

Цифровая трансформация энергосистем СНГ



Электроэнергетика является базовой критической инфраструктурой любой индустриально развитой экономики, а с развитием постиндустриальных укладов — уже и базовым антропогенным социальным благом, от которого напрямую зависят жизнь и безопасность людей. В то же время электроэнергетика остаётся одной самых наукоёмких и комплексных сфер деятельности человека.

Купчиков Т.В., Председатель Исполнительного комитета Электроэнергетического Совета СНГ (ИК ЭЭС СНГ); Борматин В.Е., заместитель Председателя ИК ЭЭС СНГ; Герих В.П., советник Председателя ИК ЭЭС СНГ; Ермоленко Г.В., директор Департамента внешних связей ИК ЭЭС СНГ; Рахимов А.С., директор Департамента экологии энергоэффективности и ВИЭ ЭЭС СНГ; Фролова О.Ю., директор Департамента по стратегии ИК ЭЭС СНГ

Аннотация

Исполнительным комитетом Электроэнергетического Совета СНГ подготовлен анализ прогресса и открытых вопросов цифровой трансформации мировой электроэнергетики и электроэнергетики государств — участников СНГ с акцентом на возможности развития взаимодействия в рамках рабочих структур ЭЭС СНГ.

Цифровые технологии носят «сквозной» характер для всех сфер жизнедеятельности общества, электроэнергетика не является исключением. Научно-техническая и практическая направленность приведённого ниже анализа обусловлена комплексностью проблематики — наличием множества факторов, которые необходимо выявлять и измерять для того, чтобы принимать верные стратегические решения, планировать развитие по ключевым направлениям и осуществлять корректирующее воздействие.

Наряду с анализом и гармонизацией регуляторных подходов к реализации цифровой трансформации электроэнергетической отрасли государств — участников СНГ, важной задачей является определение «системы координат», в рамках которой возможно сопоставить уровень научной и технологической проработанности того или иного аспекта функционирования энергосистем в контексте доступных на настоящий момент цифровых технологий. При этом необходимо учитывать, что развитие технологий происходит постоянно, но также постоянно возникают новые задачи и «серые зоны» в работе энергосистем, связанные с изменяющимися условиями как внутри, так и вне энергосистемы.

Существенное влияние на электроэнергетику оказывает совокупность цифровых и физических инноваций вместе с достижениями в области энергетических технологий [1, 2]. В настоящее время развитие отрасли происходит под влиянием нескольких технологических трендов.

Во-первых, идёт процесс цифровизации инфраструктуры через развёртывание систем интеллектуального учёта энергетических потоков, распределённой автоматизации, контроля оперативного состояния оборудования и качества энергоснабжения, формирования цифровых моделей для оптимального управления функционированием и развитием энергосистемы.

Во-вторых, продолжается переход к интеллектуальному управлению и инжинирингу за счёт внедрения интеллектуальных киберфизических устройств, использования методов и инструментов искусственного интеллекта для автоматического управления технологическими процессами и коммерческими отношениями, а также для автоматического инжиниринга, настройки, восстановления систем управления.

В-третьих, наблюдается прогрессирующая децентрализация производства энергии: масштабное вовлечение в энергосистему распределённых энергетических ресурсов, в том числе накопителей и возобновляемых источников энергии со стохастической выработкой электроэнергии; достижение оптималь-

ного сочетания централизованной, распределённой и автономной энергетики; использование потенциала многофункциональных генерирующих энергетических объектов, например, ко- и тригенерационных установок [3].

Происходящий процесс трансформации энергетических систем в мире сопровождается созданием соответствующей нормативной правовой базы, отражённой в:

- законах, декретах, указах;
- концепциях, стратегиях, программах;
- сетевых кодексах;
- материалах рабочих групп CIGRE;
- материалах ENTSO-E;
- стандартах IEEE серии 1547.

Формируемая новая технологическая модель электроэнергетики будет характеризоваться увеличением сложности энергосистем, появлением существенной доли распределённой генерации [4], формированием нового типа субъекта — активных потребителей, соединяющих в себе функции потребления и производства энергии [5], повышением требований по доступности, качеству и надёжности энергии.

Необходимость решения проблем статической и динамической устойчивости, живучести энергосистем, надёжности и качества электроснабжения требует дальнейшего развития автоматизированных систем диспетчерского управления, систем автоматического управления и противоаварийной режимной автоматики.

Снижение инерционности энергосистем, рост скорости протекания электромагнитных переходных процессов, связанных с короткими замыканиями и аварийными отключениями генерирующего и сетевого оборудования, обуславливают применение специальных автоматических устройств. Подобные быстродействующие устройства обеспечивают управление переходными процессами в энергосистеме. На уровне отдельных объектов (электростанций и подстанций) имеются автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУТП), а на общесистемном уровне различные автоматики косвенно координируются путём их настройки.

Выбор технических характеристик и настройка всех локальных автоматических устройств, к которым относятся устройства защиты от перенапряжений, устройства релейной защиты, контроллеры и автоматические регуляторы, невозможны без моделирования и прогнозирования работы всей энергосистемы как единого целого.

АСУТП интегрирует в себе подсистему релейной защиты и автоматики (РЗА), противоаварийной автоматики (ПА), автоматизированную информаци-

онно-измерительную систему коммерческого учёта электроэнергии (АСКУЭ), регистраторы аварийных событий (РАС), систему мониторинга и диагностики основного оборудования, систему определения места повреждения (ОМП) сети, системы сбора и передачи оперативной и неоперативной технологической информации, системы контроля качества электроэнергии и др. и осуществляет сбор первичной информации по всем параметрам технологических процессов, выполняет процедуры регулирования и дистанционного управления оборудованием. Данная система является источником информации для верхних уровней диспетчерского управления (диспетчерский пункт, центр управления) и во многом определяет эффективность управления всей энергетической системой.

С появлением первых микропроцессорных релейных защит поступающая от них информация начала также интегрироваться в системы АСУТП. Постепенно количество устройств с цифровыми интерфейсами увеличивалось (противоаварийная автоматика, режимная автоматика, системы мониторинга силового оборудования, системы мониторинга собственных нужд и т.д.). Вся эта информация от устройств нижнего уровня интегрировалась в АСУТП по цифровым интерфейсам.

Переход к качественно новым системам автоматизации и управления оказался возможен при появлении новых стандартов и технологий цифровой подстанции (ЦПС) к которым, прежде всего, относится специально разработанный стандарт МЭК 61850 и МЭК 61869. Они регламентируют не только вопросы передачи информации между отдельными устройствами, но и вопросы формализации описания схем — подстанций, защиты, автоматики и измерений, конфигурации устройств. В указанном стандарте предусматриваются возможности использования новых цифровых измерительных устройств (в том числе с цифровым оптическим выходом) вместо традиционных аналоговых измерителей (трансформаторов тока и трансформаторов напряжения). К примеру, цифровые измерительные трансформаторы передают мгновенные значения напряжения и токов по протоколу МЭК 61850-9-2 устройствам уровня присоединения. В итоге ИТ позволяют перейти к автоматизированному проектированию ЦПС, управляемых цифровыми интегрированными системами, и здесь появляются аналогии с системами управления из ИКТ-отрасли. Все информационные связи на ЦПС являются цифровыми и образуют единую шину процесса. Это открывает возможности быстрого и прямого обмена информацией между устройствами, что в итоге позволяет отказаться от массы медных кабельных связей, отдельных устройств, а также добиться более компактного их расположения. Главная особенность ЦПС

состоит в том, что все её вторичные цепи — это цифровые каналы передачи данных, образующие единую информационную сеть (сеть передачи данных).

Начало разработки средств искусственного интеллекта совпадает с моментом начала распространения компьютеров в шестидесятых годах с использованием так называемых экспертных систем, которые в своей основе представляли собой действующие на базе правил человеческие экспертные системы, применявшиеся для решения различных диагностических задач, исходя из заданных правил и имеющейся базы данных. Необходимость разработки и применения новых алгоритмов обуславливается увеличением масштабов электроэнергетических систем и расширением взаимодействия между средствами информационных технологий (ИТ) и операционных технологий (ОТ) благодаря распространению технологии интернета вещей (IoT), в рамках которой исключительное положение занимают мобильные устройства.

Одной из потенциальных технологий в данной области для развития электроэнергетической отрасли может стать машинное обучение, которое по определению представляет собой набор алгоритмов, получающих информацию из данных, извлекая скрытые структуры и обнаруживая значимые корреляции, которые в противном случае было бы сложно определить с использованием традиционных числовых методов, принимая во внимание не только сложность, но также и объём данных.

ЦИФРОВИЗАЦИЯ КАК «ОКНО ВОЗМОЖНОСТЕЙ» ДЛЯ НАУЧНОЙ КООПЕРАЦИИ И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ ГОСУДАРСТВ — УЧАСТНИКОВ СНГ

Цифровизацию, появившуюся на определённом этапе развития науки и техники, следует рассматривать прежде всего как возможность выявить те физические и технологические особенности функционирования энергосистем и оборудования и те свойства материалов, которые ранее находились в «слепой зоне», с учётом особенностей целостности, взаимосвязанности, а также комплексности отрасли.

Цифровизация как результат развития информационно-вычислительных технологий, вычислительной техники, алгоритмов, в том числе экспертных систем, а также каналов передачи информации, представляет расширенный инструментарий для мониторинга, сбора и анализа больших массивов данных, в том числе для сопоставления данных из различных отраслей, сфер деятельности и накопленной информации о характеристиках природных явлений.

Цифровизация также открывает дополнительные возможности для изучения, моделирования, прогнозирования и, как результат, влияния на все аспекты функционирования энергосистем. Особенно это актуально в контексте серьёзных технологических и научных вызовов, связанных с изменением состава генерирующего оборудования, с увеличением доли сложно прогнозируемых и распределённых объектов генерации на основе энергии солнца и ветра, изменений климата, увеличения запроса на прозрачность, экономическую обоснованность, экологичность и социальное одобрение принимаемых решений.

Для разработки методик прогнозирования сценариев отказа оборудования в зависимости от изменения параметров данных мониторинга состояния оборудования (что необходимо для перехода на ремонт по состоянию), с учётом длительных сроков эксплуатации оборудования, для накопления необходимых массивов данных в целях установления причинно-следственных связей между изменением контрольных параметров и сценариями отказов необходим анализ отказов в масштабах нескольких крупных энергосистем.

Управление основными средствами в электроэнергетических сетях XXI столетия требует применения интеллектуальных методов и алгоритмов обработки быстрорастущих объёмов данных, поступающих от многочисленных датчиков, установленных на первичном силовом оборудовании, и интеллектуальных исполнительных устройств, которые появились на месте традиционных вторичных устройств. Для оптимизации выделяемых на обслуживание ресурсов и снижения инвестиций в максимально возможной степени требуются быстрые и надёжные модели и инструменты, которые способны производить оценку состояния всего парка оборудования.

Оптимизация управления активами на фоне усиления социальной функции электрификации и растущих требований по повышению доступности энергоснабжения наряду с обеспечением необходимого уровня надёжности, гибкости и устойчивости энергосистемы, а также технологического суверенитета становится одним из ключевых приоритетов в области управления и регулирования отрасли, как в государствах — участниках СНГ, так и в большинстве стран мира.

Организация совместной работы по сбору, систематизации и анализу данных от энергетических компаний на площадке Электроэнергетического Совета СНГ при участии формируемой по поручению Экономического Совета СНГ отраслевой сети научно-экспертного сообщества государств — участников СНГ может стать основой для формирования единой методологической базы по прогнозированию сценариев

отказов оборудования и/или определения наименее отказоустойчивых узлов и агрегатов, что даст дополнительные конкурентные преимущества экономикам, снизив тарифное давление через повышение качества управления активами, прогнозируемость аварийных ситуаций и повышение срока службы парка оборудования.

Формирование при участии Электроэнергетического Совета СНГ национальных и региональных центров кооперации в области сбора и анализа данных могло бы стимулировать применение наработанных алгоритмов и рекомендаций к другим отраслям, в рамках которых используется электротехническое оборудование (железнодорожный транспорт, нефте- и газодобыча и др.), а также распространить успешный опыт на другие направления развития. При этом накопленные в СНГ «банки данных» могут развиваться и дополнять друг друга во взаимодействии с отраслевыми структурами БРИКС, ШОС и других объединений.

В рамках международного научно-технического обмена выявляются «открытые» вопросы в области цифровизации электроэнергетики, поиск ответов на которые ведётся в международном научном сообществе. Вклад специалистов СНГ в отраслевой международный научно-технический обмен всегда носил передовой характер. Активизация международного научно-технического обмена в рамках СНГ позволит укрепить позиции отраслевой науки наших стран и принять активное участие в формировании глобального целевого видения энергосистемы будущего.

Из сформулированного выше видения, с учётом действующей нормативно-правовой базы, вытекают задачи для совместного решения государствами — участниками СНГ:

в области технических характеристик, функционирования и управления энергосистемами наряду с традиционной задачей обеспечения необходимого уровня надёжности, гибкости и устойчивости работы энергосистем:

- внедрение единой информационной модели (Common Information Model — CIM) как информационного ядра цифровой трансформации электроэнергетики;

- риск-ориентированное управление на основе анализа жизненного цикла;

- повышение доступности (физической и финансовой) и экологичности энергоснабжения, декарбонизация;

в области управления активами и инжиниринга:

- оценка надёжности и управление сроком службы оборудования с длительным сроком эксплуатации;

- совершенствование требований к оборудованию при изменении сетевых условий и условий окружающей среды;

- внедрение «умного» оборудования (например, управляемое переключение, самодиагностика);

- применение методов унификации и функциональной интеграции во вторичных системах управления объектами;

- новые и улучшенные методы испытаний, новые алгоритмы исполнительных устройств, новые архитектуры построения объектов с учётом новых технологических возможностей цифрового оборудования;

в области диспетчерского управления:

- повышение пропускной способности электрической сети без строительства новых энергообъектов;

- сокращение продолжительности переключений и минимизация участия персонала энергообъектов в операциях по подключению и отключению оборудования;

- сокращение сроков выявления причин аварий и восстановления нормального режима работы электроэнергетической системы;

- сглаживание неравномерности графика нагрузки, в том числе путём вовлечения потребителей в регулирование электроэнергетического режима;

- унификация используемых информационных моделей за счёт применения единых стандартов и обеспечения их бесшовной связности на базе общедоступной модели системообразующей сети.

ЦИФРОВИЗАЦИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Энергосистемы всех стран СНГ были сформированы в советское время.

В 1957 году комиссией под руководством Г.М. Кржижановского был разработан перспективный план научных исследований по созданию Единой энергетической системы (ЕЭС) СССР. В соответствии с этим планом создание и развитие ЕЭС должно было характеризоваться переводом всей энергетической техники на качественно новую ступень [6]. К числу основных направлений этой стратегии относилась комплексная автоматизация электростанций различных типов, автоматическое управление энергосистемами и ЕЭС с применением ЭВМ, с автоматическими операторами, установленными на электростанциях и подстанциях [7].

С середины 1950-х годов отдельные энергообъединения, сформированные в промышленно развитых регионах, начали объединяться в ЕЭС страны, необходимость создания которой была продиктована растущими потребностями в обеспечении надёжного энергоснабжения послевоенной экономики и подкреплена развитием соответствующих технологий, в том числе

технологий противоаварийного управления, необходимых для сохранения живучести крупных энергообъединений и их надёжной параллельной работы друг с другом.

В 1990-е годы параллельная работа ЕЭС России с энергосистемами бывших союзных республик, получивших независимость, обеспечивалась в новых реалиях. Все объекты электроэнергетики, расположенные на территории вновь образованных государств, стали их собственностью.

Отсутствие заранее согласованных и принятых всеми партнёрами правил серьёзно осложняло процедуры

планирования и управления режимами параллельной работы ЕЭС России с энергосистемами бывших союзных республик, требовалось срочно приводить отношения между субъектами оперативно-диспетчерского управления в соответствие с новыми реалиями.

Стало развиваться сотрудничество по обеспечению энергетической безопасности государств — участников СНГ при параллельной работе энергетических систем. ЕЭС бывшего СССР превратилась в межгосударственное энергообъединение энергосистем стран СНГ и Балтии, что предопределило необходимость объединения информационно-коммуникационных

Табл. 1. Определения цифровизации, используемые в государствах — участниках СНГ

Государство	Определение цифровизации электроэнергетики
 Азербайджанская Республика	Реальность, в которой работает большинство компаний электроэнергетического сектора в мире. Цифровизация помогает не только развивать новые бизнес-модели и создавать дополнительные источники дохода, но и эффективно управлять ресурсами и оптимизировать затраты энергетических компаний.
 Республика Армения	Процесс интеграции цифровых технологий во все аспекты бизнес-деятельности электроэнергетического сектора, требующий внесения коренных изменений в операции и принципы создания новых продуктов и услуг.
 Республика Беларусь	Процесс интеграции цифровых технологий во все аспекты бизнес-деятельности в электроэнергетической сфере, требующий внесения коренных изменений в технологии, операции, бизнес-стратегии, бизнес-процессы, продукты, услуги и т.д.
 Республика Казахстан	Преобразование энергетической инфраструктуры Казахстана посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений для повышения её эффективности и безопасности.
 Кыргызская Республика	Развитие информационно-коммуникационных технологий в электроэнергетике.
 Республика Молдова	Данные не представлены
 Российская Федерация	Преобразование бизнес- и технологических процессов путём резкого снижения транзакционных издержек за счёт платформ, появления новых бизнес-моделей деятельности. Соединение возможностей технологий и традиционной сферы деятельности приводит к появлению новых продуктов и процессов с принципиально иными качествами.
 Республика Таджикистан	Укрепление цифровых основ как создание современной цифровой инфраструктуры и обеспечение повсеместного широкополосного доступа, развитие современных систем связи, создание дата-центров и цифровых платформ. Цифровизация ключевых отраслей производства, таких как энергетика, добывающая промышленность, сельское хозяйство.
 Туркменистан	Данные не представлены
 Республика Узбекистан	Современные цифровые технологии содействуют интенсивному развитию энергетической отрасли как базиса экономического и социального роста, и первичные достижения цифровых технологий на протяжении ряда лет эффективно используются в электроэнергетике Узбекистана. В настоящее время ведётся работа по их обновлению и совершенствованию за счёт комплексных современных программ.

пространств энергосистем и широкого использования цифровых технологий.

Развитие процессов автоматизации и масштабного перехода от аналоговых на цифровые технологии во всех отраслях экономики привело к появлению понятий «оцифровка», «цифровизация», «цифровая трансформация», которые вошли в употребление в профессиональной среде. Несмотря на то, что многие институты различного уровня (международные организации, государственные органы, корпорации и компании, научные организации) предложили свои определения с описаниями этих понятий, в том числе и для электроэнергетики, общепринятого их определения пока не сложилось ни в научной литературе, ни в международных руководствах по статистическому измерению, ни в государственных документах.

Рассмотрение широкого спектра этих понятий позволяет условно описать их следующим образом (рис. 1).

Оцифровка — это перевод процессов из аналогового в цифровой формат. Оцифровка может повысить эффективность, когда оцифрованные данные используются для автоматизации процессов и повышения доступности, но оцифровка не направлена на оптимизацию самих процессов или баз данных.

Цифровизация — следующий уровень изменений, на котором переведённые в цифровой формат данные и процессы можно использовать для упрощения и оптимизации операций: изменения бизнес-модели и предоставления новых возможностей получения дохода и создания ценности; это процесс перехода к цифровому бизнесу.

Цифровая трансформация — более глубокий и масштабный процесс. Это комплексное преобразование предприятия с использованием цифровых решений и технологий. Его цель — выход на новые рынки, создание новых каналов продаж и решений, которые генерируют новую чистую выручку и приводят к увеличению стоимости компании.

В электроэнергетике наиболее часто встречается понятие «цифровизация», и практически все государства — участники СНГ активно используют его, однако определяют его несколько по-разному (табл. 1).

Сопоставление определений, приведённых в табл. 1, показывает, что, по сути, цифровизация электроэнергетики для государств — участников СНГ представляет собой один из ключевых инструментов повышения эффективности функционирования отрасли в условиях быстро меняющихся рынков, растущей конкуренции и ужесточения экологических требований. Цифровизация — не новое явление для отрасли, однако её современный виток меняет сложившуюся архитектуру взаимодействия между участниками от-



Рис. 1. Определения оцифровки, цифровизации и цифровой трансформации

расли и требует использования единой терминологии в данной области.

Таким образом одним из направлений сотрудничества государств — участников СНГ в области цифровизации электроэнергетики может быть подготовка проекта единой терминологии в данной области и предложений по корректировке национальных стандартов и НПА в части терминологии.

В связи с этим предлагается включить в план работы рабочей группы (РГ) по цифровой трансформации электроэнергетики:

- разработку стандарта по терминологии цифровой трансформации электроэнергетики;
- проработку целесообразности разработки «сквозных» критериев уровня цифровизации энергосистем.

СОВРЕМЕННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Цифровая технология — общий термин для множества технологий. Сюда входят такие подмножества, как информационные технологии (ИТ) и информационно-коммуникационные технологии (ИКТ). ИТ относятся к вычислительным технологиям, включая аппаратное, программное обеспечение, интернет и другие. Подобно ИТ, ИКТ относятся к технологиям, которые обеспечивают доступ к информации посредством телекоммуникаций с упором на общение. Типичные ИКТ включают интернет, мобильные телефоны и беспроводные сети. Можно видеть, что определения ИТ и ИКТ тематически пересекаются. Однако оба они являются подмножествами цифровых технологий, которые включают электронные устройства, системы и ресурсы, которые генерируют, хранят или обрабатывают данные и информацию.

Основные цифровые технологии, доступные в настоящее время, можно укрупнённо разделить на три уровня и представить в виде экосистемы цифровых технологий (рис. 2), в соответствии с кривой технологической зрелости, используя подход, разработанный исследовательской и консультационной фирмой Gartner для того, чтобы отличить уровень развития



Рис. 2. Основные цифровые технологии, доступные в настоящее время

новых технологий от их коммерческой жизнеспособности.

Уровень I: интернет, спутниковые снимки, географическая информационная система, дистанционное зондирование, мобильные телефоны и базы данных.

Технологии уровня I существуют уже несколько десятилетий и предоставляют пользователям базовую информацию, возможности связи и поиска.

Уровень II: социальные сети, приложения, смартфоны и облачные вычисления.

Технологии уровня II существуют уже от нескольких лет до нескольких десятилетий и охватывают мгновенную связь и совместную работу, а также мгновенный обмен и хранение документов.

Уровень III: искусственный интеллект, машинное обучение, глубокое обучение; Интернет вещей и «умные» системы; технология распределённого реестра и блокчейн; большие данные и предиктивная аналитика; виртуальная и смешанная реальность; робототехника и беспилотные автомобили.

Технологии уровня III — это новейший тип технологий, направленных на увеличение потенциала отдельных отраслей и экономики в целом. Они получили наибольшее распространение лишь в последнее десятилетие. Данные технологии выходят за рамки отдельных инструментов предыдущих этапов для создания систем, использующих большое количество отдельных компонентов (интеллектуальные системы) и данных (предиктивная аналитика) для решения всё более сложных задач.

В электроэнергетике эти технологии реализуются на различных уровнях системной иерархии с использованием широкого набора телекоммуникационных технологий, представленных на рис. 3.

Эти технологии и их применение в электроэнергетике более подробно рассмотрены ниже [8, 9, 10, 11].

Искусственный интеллект (ИИ) относится к компьютерным системам, способным решать задачи, которые обычно требуют человеческого интеллекта (распознавание изображений и речи, обучение, планирование, решение проблем, принятие решений и языковой перевод). Быстрые вычисления, большие данные и более совершенные алгоритмы (инструкция, состоящая из различных шагов для выполнения конкретной задачи) в последние годы помогли продвинуть достижения в области ИИ, включая широ-

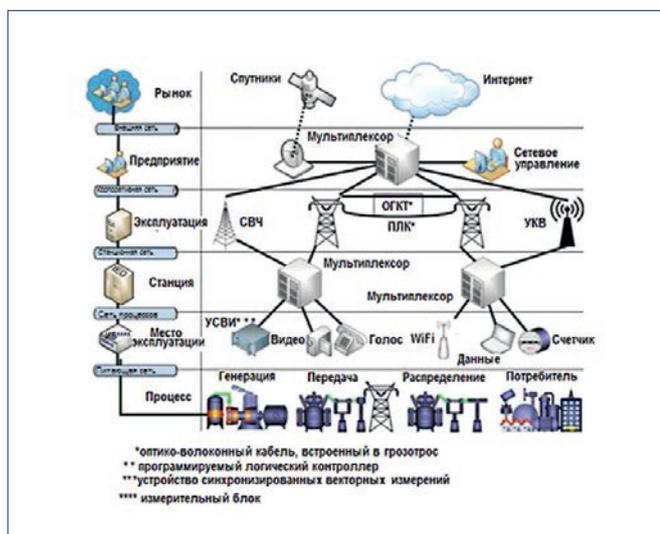


Рис. 3. Цифровые технологии в электроэнергетике

кий спектр приложений в электроэнергетике, а именно [12]:

- прогнозы;
- оптимизация работы;
- оптимизация запасов и другие стратегические бизнес-решения;
- профилактическое обслуживание;
- ремонт;
- меры безопасности;
- настройка продуктов и маркетинговых мероприятий;
- автоматизация процессов измерения, выставления счетов и общего распределения.

Машинное обучение (МО) — это подмножество ИИ, и хотя эти термины часто используются взаимозаменяемо, это не одно и то же. Вместо того чтобы решать задачи, как это делает ИИ, машинное обучение предоставляет системам возможность автоматически учиться на примерах и совершенствоваться на основе опыта без явного программирования. ИИ — это более широкая концепция машин, способных разумно выполнять задачи; МО — это идея о том, что машинам просто нужны данные для самообучения.

Тип МО, известный как глубокое обучение (ГО), использует алгоритмы, которые обучают компьютер на примерах для выполнения задач, которые основаны как на структурированных, так и неструктурированных данных, таких как изображения, звук и текст. Экспоненциальный рост вычислительной мощности позволяет моделям глубокого обучения строить многослойные нейронные сети, что было невозможно в классических нейронных сетях. Благодаря этому ГО может анализировать сложные нелинейные закономерности в многомерных данных, которые включают в себя большое количество признаков и больше не могут быть представлены традиционными математическими моделями и человек обычно не может распознать какую-либо закономерность или взаимосвязь в таких данных.

В электроэнергетике применение методов машинного обучения [искусственных нейронных сетей (ИНС) и генетических алгоритмов (ГА)] используется для формирования управляющих воздействий при применении концепции ситуационного управления для интеллектуальной поддержки принятия стратегических решений по развитию энергетики. На первом этапе рассматривается применение ИНС с целью классификации экстремальных ситуаций в энергетике, для предотвращения развития которых подбираются наиболее эффективные управляющие воздействия (превентивные меры), чтобы не допустить перерастания критической ситуации в чрезвычайную.

Интернет вещей (IoT) и интеллектуальные системы относятся к взаимосвязи объектов с интернет-инфраструктурой через передающие устройства (например, датчики), что позволяет обрабатывать данные в режиме реального времени. Обычно к этой области относят пять категорий технологий, включая носимые устройства, «умные» дома, «умные» города, датчики окружающей среды и бизнес-приложения. Повышение эффективности в результате внедрения Интернета вещей обуславливает чрезвычайно широкий спектр потенциальных применений для обеспечения устойчивости инфраструктуры, учитывая, что подключённые датчики могут передавать данные из различных областей и для различных устройств, включая энергетику, тепло- и водоснабжение, сельское хозяйство, транспорт, городское хозяйство (здания, освещение, а также твёрдые отходы). Данные, предоставляемые датчиками в таких областях, могут быть записаны в базы данных и проанализированы с помощью технологий больших данных и искусственного интеллекта.

Приложения IoT в электроэнергетике используются для оптимизации и управления активами, повышения безопасности, управления сетью и обеспечения бесперебойной работы. Двумя примерами использования Интернета вещей в электроэнергетике являются диспетчерское управление и сбор данных (SCADA) и передовая измерительная инфраструктура (AMI).

SCADA: корни Интернета вещей в отрасли уходят в начало 1950-х годов. Уже тогда использование SCADA позволило осуществлять централизованный мониторинг и управление удалёнными системами генерации и передачи. SCADA состоит из датчиков и исполнительных механизмов, управляемых центральным главным блоком, который также обеспечивает пользовательский интерфейс через человеко-машинный интерфейс. Система фиксирует данные с отметками времени для последующего анализа.

AMI: это система двусторонней связи интеллектуальных устройств как на сетевой, так и на потребительской сторонах счётчика. Состоит из домашних сетей, домашних дисплеев, систем управления энергопотреблением, интеллектуальных счётчиков, сетей связи, систем сбора и обработки данных, а также интерфейсов прикладных программ.

Блокчейн — это дополняющийся список криптографически подписанных, безотзывных записей о транзакциях, доступных для всех участников сети, представляемых условно в виде блоков. Каждая запись содержит метку времени и ссылки на предыдущие транзакции. С помощью этой информации любое лицо, имеющее права доступа, может в любой момент времени отследить транзакцию, принадлежащую лю-

бому участнику. Блокчейн является одним из архитектурных решений более широкой концепции распределённых реестров [13]. Блокчейн может хранить любую информацию, а использование методов криптографии значительно повышает безопасность, целостность и надёжность системы. Решения на базе блокчейна имеют следующие особенности:

— Децентрализованный и распределённый характер, который позволяет хранить идентичные копии информации на всех подключённых к сети устройствах («узлах») вне зависимости от единого центра. При этом сбой в работе одного из узлов не повлияет на сохранность базы данных и общую работу сети.

— Возможность децентрализованного управления системой. Функции управления и подтверждения транзакций могут реализовываться без централизованного принятия решения на основе консенсуса.

— Записанные в блокчейн данные не могут быть изменены, а любые дополнения вносятся только в виде новых «блоков». Благодаря этому система становится более стабильной и надёжной, а переписать историю «задним числом» становится практически невозможно. Участвующие в транзакции стороны могут не прибегать к помощи посредника и взаимодействовать между собой напрямую. В результате снижаются издержки и время на проведение операции.

— Прозрачность хранящейся в блокчейне информации позволяет отслеживать историю проведения транзакций в режиме реального времени, что повышает уровень доверия.

— Интеграция смарт-контрактов («умных», самоисполняющихся, написанных программным кодом контрактов, автоматически выполняемых при наступлении оговорённых условий) позволяет достигать высокого уровня автоматизации бизнес-процессов при условии наличия технологически зрелой среды (например, Интернета вещей, промышленного интернета).

К тому же технология смарт-контрактов [14] позволяет автоматизировать бизнес-процессы, повысить гибкость энергосистемы и снизить транзакционные издержки, так как сам договор исполняется автоматически по достижении определённых условий. Однако для успешного функционирования смарт-контрактов необходимо наличие технологически зрелой среды, включая Интернет вещей и промышленный Интернет вещей. Именно эти характерные особенности обусловили широкий интерес к технологии. Перечисленные возможности могут быть успешно реализованы и в области электроэнергетики. Использование смарт-контрактов превращает потребителей в активных участников энергетического рынка, способных приобретать или продавать электричество без участия третьей стороны. Например, такое решение позволяет мгновенно

записывать в блокчейн данные о совершённой транзакции между участниками, например, продаже генерируемой энергии или «зелёных» сертификатов [15].

Большие данные (big data) и предиктивная аналитика — это процессы анализа и систематического извлечения больших для традиционного прикладного программного обеспечения наборов информационных данных и применения к ним передовых методов анализа данных, например, для целей прогнозирования. Аналитика больших данных помогает в точном прогнозировании потребления энергии, что влияет на выработку электроэнергии и, в конечном итоге, на цены. Интеллектуальные сети обеспечивают двусторонний обмен данными и энергопотреблением между потребителями и поставщиками, а **big data** и аналитика обеспечивают динамическое управление энергией в интеллектуальных сетях. Это оптимизирует энергопотребление с точки зрения энергоэффективности, энергосбережения и надёжности. Прогнозирование нагрузки и производства возобновляемой энергии диктуют эффективное динамическое управление электропотреблением. Задача прогнозирования электропотребления имеет высокую актуальность для субъектов, функционирующих в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности [16].

Виртуальная реальность (VR) и смешанная реальность (MR), также дополненная реальность (AR) и перекрёстная реальность (XR) влекут за собой слияние реального и виртуального миров для создания новых сред и визуализаций, в которых физические и цифровые объекты сосуществуют и взаимодействуют в реальном времени.

Цифровой двойник — это виртуальный прототип реальных производственных активов — подстанции, турбины, ветрогенератора и т.д. Это сложный программный продукт, он создаётся на основе самых разнообразных данных и с помощью многочисленных IoT-датчиков. Цифровой двойник реального физического актива обладает способностью имитировать его фактическое поведение. Таким образом, цифровые двойники дают представление в режиме реального времени о том, что происходит с физическими активами, такими как оборудование. Цифровой двойник помогает оптимальным образом менять параметры работы оборудования и вносить улучшения гораздо быстрее и безопаснее, чем при экспериментах на реальных объектах. Переход на идеологию управления жизненным циклом ставит задачу формирования цифрового двойника ещё на этапе проектирования, а затем его последовательного совершенствования за счёт накопленных данных о поведении реального объекта моделирования. На этапе эксплуатации цифровой двойник даёт возможность прогнозировать поведе-

ние объекта/системы/процесса в обстановке изменяющихся условий и требований. Возможно моделирование любых условий воздействия, поэтому цифровой двойник — это отличный инструмент прогнозирования, ядро любой предсказательной системы. Кроме того, AR- и VR-технологии позволяют обучать сотрудников в условиях, максимально приближенных к реальным, и организовать экспертную поддержку, даже если сотрудник столкнулся с проблемой на удалённом участке.

Робототехника и беспилотные наземные, морские и воздушные транспортные средства (БПЛА) могут использоваться для мониторинга и картографирования ландшафтов.

Дроны и роботизированные системы планируется применять для замещения ручного труда при мониторинге и обслуживании производственных активов электроэнергетики (особенно в условиях, связанных с высоким риском). Машинное зрение упрощает распознавание оборудования и неисправностей, особенно в сложных условиях, в частности, при плохой видимости.

Гиперавтоматизация — это бизнес-ориентированный, последовательный подход, который организации используют для быстрого выделения, оценки и автоматизации как можно большего количества бизнес- и ИТ-процессов. Гиперавтоматизация — следующий шаг, в ходе которого автоматизируются уже не отдельные действия и задачи, а процессы, объединяющие несколько задач, а также группы процессов и целые экосистемы, что позволяет более эффективно поддерживать и ускорять процессы принятия решений.

Гиперавтоматизация продвигает робототехнику, в частности роботизированную автоматизацию процессов (RPA), на один шаг вперёд. Термин RPA был введён исследовательской компанией Gartner. RPA хорошо справляется с автоматизацией предопределённых шагов, в которых правила определяют, где могут быть расположены соответствующие данные на каждом типе предопределённых устройств, приложений и других источников. На данном этапе развития гиперавтоматизации масштабно используется роботизация процессов (RPA), искусственный интеллект (AI), интеллектуальное управление бизнес-процессами (iBPM). Данный подход предоставляет множество преимуществ как всему предприятию, так и отдельному сотруднику — от повышения уровня стабильности и промышленной безопасности до роста производительности труда [17].

Общая информационная модель (СИМ). Для эффективного управления существующими энергосистемами в реальном режиме времени, планирования развития энергосистем и межсистемных связей,

обеспечения и совершенствования работы рынков электроэнергии и мощности и использования перечисленных выше цифровых технологий необходим беспрепятственный и эффективный обмен информацией между всеми субъектами электроэнергетики. СИМ — это стандартизованная модель информационного взаимодействия предприятий электроэнергетики, предоставляющая возможность эффективной интеграции разнородных автоматизированных систем и обеспечивающая унифицированный способ управления энергообъектами вне зависимости от их назначения и производителя оборудования.

СИМ первоначально разработана Исследовательским институтом электроэнергетики (EPRI) [18] как набор открытых стандартов для представления компонентов энергосистемы. Разработка была начата как часть проекта создания интерфейса прикладного программирования центра управления в EPRI с целью дать общее определение компонентов в энергосистемах для использования в интерфейсе прикладного программирования системы управления энергопотреблением (EMS).

С 1996 г. работы по созданию информационной модели включены в перечень работ 57-го Технического комитета МЭК. В настоящее время в этом направлении работает несколько международных рабочих групп, отвечающих за интеграционные документы в части:

- управления системами распределения электроэнергии — DMS (IEC 61968);
- производства и передачи электроэнергии — EMS (IEC 61970);
- рыночных систем — Market Operations (IEC 62325).

Этот формат был принят поставщиками EMS, чтобы обеспечить обмен данными между их приложениями, независимо от их внутренней архитектуры программного обеспечения или операционной платформы. IEC 61968–11 расширяет эту модель, чтобы охватить другие аспекты обмена данными программного обеспечения энергосистемы, такие как отслеживание активов, планирование работы и выставление счетов клиентам. Затем СИМ для рынков электроэнергии расширила обе эти модели с помощью IEC 62325–301 для охвата данных, которыми обмениваются участники рынка электроэнергии. Эти три стандарта — 61970–301, 61968–11 и 62325–301 — вместе известны как СИМ для энергосистем и в настоящее время имеют три основных применения: облегчение обмена сетевыми данными энергосистемы между организациями, обеспечение обмена данными между приложениями внутри организации, а также обмен рыночными данными между субъектами рынка.

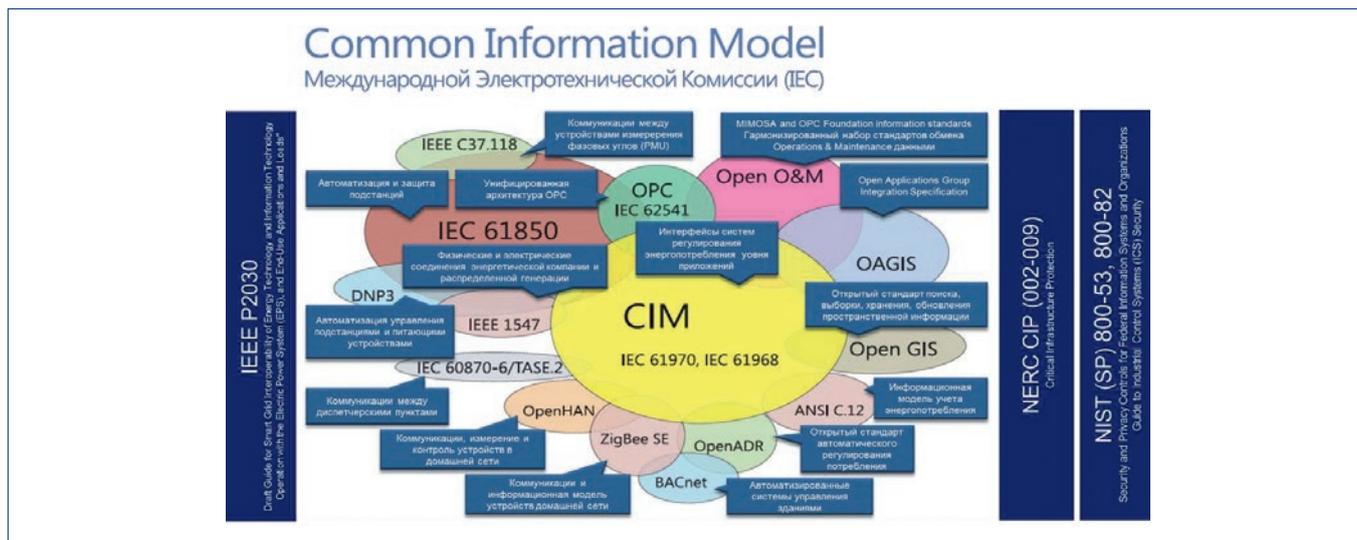


Рис. 4. Гармонизация стандартов информационного обмена в интеллектуальной энергетической экосистеме

В основу эталонной архитектуры положены уже разработанные и признанные во всём мире стандарты информационного взаимодействия. Это и стандарты Международной электротехнической комиссии (IEC/МЭК), и другие стандарты, предназначенные для специфических областей обмена информацией — таких как ZigBee (Коммуникации и информационная модель устройств домашней сети), BACnet (Автоматизированные системы управления зданиями), OpenADR (Открытый стандарт автоматического регулирования потребления) и др.

На рис. 4 показано, что центральным компонентом гармонизации стандартов и обеспечения информационного взаимодействия между информационными системами разных технологических уровней и назна-

чения признаны стандарты IEC 61970, 61968 (CIM — Common Information Model).

Комплексное применение онтологии этих стандартов для разработки и описания данных и интерфейсов межсистемного информационного обмена наряду с техническими инструментами передачи, обработки и хранения данных обеспечивает свободное управляемое перемещение данных через все уровни системы и интеграцию как между системами внутри одного предприятия или холдинга, так и между участниками всего энергетического рынка.

Архитектура интеграционной платформы (рис. 5) строится на основе интеграционной шины обмена данными, обеспечивающей синхронизацию общей информационной модели, обмен ретроспективными



Рис. 5. Архитектура интеграционной платформы

и оперативными аналоговыми и дискретными измерениями, а также регламентов взаимодействия между подсистемами АСДУ, корпоративными информационными системами.

Все подсистемы АСДУ должны обеспечить однозначную интерпретацию своих данных на основе СИМ-модели. Данные, участвующие в информационном взаимодействии между подсистемами АСДУ, также должны однозначно идентифицироваться и классифицироваться средствами СИМ-модели. Кроме этого, требуется обеспечить идентификацию и связь всех измерений в информационной модели измерений/сигналов АСДУ с элементами СИМ-модели энергосистемы.

ВЫВОДЫ

В ближайшие десятилетия цифровые технологии, перечисленные выше сделают энергетические системы более гибкими и адаптивными.

Цифровая трансформация уже существенно меняет свойства, возможности, а также принципы функционирования энергетических систем, но она также создает новые риски для безопасности и защиты данных.

Совершенствование управления энергосистемами государств — участников СНГ и внедрение цифровых технологий невозможны без научно-технического сотрудничества представителей системообразующих компаний и академического сообщества стран Содружества.

Задачами сотрудничества в этой области, в частности в рамках Рабочей группы «Цифровая трансформация электроэнергетики» Электроэнергетического Совета СНГ являются:

- формирование гармонизированной терминологической базы;
- формирование единых подходов к управлению цифровой трансформацией электроэнергетики;
- формирование механизмов научно-технического обмена и обмена лучшими практиками в области цифровой трансформацией электроэнергетики, в том числе среди молодых специалистов.
- общей современной цифровой образовательной среды, как области обучения и сферы научных коммуникаций в области цифровизации электроэнергетики.

(Окончание в следующем номере)

ЛИТЕРАТУРА

1. *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations. OECD/IEA, 2017.*
2. *Transactive Energy Systems Research, Development and Deployment Roadmap. GridWise Architecture Council. December, 2018.*
3. <https://cyberleninka.ru/article/n/infrastrukturnye-nakopiteli-v-energetike/viewer>
4. *Status of Power System Transformation. System integration and local grids. IEA, 2017.*
5. <https://www.researchgate.net/publication/304246432> *The Prosumers and the Grid*
6. *Электроэнергетика России. История и перспективы развития / под общей ред. А. Ф. Дьякова. — М.: АО «Информэнерго», 1997.*
7. *Материалы юбилейной сессии учёного совета, посвящённые 40-й годовщине Великой Октябрьской Социалистической Революции и 25-летию Энергетического института АН СССР. — М., 1958. 125 с.*
8. <https://research.aimultiple.com/digital-transformation-in-energy-industry/>
9. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b1e6600c-4e40-4d9c-809d-1d1724c763d5/DigitalizationandEnergy3.pdf>
10. *Волкова И.О., Бурда Е.Д., Гаврикова Е.В., Суслов К.В., Косыгина А.В., Горгишели М.В. Трансформация электроэнергетики: тренды, модели, механизмы и практики управления: монография. — Иркутск, 2020. — 354 с.*
11. *Стратегия цифровой трансформации электроэнергетики России до 2030 года / Ассоциация «Цифровая энергетика». 2020. URL: <https://www.digital-energy.ru/activity/materials/strategy-for-digital-transformation-electric-power-industry/>*
12. <http://elektrik.info/main/news/1798-iskusstvennyy-intellekt-v-elektroenergetike.html>
13. <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/blockchain>
14. <https://pravo.ru/story/205151/>
15. *International Renewable Energy Agency (IRENA). «Blockchain Innovation Landscape Brief», 2019.*
16. *Старкова Г.С. Комплекс экономико-математических моделей прогнозирования потребления электроэнергии в регионах РФ и его инструментальная реализация. Дис. канд. экон. наук: 08.00.13 / Пермский государственный национальный исследовательский институт, 2014.*
17. <https://www.it-world.ru/cionews/business/175432.html>
18. <https://www.epri.com/>