

УДК 004.8: 620.9

СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА (ИИ) И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ И СИСТЕМ ИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Массель Людмила Васильевна

д.т.н., профессор, гл. н. с.,

зав. отделом «Системы искусственного интеллекта в энергетике»,

e-mail: massel@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им Л.А. Мелентьева СО РАН

664033 Иркутск, Лермонтова, 130.

Аннотация. В статье анализируется ряд публикаций на эту тему, а также обобщаются результаты дискуссий на конференции «Знания, онтологии, теории» (Новосибирск, 8-12 ноября 2021 г.) и Круглом столе в ИСЭМ СО РАН «Искусственный интеллект в энергетике» (22 декабря 2021 г.). Рассматриваются понятия: сильный и слабый ИИ, объяснимый ИИ, доверенный ИИ. Анализируются причины «бума» вокруг машинного обучения и его недостатки. Сравниваются облачные технологии и технологии граничных вычислений. Определяется понятие «умный» цифровой двойник, интегрирующий математические, информационные, онтологические модели и технологии ИИ. Рассматриваются этические риски ИИ и перспективы применения методов и технологий ИИ в энергетике.

Ключевые слова: Искусственный интеллект (ИИ); энергетика; сильный, слабый, объяснимый, доверенный ИИ; граничные вычисления; этика ИИ.

Цитирование: Массель Л.В. Современный этап развития искусственного интеллекта (ИИ) и применение методов и систем ИИ в энергетике. 2021. № 4 (24). С. 5-20. DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.001.

Введение. Актуальность и повышенный интерес к применению методов искусственного интеллекта в энергетике обусловлены как основными трендами развития энергетики (интеллектуальная энергетика, цифровая энергетика, «умные» цифровые двойники и др.), так и повышенным интересом к применению систем искусственного интеллекта, который в нашей стране в существенной мере был инициирован принятием «Национальной стратегии развития искусственного интеллекта до 2030 г.». В связи с тем, что на уровне СМИ и популярных изданий не проводится различия между научным направлением «Искусственный интеллект» и продуктами ИИ, область применения которых повсеместно расширяется, звучат клише «Искусственный интеллект решит», «Искусственный интеллект обеспечит» и т.п. В статье делается попытка проанализировать сложившуюся ситуацию, в первую очередь применительно к энергетике, на основе профессионального опыта автора и результатов участия в ряде научных конференций, на которых обсуждаются вопросы развития и применения методов и систем искусственного интеллекта. При этом необходимо затронуть вопросы цифровизации и интеллектуализации энергетики, которые во многом повлияли на возросший интерес к такой теме, как «Искусственный интеллект». В первую очередь он определяется необходимостью решения проблем управления развитием и функционированием интеллектуальных интегрированных энергетических систем в условиях цифровой трансформации, поэтому сначала определимся с основными терминами. Далее в статье будут рассмотрены популярные в последнее время термины: сильный и слабый ИИ, объяснимый ИИ, доверенный ИИ, проанализированы причины «бума» вокруг машинного обучения и причины необходимости появления объяснимого ИИ. Рассматриваются методы и технологии ИИ, применяемые и перспективные для применения в энергетике.

I. Основные понятия и определения. (1) Цифровая трансформация. Одно из первых значений термина «цифровая трансформация» – это переход от аналоговых данных к цифровым, то, что сегодня принято называть цифровизацией.

Выделяют три точки зрения на цифровизацию или цифровую трансформацию:

- 1) со времен зарождения цифровых технологий люди пытались использовать их для автоматизации бизнеса, то есть цифровая трансформация – это процесс, который длится десятилетия, и каждая новая технология добавляет ему новые стадии;
- 2) цифровую трансформацию следует связывать с определенным периодом развития информационных и коммуникационных технологий (ИКТ), и переломным моментом является появление так называемой третьей платформы («облака», мобильность, социальные технологии, «большие данные» и др.), на основании которой стали появляться цифровые компании, предложившие новую бизнес-модель с использованием перечисленных технологий и максимальным уходом от нецифровых активов;
- 3) делается акцент на бизнес-аспектах явления и утверждается, что цифровая трансформация актуальна для любой компании, занятой как цифровым бизнесом, так и реальным производством [1].

(2) Автоматизация, информатизация, цифровизация. Часто, говоря о цифровой трансформации, путают или смешивают эти термины. В [2] излагается следующий подход к цифровой трансформации, где разделяются эти термины.

«Цифровая трансформация» является процессом преобразований в русле цифровой экономики, включающим следующие этапы:

- **автоматизация** – применение технических и математических средств с целью передачи функций контроля и управления производственным процессом от человека к машине, как правило, характеризуется повышением скорости, точности и надежности производственных процессов, по сравнению с обычным неавтоматизированным производством;
- **информатизация** – применение кибернетических методов и средств управления процессами, а также ИКТ для обеспечения связей между разрозненными в пространстве производственными процессами и массивами данных. В соответствии с Федеральным законом от 20.02.1995 г. N 24-ФЗ (ред. от 10.01.2003 г.) «Об информации, информатизации и защите информации», информатизация представляет собой организационный социально-экономический и научно-технический процесс создания оптимальных условий для удовлетворения информационных потребностей и реализации прав граждан, органов государственной власти, органов местного самоуправления, организаций, общественных объединений на основе формирования и использования информационных ресурсов. Процесс информатизации в зарубежной практике, как правило, не выделяется в отдельный этап технологических преобразований и относится к одной из составляющих цифровизации;
- **цифровизация** – замена физических (аналоговых, бумажных и др.) систем сбора, обработки, хранения и передачи данных цифровыми, а также улучшение управляемости за счет цифровых решений. В том числе подразумевает под собой применение цифровых технологий в рамках уже существующих производственных процессов, создание «цифровых двойников» и математических моделей отдельных процессов производства;

Таким образом, цифровая трансформация – комплекс преобразований организации или всей отрасли, включая изменение бизнес-моделей на основе новых цифровых технологических возможностей и включающая, как правило, перечисленные выше этапы.

На корпоративном уровне цифровая трансформация предполагает не только цифровизацию отдельных производственных процессов внутри компании (отрасли), но и изменение организационных принципов ее работы, а также совершенствование бизнес-культуры с использованием цифровых инструментов.

На отраслевом уровне цифровая трансформация также предполагает не только изменение традиционных производственных комплексов и систем управления ими, но и эволюцию рыночной среды, конечной целью которой является реализация клиенто-ориентированной модели энергоснабжения, адаптация к индивидуальным запросам потребителя без существенного увеличения стоимости поставляемой энергетической продукции или услуг.

По мере эволюции технологий к процессам автоматизации добавились элементы информатизации и цифровизации. Фактически все эти составляющие стали неотъемлемой основой для осуществления цифровой трансформации как на уровне отдельных компаний, так и на уровне всей отрасли. Триггером цифровой трансформации стали технологические прорывы в неэнергетической сфере – в системах связи, передачи и обработки данных, IT-индустрии, позволившие существенно ускорить и повысить эффективность автоматизации и информатизации производственных и организационных процессов в отраслях топливно-энергетического комплекса (ТЭК), начать их цифровизацию, одновременно создавая условия для более широкого освоения новых энергетических технологий в производстве/добыче, транспорте, преобразовании и потреблении энергоресурсов [2].

В [3] рассматриваются следующие 5 отличий автоматизации и цифровизации.

Степень интеграции процессов и данных. Цифровизация предполагает наличие единого информационного пространства для непрерывного обмена данными между различными сферами деятельности и структурными подразделениями. Автоматизация направлена на перевод текущих процессов в электронную форму и замену ручного труда роботизированными устройствами.

Виртуализация основного объекта производства. Цифровизация включает создание электронного (цифрового) двойника главного производственного объекта. Автоматизация процессов проектирования означает моделирование объекта в специальных расчетных программах. Как правило, автоматизированные расчеты и проектирование являются частью цифровой модели изделия.

Характер управления данными. Цифровизация предполагает непрерывное управление данными об объектах, на протяжении всего их жизненного цикла, включая автоматический сбор, накопление, изменение и анализ информации, а также генерацию подобных данных. Автоматизация, как правило, направлена на решение рутинных задач одного или смежных бизнес-процессов, например, торговый и складской учет, электронный документооборот и пр., не рассматривая дальнейшее использование данных за границами этих процессов.

Порядок управления производством. Цифровизация делает возможным опережающее управление. Прогнозы будущих ситуаций, в том числе нетривиальных, и оптимальные отклики на них рассчитываются за счет инструментов предиктивной аналитики. Автоматизация же ориентирована на обработку типовых случаев и учетные операции постфактум.

Гибкость корпоративной культуры. Цифровизация обеспечивает оперативное взаимодействие географически распределенных сотрудников через интернет. При этом эффективность бизнес-процессов оценивается по достигнутому результату, а не времени, затраченного на работу, как в традиционном подходе. Автоматизация предполагает перевод существующих бизнес-моделей в электронную форму, как правило, без учета методологии

гибких изменений (Agile). Таким образом, автоматизация – это неотъемлемая часть цифровизации, но не синоним этого термина.

В последнее время цифровую трансформацию понимают более широко – как переход к цифровому обществу, при этом выделяют следующие направления цифровой трансформации:

- формирование нового варианта экономических отношений (цифровая экономика),
- построение нового уровня отношений между обществом и государством (цифровое правительство),
- создание высокотехнологичной инфраструктуры (цифровое пространство).

Статья посвящена работам, выполняемым в третьем направлении.

(3) Интеллектуальные интегрированные энергетические системы (ИЭС)

Определения интеллектуальных интегрированных энергетических систем введены и используются в [4-8]. В них отмечается, что энергетика является, по сути, инфраструктурной отраслью, задача которой – обеспечение энергоснабжения потребителей с требуемой надежностью и приемлемым качеством энергоносителя (основное требование энергетической безопасности). Инфраструктурная роль особенно присуща электроэнергетическим, газо- и теплоснабжающим системам, имеющим развитую транспортно-распределительную сетевую инфраструктуру. Эти энергетические системы обычно подразделяются на производственно-транспортные и системы энергоснабжения. Производственно-транспортные энергетические системы обладают определенной интеграцией в плане использования энергоносителя одной системы в другой (например, газ как топливо на электростанциях и котельных, электроэнергия на газоперекачивающих агрегатах и др.), указанная интеграция определяет ведущую роль рассматриваемых энергетических систем в ТЭК.

До последнего времени интеграция систем электро-, тепло- и газоснабжения рассматривалась на уровне источников электроэнергии и тепла – ТЭЦ; после появления альтернативных возможностей для потребителей в активном выборе приборов использования энергии было введено, как обобщение этих возможностей, понятие энергетического хаба [4, 5]. Отмечается, что такая централизация требует реализации новых принципов построения ИЭС и создания интеллектуальных систем управления ими с развитым информационно-коммуникационным обеспечением. Таким образом, возрастает роль систем искусственного интеллекта и их адаптации к новым задачам. В работе [6] энергетика представлена как инфраструктурная «система систем», включающая системы газо-, тепло-, электроснабжения, а также снабжения нефтепродуктами, при этом отмечается ключевая роль информационно-коммуникационной системы, как инфраструктурной основы «системы систем».

В [9] дается определение интеллектуальной электроэнергетической системы. Отмечается, что, с учетом обобщения мировой терминологической практики, под интеллектуальной энергосистемой понимается новое поколение систем энергообеспечения потребителей, представляющее собой синтез электроэнергетической и информационной систем и обладающее новыми функциональными возможностями («степенями свободы») для организации технических и экономических взаимодействий за счет:

- минимальных ограничений для интеграции через общую электрическую сеть и общий электрический режим любых типов объектов производства, накопления и потребления электроэнергии, использования доступных источников энергии на основе сочетания централизованной и распределенной генерации;
- высокой оперативности и гибкости (адаптивности) функционирования и развития в условиях высокой волатильности режимов, технологической и пространственной

структуры производства и потребления электроэнергии, под влиянием технологических и экономических (рыночных) факторов;

- клиенто-ориентированности, приоритетности индивидуальных требований потребителей по эффективности, надежности и качеству энергоснабжения, их интересов и стратегий поведения при максимальной вовлеченности потребителей в формирование эластичного рыночного спроса на электроэнергию и системные услуги, поддержание резервов и режима работы энергосистемы, механизмы ценообразования для услуг сетевой инфраструктуры.

Исторически в энергетических исследованиях первым рассматривалось понятие интеллектуальной энергетики, в первую очередь, понятие интеллектуальных электроэнергетических систем (Smart Grid) (например, [10]). После утверждения и развития концепций цифровой экономики и цифровой энергетики понятия цифровой и интеллектуальной энергетики, как правило, считаются синонимами, хотя, по идее, цифровая энергетика должна быть фундаментом интеллектуальной энергетики [11].

II. Анализ методов искусственного интеллекта, применяемых и перспективных для применения в энергетике. С началом цифровой трансформации энергетики отмечалось, что на разных этапах производства, транспортировки и потребления энергии с целью уменьшения издержек и снижения штрафных санкций за недопоставку энергии могут быть использованы такие современные информационные технологии, как:

1. Индустриальный Интернет (Интернет вещей в промышленности) для телеизмерений параметров энергосистемы.
2. Технологии анализа больших данных (BigData) с целью прогнозирования поведения энергосистемы.
3. BIM (Building Information Model) – технологии для объектов энергетики (электростанций, подстанций, объектов добычи и переработки и др.).
4. ГИС-технологии для объектов энергетики, связанных с транспортировкой топливно-энергетических ресурсов (линии электропередач, трубопроводная сеть и др.).
5. Технология дистанционного зондирования Земли для наблюдения за природными и техногенными факторами.
6. Спутниковые навигационные системы для контроля дискретного транспорта совместно с ГИС-технологиями.

Кроме того, с целью унификации и упрощения обмена данными предлагалось применение онтологической модели деятельности предприятия (Business Entity Ontological Model – БЕОМ). Применение БЕОМ в рамках отрасли в целом позволяет создать целостную динамически эволюционирующую модель, структурирующую и описывающую деятельность по задачам, организационным структурам, территориям и объектам, что позволит организовывать и транслировать накопленный в конкретных ситуациях опыт.

В программе «Цифровая экономика» основными сквозными цифровыми технологиями, которые упоминаются в Программе, были объявлены:

- большие данные;
- нейротехнологии и искусственный интеллект;
- системы распределенного реестра;
- квантовые технологии;
- новые производственные технологии;
- промышленный интернет;
- компоненты робототехники и сенсорики;
- технологии беспроводной связи;

- технологии виртуальной и дополненной реальностей.

В этом перечне недоумение у ИТ-специалистов вызывало выделение нейротехнологий из искусственного интеллекта. Некоторые положения «Национальной стратегии развития искусственного интеллекта в РФ на период до 2030 г.», появившейся в 2019 г., усугубили это недоумение. В частности, в п. 6 было сказано: «Развитие информационных систем, помогающих человеку принимать решения, началось с появления в 1950-х годах **экспертных систем**, описывающих алгоритм действий по выбору решения в зависимости от конкретных условий. На смену экспертным системам пришло **машинное обучение**, благодаря которому информационные системы самостоятельно формируют правила и находят решение на основе анализа зависимостей, используя исходные наборы данных (без предварительного составления человеком перечня возможных решений), что позволяет говорить **о появлении искусственного интеллекта**».

Подробное описание направлений ИИ приведено в [12], краткая история ИИ хорошо представлена в эссе [13], где говорится: «Искусственный интеллект (ИИ) – это отрасль науки, официально увидевшая свет в 1956 году на летнем семинаре в Дартмут-колледже (Хановер, США), который организовали четверо американских ученых: Джон МакКарти, Марвин Мински, Натаниэль Рочестер и Клод Шеннон. С тех пор термин «искусственный интеллект», придуманный, вероятно всего, с целью привлечения всеобщего внимания, стал настолько популярен, что сегодня вряд ли можно встретить человека, который никогда его не слышал. С течением времени этот раздел информатики развивался все больше, а интеллектуальные технологии в последние шестьдесят лет сыграли важную роль в изменении облика мира». Очень интересно в плане понимания современного состояния и проблем искусственного интеллекта интервью (две беседы) одного из ведущих ученых в области ИИ В.К. Финна «Чертова дюжина искусственного интеллекта» [14].

Перейдем сразу к современному этапу развития ИИ. Действительно, с 2010 года мощность компьютеров позволяет сочетать так называемые большие данные (Big Data) с методами глубокого обучения (Deep Learning), которые основываются на использовании искусственных нейронных сетей. Весьма успешное применение во многих областях (распознавание речи и изображений, понимание естественного языка, беспилотный автомобиль и т.д.) вызвало некоторый «бум», связанный с применением ИНС [15].

Машинное обучение (Machine Learning, ML) – класс методов искусственного интеллекта, характерной чертой которых является не прямое решение задачи, а обучение в процессе применения решений множества сходных задач. Для построения таких методов используются средства математической статистики, численных методов, методов оптимизации, теории вероятностей, теории графов, различные техники работы с данными в цифровой форме.

Одна из проблем машинного обучения – как ограничить объем данных, требующихся для обучения нейросетей? Как правило, модели машинного обучения работают с огромными массивами данных, чтобы гарантировать точность работы нейросети, однако во многих отраслях крупных баз данных просто не существует.

С другой стороны, неверно отождествлять весь когнитивный компьютеринг (Cognitive Computing, CC) исключительно с ML. Собственно CC – это составляющая ИИ, целостная экосистема, частью которой служит ML. К тому же CC включает в себя и автоматическое принятие решений, и распознавание аудио и видео данных, машинное зрение, обработку текстов на естественных языках и еще многое другое [16]. Например, в электроэнергетике уже достаточно широко используются искусственные нейронные сети (ИНС). По информации [17], ИНС используются при решении следующих задач: для прогнозирования нагрузки (25%), оценки динамической устойчивости (14%), контроля и идентификации (9%),

диагностики аварий (18%), планирования (7%), оценки надежности (17%), предупреждения аварий (10%).

На конференции ЗОНТ-21 обсуждалось (В.В. Грибова), что в настоящее время целесообразно выделять два направления развития ИИ: 1) связанное с обработкой данных (извлечение знаний из данных) – интеллектуальный анализ данных, машинное обучение; 2) семантическое представление знаний – семантические технологии, экспертные системы.

В последнее время осознается, что методы машинного обучения – по сути дела, черный ящик, они выдают результат, но не объясняют, как он был получен, что снижает доверие и к результату, и к инструменту. Это привело к появлению направления, получившего название *Объяснимый искусственный интеллект (XAI - Explainable AI)* – набор процессов и методов, позволяющих пользователям понять, почему именно алгоритмы машинного обучения пришли к тем или иным результатам или выводам. Объяснимый ИИ применяется для описания модели ИИ, ее ожидаемого влияния и потенциальной предвзятости. Он помогает охарактеризовать точность, достоверность и прозрачность модели, предназначенной для принятия решений с помощью ИИ. Объяснимый ИИ играет важнейшую роль для повышения достоверности и надежности производственных моделей ИИ. Кроме того, объяснимость ИИ помогает организациям с большей ответственностью подходить к разработке ИИ. Авторы [18,19] предлагают объединить технологии ИНС и экспертных систем, что можно считать одним из направлений объяснимого ИИ.

Следует отметить, что, начиная с 1970-х гг., ученые заинтересовались психологией памяти, механизмами понимания, которые они пытались имитировать на компьютере, и ролью знаний в мыслительном процессе. Это привело к появлению значительно развившихся в середине 1970-х годов методов семантического представления знаний, а также к массовой разработке экспертных систем, названных так потому, что для воспроизведения мыслительных процессов в них использовались знания квалифицированных специалистов. В начале 1980-х годов на экспертные системы возлагались большие надежды в связи с широкими возможностями их применения, например, для медицинской диагностики.

После появления в 1990-х гг. одного из направлений семантического представления знаний – онтологий, стали активно развиваться семантические технологии [19]. Автором было предложено расширить спектр семантических технологий [20], включив в их число когнитивные, событийные и вероятностные (на основе Байесовских сетей доверия) технологии; результаты их применения при построении интеллектуальных систем поддержки принятия решений были обобщены в [21].

Одним из современных направлений ИИ являются «граничные вычисления». Считается, что *граничные вычисления «Edge Computing»* – одна из важных технологических тенденций, которая, по мнению института Gartner, будет доминировать на рынке Интернета вещей (Internet of Things, IoT) в этом году. С ростом популярности интеллектуальных устройств, подключенных к сети, а также развитием IoT, различные отрасли, включая производство, торговлю и автотранспорт, начинают генерировать огромные объемы данных, целевым местом хранения которых являются серверы в «Облаке» [22]. Вопросы применения облачных вычислений в энергетике рассматривались, с участием автора, в [23].

Концепция граничной аналитики «Edge Analytics» основана на сборе, обработке и анализе данных на периферийных устройствах сети, рядом с датчиками, сетевым коммутаторами или другими подключенными устройствами, т.е. рядом с источником информации и исполняемыми элементами, например, на производстве [24]. «Граничные вычисления стимулируют рост четвертой промышленной революции благодаря развитию технологий в облачных системах, программном обеспечении, вычислениях, коммуникациях, современных системах хранения и памяти. Сам термин «Edge Computing» означает, что часть

обработки данных происходит на конечных элементах сети, в том месте, где в системах IoT физические объекты связываются с Интернетом. Граничные вычисления дают возможность анализировать ключевые данные в режиме реального времени «на месте», не отправляя их на центральный сервер. Однако граничные вычисления Edge Computing – это гораздо больше, чем просто расчет и обработка данных на местах. Предполагается, что эта технология обеспечит плавную интеграцию периферийных устройств и облачных вычислений, а также двусторонний обмен информацией». В [25] рассматриваются вопросы применения технологии граничной аналитики (Edge Analytics) при создании цифровых двойников энергетических объектов (на примере цифровой подстанции).

Цифровые двойники (ЦД, Digital Twin) – один из современных трендов цифровизации [26], получивший уже достаточно широкое распространение в энергетике [27-29]. В настоящее время под «Цифровым двойником» понимают реальное отображение всех компонентов в жизненном цикле объекта с использованием физических данных, виртуальных данных и данных о взаимодействии между ними [30]. Цифровой двойник объединяет в себе информацию о показателях функционирования объекта, его детальную математическую модель, параметры которой уточняются с помощью реальных данных, получаемых от объекта в режиме on-line [31]. Под руководством автора развивается онтологический подход к построению цифровых двойников в энергетике [29, 32], который отчасти основывается на обобщении подхода, предложенного к построению цифровых двойников в [33, 34]. Коллектив, возглавляемый автором, имеет опыт реализации ЦД энергетического объекта – солнечной электростанции [35]. При разработке ЦД систем энергетики будет необходимо переходить к агрегированным ЦД, а для построения ЦД топливно-энергетического комплекса потребуется интеграция ЦД и когнитивных технологий. Авторский коллектив предлагает использовать термин интеллектуальный или «умный» ЦД (Smart Digital Twin), под которым следует понимать интеграцию технологий ИИ и пяти компонентов ЦД, включающих: ядро цифрового двойника – математические, имитационные и информационные модели; компоненты, обеспечивающие сбор данных с физического объекта; хранилища собираемых данных; сервисные элементы, который предоставляют услуги и интерфейс клиентам и компоненты, обеспечивающие коммуникации между названными элементами (платформа Internet of Things).

III. Перспективы развития и этика искусственного интеллекта.

Слабый и сильный ИИ – это еще один термин, на котором следует остановиться. В Национальной стратегии развития ИИ приводится следующее определение: «Перспективные методы искусственного интеллекта – методы, направленные на создание принципиально новой научно-технической продукции, в том числе в целях разработки универсального (**сильного**) искусственного интеллекта (автономное решение различных задач, автоматический дизайн физических объектов, автоматическое машинное обучение, алгоритмы решения задач на основе данных с частичной разметкой и (или) незначительных объемов данных, обработка информации на основе новых типов вычислительных систем, интерпретируемая обработка данных и другие методы)».

26 октября 2021 г. при поддержке правительства РФ в пресс-центре ТАСС в Москве проходил форум «Этика искусственного интеллекта: начало доверия», на котором Кирилл Каем, старший вице-президент по инновациям фонда «Сколково» высказал мнение, что разработка «сильного» искусственного интеллекта, обладающего сознанием, потребует еще не менее 15 лет [36]¹. «Сильным» ИИ (Artificial General Intelligence, AGI, или strong AI)

¹ Здесь хочется напомнить, что в 1958 году американец Герберт Саймон, позже ставший лауреатом Нобелевской премии по экономике, заявил, что если бы машины допускались к международным

эксперты называют искусственный интеллект общего уровня, который способен мыслить и действовать. В русском языке используется также термин «общий» искусственный интеллект – синоним английского AGI – это гипотетическая разновидность ИИ, полностью аналогичная человеческому разуму и обладающая самосознанием, способным решать проблемы, учиться и планировать будущее.

При этом уже сегодня в различных отраслях используются системы на основе технологий «слабого» ИИ (narrow AI, NAI), которые за счет математических алгоритмов, к примеру, помогают повысить эффективность анализа больших объемов данных.

К. Каем считает, что следующие пятнадцать лет, в первую очередь, речь будет идти о «слабом» искусственном интеллекте и прикладных решениях или «узком» ИИ. Это означает, что в следующие 10-15 лет мы будем иметь в руках решения, которые еще не обладают сознанием, в отличие от общего или «сильного» ИИ. Говоря о том, какие этические аспекты ИИ должны рассматриваться экспертным сообществом в первую очередь, он указал на вопросы «робоэтики» – тех технологических параметров, которые авторы закладывают в свои решения на стадии разработки. При этом, в силу роста рынка технологий ИИ, представитель «Сколково» считает важной разработку новых инструментов оценки решений в этой области.

В связи с этим следует отметить появление **«доверенного искусственного интеллекта»** – одной из ведущих концепций в области этичного ИИ. Термин «доверенный» используется в ряде международных и российских документов. Понятие доверенного (англ. trustworthy, буквально «заслуживающий доверия, достойный доверия») искусственного интеллекта зафиксировано в «Руководстве по этике для надежного ИИ» Группы экспертов высокого уровня по искусственному интеллекту Еврокомиссии (Ethics Guidelines for Trustworthy AI, 2019). Согласно этому документу, доверенный ИИ должен обладать следующими базовыми характеристиками: законный – соответствующий применимому законодательству; этичный – соответствующий этическим принципам и ценностям; робастный – надёжный с технической точки зрения и разработанный с учетом актуального социального контекста. В России понятие доверенного ИИ с марта 2021 года отражено в стандарте ГОСТ Р 59 276–2020 «Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения».

На упомянутом выше Международном форуме «Этика искусственного интеллекта: начало доверия» в число обсуждаемых тем вошли этические принципы разработки и применения ИИ, государственные меры поддержки в этой сфере, механизмы внедрения технологий в приоритетных отраслях, а также мировые практики регулирования и стандарты международного взаимодействия.

Этические риски ИИ рассматриваются, например, в [13]. Выделяются риски трех видов: дефицит работы, которая вместо людей будет выполняться машинами; последствия для независимости человека и, в частности, для его свободы и безопасности; опасения, что более «умные» машины будут доминировать над людьми и станут причиной гибели человечества. Там же отмечается, что «при ближайшем рассмотрении становится очевидно, что работа для людей не пропадает, а трансформируется, требуя новых навыков. Точно так же независимость человеческой личности и ее свобода не подвергаются неминуемой опасности из-за развития ИИ – при условии, однако, что мы останемся бдительными перед лицом вторжения технологий в частную жизнь. И, наконец, в противоположность некоторым утверждениям, машины не несут в себе экзистенциального риска для человечества,

соревнованиям, то в ближайшие десять лет они стали бы чемпионами мира по шахматам (но впервые компьютер победил гроссмейстера Гарри Каспарова только в 1997 г.).

поскольку их автономия носит лишь технический характер и в этом смысле не соответствует цепочкам материальной причинности, идущим от информации к принятию решений. Кроме того, машины не самостоятельны в моральном плане, и потому, даже если иногда они сбивают нас с толку и вводят в заблуждение своими действиями, они все же не обладают собственной волей и подчиняются тем целям, которые мы перед ними ставим».

Следует упомянуть, что ключевым событием упомянутого выше форума стало подписание Кодекса этики искусственного интеллекта, разработанного с учетом требований Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 года. Он должен стать частью федерального проекта «Искусственный интеллект» и Стратегии развития информационного общества на 2017-2030 гг. Авторы кодекса – Альянс в сфере искусственного интеллекта совместно с Аналитическим центром при Правительстве РФ и Минэкономразвития.

Заключение. В статье не ставилась задача дать полный обзор истории и направлений развития ИИ. В то же время хотелось обобщить имеющуюся информацию о современном этапе ИИ, «угрозах» сильного ИИ, новых терминах и технологиях, а также проанализировать возможности их применения в энергетике. Автор будет признателен тем, кто захочет прислать отклики на статью, которые могут послужить основой для дискуссий на организуемых под руководством автора Международном семинаре «Критические инфраструктуры в цифровом мире (Critical Infrastructures in Digital World)» (Сайт (рус): <http://imt.isem.irk.ru/iwci-2021/>, (eng): <http://imt.isem.irk.ru/iwci-2021-en/>) и Всероссийской с международным участием Байкальской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (сайт <http://imt.isem.irk.ru/>, регистрация на конференцию-2022: <https://conf.isem.irk.ru/>), либо прислать статьи в наш журнал для продолжения обсуждения этой темы (сайт журнала: <https://www.imt-journal.ru/>).

Благодарности. Результаты получены в рамках выполнения в рамках проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН № темы: FNEU-2021-007, рег. № АААА-17-117030310444, при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант №19-07-00351.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прохоров А., Коник Л. Цифровая трансформация. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: ООО «АльянсПринт».2019. 368 с. ISBN 978-5-98094-007-2.
2. Измерение и оценка результатов и эффектов цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса // Материалы Института энергетических исследований РАН (ИНЭИ РАН) по результатам НИР «Разработка научно обоснованных предложений по измерению и оценке результатов и эффектов цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса». Режим доступа: <https://in.minenergo.gov.ru/upload/iblock/29a/29a0484ea0e4bd272252a486a80f2c32.pdf> (дата обращения: 17.11.2021).
3. Пять отличий автоматизации от цифровизации. Режим доступа: <https://www.bigdataschool.ru/blog/> (дата обращения: 13.12.2021).
4. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия РАН. Энергетика. 2014. №1.С. 64-73.
5. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные энергетические системы. В кн.: Инновационная электроэнергетика-21 / Под ред. Батенина В.М., Бушуева В.В., Воропая Н.И. М.: ИЦ «Энергия». 2017. С. 181-193. ISBN 978-5-98908-457-9.
6. Бушуев В.В., Каменев А.С., Кобец Б.Б. Энергетика как инфраструктурная «система систем» // Энергетическая политика. 2012. Вып. 5. С. 3-14.

7. Воропай Н.И., Стенников В.А., Сендеров С.М., Барахтенко Е.А. и др. Интегрированные инфраструктурные энергетические системы регионального и межрегионального уровня // Энергетическая политика. 2015. Вып. 3. С. 24-32.
8. Воропай Н.И., Стенников В.А., Сендеров С.М. Интегрированные интеллектуальные системы в энергетике России. В кн.: Системные исследования в энергетике: методология и результаты / Под ред. А.А. Макарова и Н.И. Воропая. М.: ИНЭИ РАН. 2018. С. 87-101.
9. Веселов Ф.В., Дорофеев В.В. Интеллектуальная энергосистема России как новый этап развития электроэнергетики в условиях цифровой экономики // Энергетическая политика. 2018. Т. 43. № 5. С. 43-52.
10. Бердников Р.Н., Бушуев В.В., Воропай Н.И. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью. М.: ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». 2012. 235 с.
11. Воропай Н.И., Губко М.В., Ковалев С.П., Массель Л.В., Новиков Д.А., Райков А.Н., Сендеров С.М., Стенников В.А. Проблемы развития цифровой энергетики в России // Проблемы управления. №1. 2019. С. 2-14. DOI: <http://doi.org/10.25728/ru.2019.1.1>.
12. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд. Пер. с англ. М.: ООО «И. Д. Вильямс». 2016. 1408 с.
13. Искусственный интеллект: между мифом и реальностью. Режим доступа: <https://ru.unesco.org/courier/2018-3/iskusstvennyy-intellekt-mezhdu-mifom-i-realnostyu> (дата обращения: 14.12.2021).
14. Финн В.К. Чертова дюжина искусственного интеллекта. Режим доступа: <https://stimul.online/articles/science-and-technology/chertova-dyuzhina-idealnogo-intellekta-beseda-pervaya/> (дата обращения: 13.12. 2021).
15. Самая многообещающая технология. Чем вызвано всеобщее помешательство на машинном обучении? Режим доступа: [https://www.tadviser.ru/index.php_\(Machine_Learning\)](https://www.tadviser.ru/index.php_(Machine_Learning)) (дата обращения: 13.12. 2021).
16. Бушуев В.В. Интеллектуальное (когнитивное) прогнозирование и управление в энергетике // В кн.: Системные исследования в энергетике: методология и результаты / Под ред. А.А. Макарова и Н.И. Воропая. М.: ИНЭИ РАН. 2018. С. 102-112.
17. Любарский Ю.Я. Оперативный диспетчерский анализ нештатных ситуаций в электрических сетях промышленных предприятий – компьютерная поддержка на основе технологии экспертных систем // Промышленная энергетика. 2017. №9. С. 2- 6.
18. Хренников А.Ю., Любарский Ю.А. Использование элементов искусственного интеллекта: компьютерная поддержка оперативных решений в интеллектуальных энергетических сетях. М.: Литрес. 2021. 140 с.
19. Хорошевский В.Ф. Семантические технологии: ожидания и тренды // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2012). Материалы II Международной научно-технической конференции. БГУИР. Минск. 2012. С.143-158.
20. Массель Л.В. Применение онтологического, когнитивного и событийного моделирования для анализа развития и последствий чрезвычайных ситуаций в энергетике // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. №2. 2010. С. 34-43.
21. Массель Л.В., Массель А.Г. Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетики // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 5. Управление, вычислительная техника и информатика. С. 135-141.
22. Концепция граничных вычислений. Режим доступа: <https://2g3g4g5g.ru/mec-edge-computing-iot/> (дата обращения: 08.12. 2021).

23. Массель Л.В., Грибова В.В., Копайгородский А.Н. «Облачная» структура энергоинформационных систем. В кн.: Инновационная электроэнергетика-21 / Под ред. Батенина В.М., Бушуева В.В., Воропая Н.И. М.: ИЦ «Энергия». 2017. С. 556-577.
24. Курганова Н.В., Филин М.А., Черняев Д.С., Шаклеин А.Г., Намиот Д.Е. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // International Journal of Open Information Technologies. ISSN: 2307-8162. Т. 7. № 5. 2019. С. 105-115.
25. Колосок И.Н., Коркина Е.С. Применение технологии граничной аналитики (Edge Analytics) при создании цифровых двойников объектов ЕЭС России // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 27-38. DOI: 10.38028/ESI.2021.23.3.003.
26. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. / Научный редактор профессор Боровков А. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт». 2020. 401 с.
27. Стенников В.А. Цифровые двойники в энергетике / Доклад ассоциации «Глобальная энергия»: «10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет. 2021». С. 14-29. Режим доступа: <https://globalenergyprize.org/ru/> (дата обращения: 08.12. 2021).
28. Воропай Н.И., Массель Л.В., Колосок И.Н., Массель А.Г. ИТ-инфраструктура для построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов. Известия РАН. Энергетика. №1. 2021. С. 3-13. DOI: 10.31857/S0002331021010180.
29. Massel L., Massel A. Development of Digital Twins and Digital Shadows of Energy Objects and Systems Using Scientific Tools for Energy Research // ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management: proceedings. E3S Web of Conferences. 2020. Volume 209. DOI:10.1051/e3sconf/202020902019.
30. Steindl G, Stagl M, Kasper L, Kastner W, Hofmann R. Generic Digital Twin Architecture for Industrial Energy Systems // Applied Sciences. 2020. 10(24):8903. DOI: 10.3390/app10248903.
31. Lim K.Y.H., Zheng P., Chen C. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives // Journal of Intelligent Manufacturing. 2020. Vol. 31. 1313–1337. DOI: 10.1007/s10845-019-01512-w.
32. Массель Л.В., Ворожцова Т.Н. Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики // Онтология проектирования. 2020. Т.10. № 3 (37). С. 327-337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
33. Андриюшкевич С.К., Ковалев С.П., Нефедов Е. Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем // Цифровая подстанция. № 12. 2019. С. 38-43.
34. Ковалёв С.П. Проектирование информационного обеспечения цифровых двойников энергетических систем // Системы и средства информатики. Т. 30. № 1. 2020. С. 66-81.
35. Массель А.Г., Щукин Н.И., Цыбиков А.Р. Разработка ЦД солнечной электростанции с использованием технологии BigData // Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии - 2021» («ИС & ИТ-2021», «IS&IT'21»). Научное издание. Таганрог: Изд-во: Ступина С.А.. 2021. С. 598-605.
36. Сильный ИИ. Режим доступа: <https://nauka.tass.ru/nauka/12769989> (дата обращения: 8.12.2021)

UDC 004.8: 620.9

MODERN STAGE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI) DEVELOPMENT AND APPLICATION OF AI METHODS AND SYSTEMS IN POWER ENGINEERING

Liudmila V. Massel

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher,
Head of Department "Artificial Intelligence Systems in Energy",
e-mail: lvmassel@gmail.com

Melentiev Energy Systems Institute (MESI) of SB RAS
664033 Irkutsk, Lermontov st., 130.

Abstract. The article analyzes a number of publications on this topic, and also summarizes the results of discussions at the conference "Knowledge, Ontology, Theory" (Novosibirsk, November 8-12, 2021) and the Round Table at the ISEM SB RAS "Artificial Intelligence in Energy" (December 22 2021). The concepts are considered: artificial general intelligence (AGI), strong and narrow AI (NAI), explainable AI, trustworthy AI. The reasons for the "hype" around machine learning and its disadvantages are analyzed. Compares cloud and edge computing technologies. The concept of "smart" digital twin, which integrates mathematical, informational, ontological models and AI technologies, is defined. The ethical risks of AI and the prospects for the application of AI methods and technologies in the energy sector are considered.

Keywords: Artificial intelligence (AI); power engineering; general, strong, narrow, explainable, trustworthy AI; smart digital twin; edge computing.

Acknowledgments. The research is carried out within the framework of the project under the state order of the MESI SB RAS, topic № FNEU-2021-007, project № AAAA-17-117030310444, with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research, grant № 19-07-00351

REFERENCES

1. Prohorov A., Konik L. Cifrovaja transformacija. Analiz, trendy, mirovoj opyt. [Digital transformation. Analysis, trends, world experience.] M.: OOO "Al'jansPrint" = "AlliancePrint". 2019. 368 p.(in Russian).
2. Izmerenie i ocenka rezul'tatov i jeffektov cifrovoj transformacii toplivno-jenergeticheskogo kompleksa. [Measurement and assessment of the results and effects of digital transformation of the fuel and energy complex] // Materialy Instituta jenergeticheskikh issledovanij RAN (INJeI RAN) po rezul'tatam NIR "Razrabotka nauchno obosnovannyh predlozhenij po izmereniju i ocenke rezul'tatov i jeffektov cifrovoj transformacii toplivno-jenergeticheskogo kompleksa". = Materials of the Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (ERI RAS) based on the results of research "Development of scientifically based proposals for measuring and evaluating the results and effects of digital transformation of the fuel and energy complex." Available at: <https://in.minenergo.gov.ru/upoad/iblock/29a/29a0484ea0e4bd272252a486a80f2c32.pdf> (accessed 17.11.2021) (in Russian).
3. Pjat' otlichij avtomatizacii ot cifrovizacii [Five differences between automation and digitalization]. Available at: <https://www.bigdataschool.ru/blog/> (accessed 13.12.2021) (in Russian).
4. Voropaj N.I., Stennikov V.A. Integrirovannye intellektual'nye jenergeticheskie sistemy (Integrated intelligent energy systems) // Izvestija RAN. Energetika = News of the RAS. Energy. 2014. № 1. Pp. 64-73 (in Russian).
5. Voropaj N.I., Stennikov V.A. Integrirovannye energeticheskie sistemy [Integrated energy systems] // Innovacionnaja elektrojenergetika-21 = Innovative power industry-21. Edited by Batenin V.M., Bushuev V.V., Voropaj N.I. M.: PC "Energy". 2017. Pp. 181-193. ISBN 978-5-98908-457-9 (in Russian).

6. Bushuev V.V., Kamenev A.S., Kobec B.B. Jenergetika kak infrastrukturnaja «sistema sistem» [Energy as an infrastructure “system of systems”] // Jenergeticheskaja politika = Energy policy. 2012. Is. 5. Pp. 3-14 (in Russian).
7. Voropaj N.I., Stennikov V.A., Senderov S.M., Barakhtenko E.A. and etc. Integrirovannye infrastrukturnye energeticheskie sistemy regional'nogo i mezhregional'nogo urovnja [Integrated infrastructure energy systems of the regional and interregional level] // Energeticheskaja politika = Energy policy. 2015. Vol. 3. Pp. 24-32 (in Russian).
8. Voropaj N.I., Stennikov V.A., Senderov S.M. Integrirovannye intellektual'nye sistemy v energetike Rossii [Integrated intelligent systems in the energy sector of Russia] // Sistemnye issledovaniya v jenergetike: metodologija i rezul'taty = Systems Research in Energy: Methodology and Results Edited by Makarov A.A. and Voropaj N.I. M.: ERI RAS. 2018. Pp. 87-101 (in Russian).
9. Veselov F.V., Dorofeev V.V. Intellektual'naja energosistema Rossii kak novyj etap razvitija elektroenergetiki v uslovijah cifrovoj ekonomiki [Intelligent energy system of Russia as a new stage in the development of the electric power industry in the digital economy] // Energeticheskaja politika = Energy policy. 2018. Vol. 23. № 5. Pp. 43-52 (in Russian).
10. Berdnikov R.N., Bushuev V.V., Voropaj N.I. and etc. Konceptcija intellektual'noj elektroenergeticheskoj sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoj set'ju. [The concept of an intelligent electric power system in Russia with an active-adaptive grid] M.: OAO «NTC FSK EES». 2012. 235 p. (in Russian).
11. Voropaj N.I., Gubko M.V., Kovalev S.P., Massel' L.V., Novikov D.A., Rajkov A.N., Senderov S.M., Stennikov V.A. Problemy razvitija cifrovoj jenergetiki v Rossii [Problems of digital energy development in Russia] // Problemy upravlenija = Management Problems. №1. 2019. S. 2-14. DOI: <http://doi.org/10.25728/pu.2019.1.1> (in Russian).
12. Rassel S., Norvig P. Iskusstvennyj intellekt: sovremennyj podhod.[Artificial Intelligence: a Modern Approach]. 2nd edit. M.: OOO “P. H. Vil'jams”. 2016. 1408 p. (in Russian).
13. Iskusstvennyj intellekt: mezhdumifom i real'nost'yu [Artificial intelligence: between myth and reality]. Available at: <https://ru.unesco.org/courier/2018-3/iskusstvennyj-intellekt-mezhdumifom-i-realnostyu>. (accessed 14.12.2021).
14. Finn V.K. Chertova dyuzhina iskusstvennogo intelekta [Finn V.K. A damn dozen of artificial intelligence]. Available at: <https://stimul.online/articles/science-and-technology/chertova-dyuzhina-idealnogo-intellekta-beseda-vtoraya/> (accessed 13.12. 2021) (in Russian).
15. Samaya mnogoobeshchayushchaya tekhnologiya. Chem vyzvano vseobshchee pomeshatel'stvo na mashinnom obuchenii? [Most Promising Technology. What is the cause of the general obsession with machine learning?]. Available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Машинное_обучение_\(Machine_Learning\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Машинное_обучение_(Machine_Learning)) (accessed 13.12.2021) (in Russian).
16. Bushuev V.V. Intellektual'noe (kognitivnoe) prognozirovanie i upravlenie v energetike [Intelligent (cognitive) forecasting and management in energy]. V kn.: Sistemnye issledovaniya v energetike: metodologiya i rezul'taty = In the book: Systems Research in Energy: Methodology and Results. Pod red. A.A. Makarova i N.I. Voropaya. M.: INEI RAN. 2018. Pp. 102-112. (in Russian)
17. Lyubarskij YU.YA. Operativnyj dispetcherskij analiz neshtatnyh situacij v elektricheskikh setyah promyshlennyh predpriyatij – komp'yuternaya podderzhka na osnove tekhnologii ekspertnyh sistem [Operational dispatch analysis of emergency situations in electrical networks of industrial enterprises - computer support based on the technology of expert

- systems] // Promyshlennaya energetika = Industrial energy. 2017. № 9. Pp. 2-6. (in Russian).
18. Hrennikov A.YU., Lyubarskij YU.A. Ispol'zovanie elementov iskusstvennogo intellekta: komp'yuternaya podderzhka operativnyh reshenij v intellektual'nyh energeticheskikh setyah [Using elements of artificial intelligence: computer support for operational decisions in smart energy grids]. M.: Litres, 2021. 140 p. (in Russian).
 19. Horoshevskij V.F. Semanticheskie tekhnologii: ozhidaniya i trendy [Semantic technologies: expectations and trends] // Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nyh sistem = Open semantic technologies for the design of intelligent systems (OSTIS - 2012) // Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii.= Proceeding of the II International Scientific and Technical Conference. BSUIR. Minsk. 2012. Pp.143-158. (in Russian).
 20. Massel L.V. Primenenie ontologicheskogo, kognitivnogo i sobytijnogo modelirovaniya dlya analiza razvitiya i posledstvij chrezvychajnyh situacij v energetike [Application of ontological, cognitive and event modeling to analyze the development and consequences of emergency situations in the energy sector] // Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij = Safety and emergencies problems. № 2. 2010. Pp. 34-43. (in Russian).
 21. Massel L.V., Massel A.G. Intellektual'nye vychisleniya v issledovaniyah napravlenij razvitiya energetiki [Intelligent computing in energy research] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = News of the Tomsk Polytechnic University. 2012. Vol. 321. № 5. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Management, computer technology and informatics. Pp. 135-141. (in Russian).
 22. Konceptiya granichnyh vychislenij [Edge computing concept]. Available at: <https://2g3g4g5g.ru/mec-edge-computing-iot/> (accessed 08.12.2021) (in Russian).
 23. Massel L.V., Gribova V.V., Kopajgorodskij A.N. «Oblachnaya» struktura energoinformacionnyh system [«Cloud» structure of energy information systems] // V kn.: Innovacionnaya elektroenergetika-21 = In book : Innovative power industry-21 / Pod red. Batenina V.M., Bushueva V.V., Voropaya N.I. M.: PC «Energiya»= Energy. 2017. Pp. 556-577 (in Russian).
 24. Kurganova N.V., Filin M.A., CHernyaev D.S., SHaklein A.G., Namiot D.E. Vnedrenie cifrovyyh dvojniov kak odno iz klyuchevyyh napravlenij cifrovizacii proizvodstva [Digital twins' introduction as one of the major directions of industrial digitalization] // International Journal of Open Information Technologies. ISSN: 2307-8162. 2019. Vol. 7. № 5. Pp. 105-115. (in Russian).
 25. Kolosok I. N., Korkina E.S. Primenenie tekhnologii granichnoj analitiki (Edge Analytics) pri sozdanii cifrovyyh dvojniov ob"ektov EES Rossii [Application of edge analytics technology to develop digital twins of Russia's united electric power system facilities // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2021. № 3 (23). Pp. 27-38. DOI: 10.38028/ESI.2021.23.3.003 (in Russian).
 26. Prohorov A., Lysachev M. Nauchnyj redaktor professor Borovkov A. Cifrovoy dvojniov. Analiz, trendy, mirovoj opyt [Digital twin. Analysis, trends, global experience]. M.: OOO «Al'yansPrint». 2020. 401 p. (in Russian).
 27. Stennikov V.A. Cifrovye dvojniov v energetike [Digital twins in energy] // Doklad asociacii «Global'naya energiya»: «10 proryvnyh idej v energetike na sleduyushchie 10 let. 2021» = Global Energy Association Report: «10 Breakthrough Ideas in Energy for the Next 10 Years. 2021». Pp. 14-29. Available at: <https://globalenergyprize.org/ru/> (accessed 7.12.2021) (in Russian).

28. Voropaj N.I., Massel L.V., Kolosok I.N., Massel A.G. IT-инфраструктура для построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов [IT-infrastructure for construction of intelligent management systems of development and functioning of energy systems based on digital twins and digital images] // Izvestiya RAN. Energetika = News of the Russian Academy of Sciences. Energy. 2021. №1. Pp. 3-13. DOI: 10.31857/S0002331021010180 (in Russian).
29. Massel L., Massel A. Development of Digital Twins and Digital Shadows of Energy Objects and Systems Using Scientific Tools for Energy Research // ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management: proceedings. E3S Web of Conferences, 2020. Volume 209. DOI: 10.1051/e3sconf/202020902019.
30. Steindl G, Stagl M, Kasper L, Kastner W, Hofmann R. Generic Digital Twin Architecture for Industrial Energy Systems // Applied Sciences. 2020. 10(24):8903. DOI: 10.3390/app10248903.
31. Lim K.Y.H., Zheng P., Chen C. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives // Journal of Intelligent Manufacturing. 2020. Vol. 31. 1313–1337. DOI: 10.1007/s10845-019-01512-w.
32. Massel L.V., Vorozhcova T.N. Ontologicheskij podhod k postroeniyu cifrovyyh dvojnikov ob"ektov i sistem energetiki [Ontological approach to the construction of digital twins of objects and energy systems] // Ontologiya proektirovaniya = Ontology of designing. 2020. Vol. 10. № 3 (37). Pp. 327-337 (in Russian).
33. Andrjushkevich S.K., Kovalev S.P., Nefedov E. Podhody k razrabotke i primeneniju cifrovyyh dvojnikov jenergeticheskikh sistem [Approaches to the development and application of digital twins of energy systems] // Cifrovaja podstancija= Digital substation. № 12. 2019. Pp. 38-43 (in Russian).
34. Kovaljov S.P. Proektirovanie informacionnogo obespechenija cifrovyyh dvojnikov jenergeticheskikh sistem [Designing information support for digital twins of energy systems]. Sistemy i sredstva informatiki = Systems and means of informatics. T. 30. №1. 2020. Pp. 66-81 (in Russian).
35. Massel A.G., Shchukin N.I., Cybikov A.R. Razrabotka CD solnechnoj elektrostancii s icpol'zovaniem tekhnologii BigData [Digital twin development of a solar power plant using Big Data technology] // Trudy Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa «Intellektual'nye sistemy i informacionnye tekhnologii - 2021» = Proceedings of the International Scientific and Technical Congress "Intelligent Systems and Information Technologies - 2021" («IS&IT'21»). Nauchnoe izdanie. Taganrog: Izd-vo Stupina S.A. 2021. Pp. 598-605. (in Russian).
36. Sil'nyj II [Strong AI]. Available at: <https://nauka.tass.ru/nauka/12769989> (accessed 8.12.2021) (in Russian).

Статья поступила в редакцию 06.12.2021; одобрена после рецензирования 15.12.2021; принята к публикации 20.12.2021.

The article was submitted 06.12.2021; approved after reviewing 15.12.2021; accepted for publication 20.12.2021.