porthin M. et. al., 2020) рассматриваются вопросы влияния цифровых HSI на поведение и надежность оператора в соответствии с таксономией факторов формирования производительности (Performance Shaping Factor, PSF), влияния PSF на оценку вероятности ошибок человека на современных блочных пультах управления (Advanced Control Rooms, ACR). При этом аналоговая и цифровая технологии имеют каждая свои преимущества и недостатки. Цифровые технологии ACR позволяют снизить количество ошибок, оказывают функции поддержки принятия решения, однако усложняют задачи управления интерфейсом. Важными факторами, повышающими эффективность внедрения ACR, являются подготовка и опыт персонала, наличие и качество процедур, описывающих ACR, задачный тип данных и сложность применяемых алгоритмов. Цифровизация меняет способ определения, измерения PSF и влияния PSF на оценки ошибок оператора.

Крайне важной областью внедрения цифровых технологий является ядерный топливный цикл. Например, в работе (Nazemi B. et al., 2019) рассматриваются вопросы применения цифровой рентгеновской радиографии в качестве неразрушающего метода для обнаружения дефектов и проверки качества твэл в процессе изготовления. В основе метода цифровой рентгеновской радиографии лежит метод Монте-Карло, реализованный в Monte Carlo N-Particle (MCNP).

На действующих атомных станциях активно применяется методология управления ресурсом объектов и производства с применением инструментов предиктивной аналитики. «Методология управлением ресурсом (старением) – система принципов и подходов в инженерной деятельности, построенных на основе референтных, верифицированных системных решений, позволяющая надежно реализовывать установленные проектом функции систем и элементов, для всего диапазона режимов и стадий жизненного цикла, закрепленные в нормах, правилах и процедурах» (Аркадов Г.В. и др., 2019, с. 36). Иными словами, срок службы объекта, отказ объекта предсказываются на основе собираемых в ходе эксплуатации данных, т.е. методология управления ресурсом в текущем ее виде предполагает использование цифровых теней. Говоря об использовании цифровых двойников, многие исследователи подразумевают именно цифровые тени, когда информация, получаемая с датчиков реального объекта или производства,

накапливается и анализируется для выработки дальнейших действий по совершенствованию, например, программы обслуживания или модернизации производства. Технология цифровой тени базируется на фактических эксплуатационных данных. Ввиду того, что за редким исключением производство работает в нормальных режимах и нормальных условиях эксплуатации, то и получаемые данные относятся к этим режимам и условиям, а, следовательно, не позволяют предсказывать поведение объектов в аварийных или переходных режимах. По нашему мнению, цифровой тенью можно назвать систему контроля, управления и диагностики (СКУД) реакторной установки. Типовые СКУД включают системы внутриреакторного контроля (СВРК), комплексного анализа (СКА), контроля течей теплоносителя первого контура (СКТ), которая состоит из двух подсистем – акустического (САКТ) и влажностного (СКТВ) контроля, контроля вибраций основного оборудования (СКВ), обнаружения свободных и слабо закрепленных предметов (СОСП), контроля остаточного ресурса основного оборудования (САКОР). Таким образом, информация, получаемая с датчиков, интерпретируется с точки зрения соответствия заданным параметрам или пределам эксплуатации, а результаты позволяют предсказать отказ оборудования или реакторной установки. В настоящее время достигнут порог числа датчиков, т.е. установление их большего количества не повысит качество прогноза, однако повысит стоимость обслуживания этих датчиков, что делает их установку нецелесообразной.

Цифровой двойник подразумевает создание несуществующего объекта или производства, где моделируя виртуальные ситуации изменения параметров или условий функционирования, например, повышение температуры, давления, вибрации, ионизирующего излучения, падения самолета на объект или цунами, позволяет предсказывать поведение объекта или системы в целом. На основании полученных результатов моделирования можно определить, например, показатели надежности объектов без проведения реальных испытаний, количество и места установления датчиков, разработать программу обслуживания и т.п. Во-первых, это повысит надежность и безопасность ядерных объектов, во-вторых, снизит расходы на этапах проведения испытаний, строительства, эксплуатации, обслуживания объектов, и, как следствие, удешевит электроэнергию, повысив конкурентоспособность станций.

Важной областью использования цифровых технологий является снижение доз облучения персонала на этапах эксплуатации и вывода из эксплуатации. Очевидно преимущество применения цифровых технологий в области технического обслуживания и ремонта, демонтажа оборудования при выводе из эксплуатации. Например, в исследовании (Kim I. et al., 2020) предложена методология обновления цифрового макета для автоматизированного демонтажа ядерной установки и предложен алгоритм реализации прототипа программного обеспечения для тестирования методологии. Рос-

сийскими исследователями изучение факторов, влияющих на дозы облучения персонала, моделирование ситуаций их снижения за счет использования современных инструментов ремонта, проводились на протяжении всей истории развития ядерных технологий.

Следует отметить высокий уровень развития цифровых технологий на российских атомных станциях, которые смело можно назвать создающими основу конкурентного преимущества будущих российских ядерных технологий на мировом рынке энергетики.

4. Программа цифровизации Электроэнергетического дивизиона АО «Концерн Росэнергоатом»

Программа цифровизации АО «Концерн Росэнергоатом» Электроэнергетического дивизиона нацелена на реализацию бизнес-стратегии по обеспечению безопасности, надежности и эффективности эксплуатации атомных станций, формированию портфеля дополнительных внешних продуктов, в том числе и цифровых (Годовой отчет АО «Концерн Росэнергоатом», 2019, 2018, 2017). В рамках программы цифровизации АО «Концерн Росэнергоатом» реализует следующие направления: цифровая энергетика, цифровая АЭС, цифровые продукты. Отметим, что выбранные направления развития находятся в тренде перспективных цифровых технологий 2021 г. Факторами, оказывающими существенное влияние на эффективность разработки и внедрения цифровых технологий, являются:

- внутренние – необходимость повышения эффективности операционной деятельности, увеличения доли выработки электроэнергии, сохранения прироста выручки;
- внешние – а) отсутствие общего роста потребления в энергосистеме России, в том числе из-за активного развития малой и распределенной генерации; б) достижение доли АЭС в энергосистеме предельного уровня в существующей конфигурации единой энергосистемы России. Неманевренный график работы реакторов АЭС и наличие суточных колебаний потребления не позволяют повышать базовую выработку свыше определенного уровня; в) сокращение экспорта электроэнергии из России, риск роста импорта электроэнергии из Белоруссии; г) требования потребителей электроэнергии и смежных с энергетикой отраслей отказаться от так называемых «нерыночных механизмов»: надбавок на безопасность АЭС и ГЭС, гарантированного возврата средств при строительстве и модернизации генерации, перекрестного субсидирования между промышленными потребителями и населением, льготного технологического присоединения к сетям; д) сдерживание роста цен на электроэнергию на уровне государства.

Для того чтобы внешние вызовы и риски стали новыми возможностями и драйверами развития, необходимо формировать новые бизнес-процессы и вносить изменения в существующие, формировать новые цифровые продукты и услуги.

Так, цифровая энергетика реализуется за счет развития цифровой

инфраструктуры, в том числе интеллектуальных измерительных систем, платформенных решений цифровой инфраструктуры, управления спросом на электрическую энергию на оптовом и розничном рынках, цифровым сбытом, Умным городом и Умным домом в части ресурсоснабжения, элементами цифровой подстанции. Необходимость комплексного решения поставленных задач обусловила интеграцию отдельных проектов в общие направления цифровизации (рис. 3).

Создание программного аналога АЭС путем цифрового моделирования станции, который полностью описывает внутренние процессы, технические характеристики оборудования и его поведение в условиях реальной эксплуатации, позволит предсказывать состояние объекта на перспективу, включая неплановые остановки оборудования, на основании математических моделей и данных о состоянии АЭС, получаемых в режиме реального времени с датчиков АСУ ТП АЭС.

Цифровая АЭС представляет собой интеграцию цифровых решений по разработке цифрового проекта АЭС, цифрового шаблона эксплуатации, цифрового двойника АЭС, цифрового персонала, цифровой инфраструктуры и цифровой безопасности (Годовой отчет ГК Росатом, 2019, 2018).

Реализация цифрового проекта АЭС направлена на создание информационных моделей АЭС (цифровых двойников), обеспечивая сбор оперативной информации о фактическом состоянии функционирования АЭС. Цифровой шаблон эксплуатации предполагает цифровизацию процессов АЭС и АО «Концерн Росэнергоатом» в части автоматизации процессов поддержки эксплуатации АЭС и учета опыта эксплуатации, мониторинг исполнения процессов, т.е. активное применение технологии Big Data.

Рис. 3. Интегрированное решение «Цифровая энергетика»

Цифровой шаблон эксплуатации АЭС состоит из системы технического обслуживания и ремонта, поддержки эксплуатации, системы мониторинга, системы кризисного центра, системы управления ресурсами предприятия, системы управления поставками, системы управления технической документацией, системы учета опыта эксплуатации и др.

Разработка цифрового двойника АЭС обеспечивается внедрением технологий, дающих возможность моделирования и прогнозирования инцидентов, влияющих на безопасность и выработку электроэнергии, режимов работы топливных элементов, возможность оперативного управления АСУТП через Industrial Internet of Things (IIoT). Использование цифрового двойника в техническом обслуживании и ремонте позволит осуществить переход с планового-предупредительного обслуживания на обслуживание по техническому состоянию (Condition-based maintenance, CBM) и риск-ориентированному обслуживанию (Risk-centered maintenance, RCM) по результатам предиктивного анализа.

Внедрение передовых систем обучения (VR/AR/MR), повышающих качество обучения персонала, систем мониторинга состояния здоровья персонала, обеспечивающих повышение безопасности АЭС, являются инструментами развития направления «Цифровой персонал».

Цифровая инфраструктура характеризуется развитием ЦОД, узлов связи, беспроводной среды передачи технических данных на АЭС и т.п.

В рамках цифровой безопасности реализуется комплекс мероприятий, повышающий безопасность АЭС в части контроля соблюдения техники безопасности и пожарной безопасности, контроля доступа на базе ИИ и видеоанализа, защита от нового вида киберугроз.

Программа «Цифровые продукты» является логическим продолжением создания новых продуктов для внешних (внеотраслевых) пользователей и направлена на повышение доли внешней выручки от неосновных продуктов электроэнергетического дивизиона АО «Концерн Росэнергоатом». Понятие цифровых продуктов включает облачные и инфраструктурные продукты на основе развития собственных центров обработки данных и площадок модульных вычислителей, отраслевые контейнерно-модульные решения, программное обеспечение со специализированными настройками и контентом и цифровые решения, предназначенные для коммерческого использования сторонними крупными промышленными заказчиками, отдельные самостоятельные компоненты и программное обеспечение на основе внутреннего референтного использования предприятиями Госкорпорации «Росатом». Например, целью создания центров обработки данных является реализация собственной катастрофоустойчивой системы обработки и хранения данных для производственного процесса с обеспечением доступа систем 365/24, а также диверсификация бизнес-портфеля, освоение нового для АО «Концерн Росэнергоатом» направления по предоставлению услуг обработки и хранения данных.

5. Экономическая эффективность цифровизации ядерной энергетики

Экономическая эффективность является залогом повышения конкурентоспособности цифровых технологий в секторе ядерной энергетики. Однако любое внедрение инноваций требует оценки готовности пользователей к работе в новой информационной системе и минимизации рисков при переходе на новые бизнес-процессы и технологии в рамках каждого проекта цифровизации (Годовой отчет ГК Росатом, 2019, 2018). В обеспечение готовности перехода инноваций в промышленную эксплуатацию проводится анализ новых бизнес-процессов и их влияния на текущие процессы организации (рис. 4).

При этом осуществляется расчет плановых, фактических и прогнозных показателей эффективности внедрения цифровых продуктов. Показателями оценки эффективности в АО «Концерн Росэнергоатом» выбраны выручка, прибыль, рентабельность по прибыли, EBITDA, рентабельность по EBITDA, портфель заказов по цифровым продуктам, рентабельность портфеля заказов, доля рынка цифровых продуктов. Отметим, что внедрение любой технологии рассматривается в предположении оптимизации сроков и стоимости протекания бизнес-процессов, ускорения принятия управленческих решений. При этом никто не отменяет использование классических подходов к оценке эффективности, таких как NPV, IRR, WACC и других. Принимая во внимание, что в ряде случаев новая техника, технология, материал требуют полной перестройки инфраструктуры производства, целесообразно оценивать внедрение инноваций с точки зрения влияния на всю систему в целом. Например, новое дезактивирующее вещество, несмотря на отличные дезактивирующие свойства, сложно собирается с поверхностей оборудования, сложно утилизируется и т.д. Так стоит ли его использовать?

Влияние новых бизнес-процессов				
Направление	Бизнес процессы	Функции и обязанности	Знания и навыки	Техническое оборудование
Результат	Изменения регламентов, стандартов, карт процессов	Изменения орг. структуры, штатного расписания, положений и должностных инструкций	Проведение дополнительного обучения сотрудников, информирование об изменениях, подготовки обучающих материалов	Изменения технического оснащения, закупки дополнительного оборудования, настройки ПО

Рис. 4. Влияние новых бизнес-процессов на текущую ситуацию в организации

Или приобретение нового оборудования потребует установки устройств сопряжения с внешними средствами диагностирования с учетом обеспечения их взаимного согласования с точки зрения их расположения, доступности, легкоосъемности, безопасному и правильному соединению для подсоединения первичных измерительных преобразователей или переходных устройств, их защите от повреждений и загрязнений при работе оборудования и т.п. Таким образом, необходимо оценивать экономическую эффективность внедрения и использования новых цифровых технологий.

Заключение

Изменения в бизнесе каждой электроэнергетической компании неизбежны, необходимы и обязательны для сохранения позиций в отрасли. При этом цифровизация является лишь инструментом достижения поставленных целей за счет использования цифровых технологий. Данные в цифровой форме являются, своего рода, активом компании, с которым следует научиться эффективно работать. Выбранные направления цифровизации ядерной энергетики – цифровая электроэнергетика, цифровая АЭС, цифровые продукты – находятся в тренде развития энергетического сектора, а используемые при этом цифровые технологии соответствуют уровню и темпам цифровой трансформации бизнес-модели АО «Концерн Росэнергоатом». Выявленные ограничения цифровизации электроэнергетического сектора в целом и ядерной энергетики в частности предлагается превратить в возможности и драйверы развития путем разработки нормативной базы цифровых технологий, обеспечения сертификации цифровых продуктов, смещения акцентов в сторону повышения точности цифровых моделей, использования кросс-технологий. Новые цифровые продукты и услуги формируются не как самостоятельная задача, а как результат изменений собственной бизнес-модели и оценки экономической эффективности трансформации производства.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204 О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года. <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/11246/84473>.
2. Ведомственный проект Минэнерго России «Цифровая энергетика». <https://minenergo.gov.ru/node/14559>.
3. Кузнецов Д.А., Кормин Т.Г., Мосейчук Е.И., Васильев А.Н. Индустрия 5.0, ее различия и точки соприкосновения с Индустрией 4.0// Наука - эффективный инструмент познания мира: Материалы международной научно-практической конференции. Саратов: ООО «Центр профессионального менеджмента «Академия Бизнеса», 2018. – С. 46-51.
4. Osetskaya Mariya M., Allenykh Marina A., Varvus Svetlana A. The digital economy: modern challenges in Russian nuclear power industry// Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Т. 726. – С. 244-253.
5. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.06.2017 № 1632-р Об

- утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации». <http://government.ru/docs/28653/>.
6. Trusov A.V., Trusov V.A., Nazarova A.V. Overview of Trends of Information and Communication Technologies of Digital Transformation in the Fuel and Energy Complex Abroad // Information resources of Russia. 2019. No 5. P. 2-6.
 7. Хузмиев И.К. Цифровизация энергетики России // Научные труды вольного экономического общества России. М: Общероссийская общественная организация "Вольное экономическое общество России", 2018. Т. 210. № 2. – С. 135-150.
 8. Аркадов Г.В., Егоров С.Е., Кацер Ю.Д., Ковалев Е.В., Козицы В.О., Максимов И.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Предиктивная аналитика и диагностика АЭС / НПО Диапром. – М., 2019.
 9. Porthin M., Liinasuo M., Kling T. Effects of digitalization of nuclear power plant control rooms on human reliability analysis – A review// Reliability Engineering & System Safety. Volume 194, February 2020, 106415. DOI: 10.1016/j.res.2019.03.022.
 10. Shentu J., Zheng M. Framework and data management of digital design system for nuclear power// Annals of Nuclear Energy. Volume 124, February 2019. P. 418-425. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.10.027>.
 11. Wang M., Zheng M., Tian L., Qiu Z., Li X. A full life cycle nuclear knowledge management framework based on digital system// Annals of Nuclear Energy. Volume 108, October 2017. P. 386-393. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.04.047>.
 12. Kang H.G., Lee S.H., Lee S.J., Chu T.-L., Varuttamaseni A., Yue M., Yang S., Eom H.S., Cho J., Li M. Development of a Bayesian belief network model for software reliability quantification of digital protection systems in nuclear power plants// Annals of Nuclear Energy. Volume 120, October 2018. P. 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.04.045>.
 13. Cho J., Shin S.M., Lee S.J., Jung W. Exhaustive test cases for the software reliability of safety-critical digital systems in nuclear power plants// Nuclear Engineering and Design. Volume 352, October 2019. 110151. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110151>.
 14. Nazemi E., Rokrok B., Movafeghi A., Choopan Dastjerdi M.H., Dinca M. Obtaining optimum exposure conditions for digital X-ray radiography of fresh nuclear fuel rods// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. Volume 923, 11 April 2019. P. 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.01.061>.
 15. Guo J., Yang M., Zou B., Zhang Y., Yang J., Dai X. Nuclear safety-critical Digital Instrumentation and Control system software: Reliability demonstration// Annals of Nuclear Energy. Volume 120, October 2018. P. 516-527. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.06.003>.
 16. Rejzek M., Hilbes C. Use of STPA as a diverse analysis method for optimization and design verification of digital instrumentation and control systems in nuclear power plants// Nuclear Engineering and Design. Volume 331, May 2018. P. 125-135. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.02.030>.
 17. Jiang J., Zhang Li, Wang Y., Xie T., Wu D., Li M., Peng Y., Peng J., Zhang M., Li P., Ma C., Wu X. Optimal design methods for a digital human-computer interface based on human reliability in a nuclear power plant: Part 2: The optimization design method for component quantity// Annals of Nuclear Energy. Volume 106, August 2017. P. 247-255. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.03.003>.
 18. Yih S, Fan C.-F. Analyzing the decision making process of certifying digital control systems of nuclear power plants// Nuclear Engineering and Design. Volume 242, January 2012. P. 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.10.010>.
 19. Li Y., Lin M., Yang Z., Hou Y., Yang Y. Methods of applying nuclear simulation tech-

- nology to the dynamic site testing of digital I&C system—I: Scheme of OLVT // Annals of Nuclear Energy. Volume 104, June 2017. P. 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.02.019>.
20. Zhang Q., Ma Q., Liu M., Zhong K., Xu B., Wu L. Research on the software reliability quantitative evaluation of nuclear power plant digital control system based on non-homogeneous Poisson process model// Annals of Nuclear Energy. Volume 144, 1 September 2020. 107589. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107589>.
21. Kim I., Hyun D., Joo S., Lee J. A methodology for digital mockup update based on the 3D scanned spatial information for the automated dismantling of nuclear facilities// Annals of Nuclear Energy. Volume 139, May 2020. 107238. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107238>.
22. Годовой отчет АО «Концерн Росэнергоатом». 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://report.rosatom.ru/go/rosenergoatom/go_rosenergoatom_2019/gea_2019.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 15.12.2020 г.).
23. Годовой отчет АО «Концерн Росэнергоатом». 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://report.rosatom.ru/go/rosenergoatom/go_rosenergoatom_2018/go_rosenergoatom_2018.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 15.12.2020 г.).
24. Годовой отчет АО «Концерн Росэнергоатом». 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://report.rosatom.ru/go/rosenergoatom/go_rosenergoatom_2017/go_rosenergoatom_2017.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 15.12.2020 г.).
25. Годовой отчет ГК Росатом. 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2018/go_2018.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 15.12.2020 г.).
26. Годовой отчет ГК Росатом. 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2019/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC_2019.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 15.12.2020 г.).

Поступила в редакцию

22.11.2020

Алленых Марина Анатольевна – кандидат экономических наук, доцент Департамента экономической теории Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Россия.

Altenykh Marina An. – Ph.D. of Economic Sciences, Associate Professor of Economic Theory Department, Financial University under the Government of Russian Federation, Moscow, Russia.

Осецкая Мария Михайловна – кандидат экономических наук, ведущий эксперт международный центр подготовки персонала АС – АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск, Россия.

Osetskaya Mariya M. – Ph.D. of Economic Sciences, Lead Expert, International Center for NPP Personnel Training, Rosatom Technical Academy (RosatomTech), Obninsk, Russia.

Россия, 125993 (ГСП-3), г. Москва, Ленинградский просп., 49

49, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125993 Russia

e-mail: marina_altenykh@mail.ru

e-mail: MMOsetskaya@rosatomtech.ru