

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ: ОТ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ К ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКАМ И ЦИФРОВЫМ ОБРАЗАМ

Массель Людмила Васильевна

Д.т.н., профессор, главный научный сотрудник,
зав. лабораторией «Информационные технологии в энергетике»,
e-mail: massel@isem.irk.ru

Массель Алексей Геннадьевич

К.т.н., старший научный сотрудник
лаборатории «Информационные технологии в энергетике»

Копайгородский Алексей Николаевич

К.т.н., ведущий специалист
лаборатории «Информационные технологии в энергетике»
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Аннотация. В статье рассматривается новый подход к организации системных исследований энергетики, учитывающий современные тренды цифровизации: цифровые двойники и цифровые образы. Предлагается использовать, как их основу, имеющиеся в Институте систем энергетики СО РАН математические модели систем энергетики и программные комплексы, разработанные для расчетов по этим моделям. Онтологический инжиниринг предметной области и средств исследований позволит построить, для каждой области исследований, интегрированную с математической онтологическую модель, которые станут ядром цифровых двойников при исследованиях функционирования систем энергетики и ядром цифровых образов при исследованиях развития топливно–энергетического комплекса (ТЭК), объединяющего эти системы энергетики (СЭ). Для поддержки комплексных иерархических исследований, использующих новый подход, предлагается ИТ-инфраструктура, основанная на использовании современных информационных и интеллектуальных технологий.

Ключевые слова. Энергетические системы, математическая модель, компьютерная программа, онтологическая модель, интеллектуальные технологии, цифровой двойник, цифровой образ, цифровая тень.

Цитирование: Массель Л.В., Массель А.Г., Копайгородский А.Н. Эволюция технологий исследований энергетики и применения их результатов: от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 5–19. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-01

1. Системные исследования энергетики. Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН является одним из лидеров в области системных исследований в энергетике России. Основные научные направления ИСЭМ СО РАН: теория создания энергетических систем, комплексов и установок и управления ими; научные основы и

механизмы реализации энергетической политики России и ее регионов. В рамках этих направлений выполняются: исследования систем энергетики (электроэнергетических, газо-, нефте-, нефтепродукто-снабжения, теплосиловых); энергетической безопасности России; региональных проблем энергетики; взаимосвязей энергетики и экономики; перспективных энергетических источников и систем; исследования в области прикладной математики и информатики [17].

Основным инструментом исследований до последнего времени являлись математическое моделирование и вычислительный эксперимент. В связи с новыми трендами развития российской энергетики (интеллектуальная энергетика (Smart Grid) и цифровая энергетика) большое внимание уделяется развитию и применению интеллектуальных технологий [2].

Традиционно в ИСЭМ СО РАН принята иерархическая схема исследований, в которой согласовываются исследования и математические модели топливно-энергетического комплекса (используются экономико-математические модели) и отраслевых систем энергетики (применяются физико-математические модели) (рис. 1) [5].

Исследования прогнозирования развития ТЭК выполняются на верхнем уровне схемы с учетом результатов, полученных при исследованиях направлений развития отраслевых систем энергетики на следующих уровнях. Каждому блоку приведенной схемы соответствует совокупность математических методов, моделей и программных комплексов, с помощью которых выполняются вычислительные эксперименты с использованием этих моделей.

С целью совершенствования иерархической технологии обоснования развития энергетики в целом и ее отраслевых и территориальных составляющих, требуется выполнить формализованную интеграцию программных средств и информационного обеспечения, при этом основное внимание надо уделить разработке программно-информационных интерфейсов между решаемыми задачами в горизонтальном (между отдельными системами энергетики) и вертикальном (системы энергетики – ТЭК – внешние условия) разрезах.

Разработка и реализация таких интерфейсов должна обеспечивать следующие преимущества комплексной иерархической технологии исследований: а) сохранение (при необходимой доработке требуемых программных средств – обеспечение) конфиденциальности основных детальных массивов данных, поддерживающих конкретные задачи; б) формализацию и тем самым ускорение обмена информацией и обеспечение однозначности обмениваемых данных; в) определенную унификацию используемых информационных моделей при решении различных задач, которую потребует реализовать при согласовании и разработке интерфейсов; г) в целом повышение «стройности» и обоснованности иерархической технологии обоснования развития энергетики и ее составляющих.

В [14] был предложен подход к решению этой проблемы, но понятия цифровых двойников и цифровых образов в нем не использовались. В конце статьи будут сопоставлены основные положения предложенного ранее и предлагаемого подходов.

Далее рассматриваются основные понятия последних трендов в развитии цифровых технологий: цифровые двойники и цифровые тени, цифровые модели и цифровые образы.

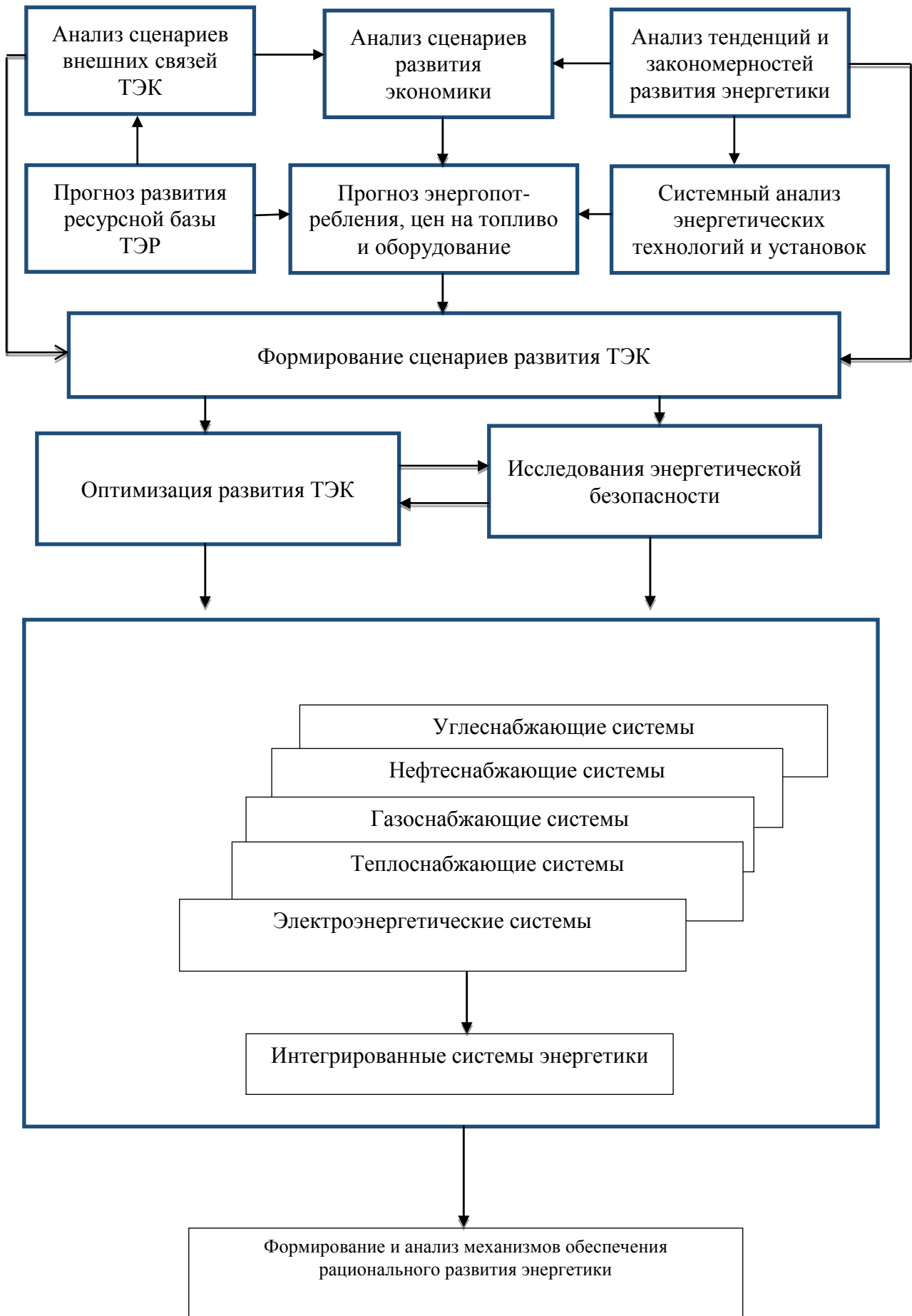


Рис. 1. Общая схема исследований по обоснованию развития энергетики

2. Цифровые двойники и цифровые тени. Последний тренд в развитии цифровых технологий – это создание цифровых двойников. Утверждают, что «цифровой двойник» вошел в десятку главных стратегических технологических трендов 2019 года. Понятие цифрового двойника имеет несколько определений, обзор которых выполнен, например, в [6], на основании источников [18, 20, 21, 23-25, 27-29]. Применение цифровых двойников в электроэнергетике рассмотрено главным инженером подразделения «Интеллектуальные сети» компании Siemens E. Литвиновой [15]. Согласно [15], «наиболее подходящее определение цифрового двойника — это реальное отображение всех компонентов в жизненном цикле продукта с использованием физических данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними, то есть цифровой двойник создает виртуальный прототип реального объекта, с помощью которого можно проводить эксперименты и проверять гипотезы, прогнозировать поведение объекта и решать задачу управления его жизненным циклом.»

По мнению специалистов [6], цифровых двойников можно разделить на три типа:

1. Двойник-прототип (Digital Twin Prototype). Это виртуальный аналог реально существующего элемента. Он содержит информацию, которая описывает определенный элемент на всех стадиях— начиная от требований к производству и технологических процессов при эксплуатации, заканчивая требованиями к утилизации элемента.
2. Двойник-экземпляр (Digital Twin Instance). Содержит в себе информацию по описанию элемента (оборудования), то есть данные о материалах, комплектующих, информацию от системы мониторинга оборудования.
3. Агрегированный двойник (Digital Twin Aggregate). Объединяет прототип и экземпляр, то есть собирает всю доступную информацию об оборудовании или системе.

Для компаний, которые эксплуатируют электрические сети, наиболее актуален двойник-экземпляр. Он основывается на математической модели сети. В таком цифровом двойнике может находиться информация о технических параметрах используемого оборудования (кабели, трансформаторы, выключатели и т.д.), дате его ввода в эксплуатацию, географические координаты, данные с измерительных устройств. Эту информацию используют для проведения расчетов по подключению новых потребителей, а также различных расчетов электрических сетей. Например, расчет режимов, токов короткого замыкания, координации установок релейной защиты и другие.

Как правило, эти расчеты проводят различные подразделения, и в каждом из них существует своя собственная математическая модель одной и той же физической сети. Использование разных моделей часто приводит к ошибкам и снижению точности. Применение единого цифрового двойника всеми подразделениями компании может помочь решить данную проблему. Таким образом, для электрических сетей цифровой двойник включает базу данных с информацией о сети, которая интегрирована с другими ИТ-системами энергокомпании (SCADA, геоинформационная система, система управления активами и пр.). Цифровой двойник должен синхронизировать данные, полученные из разных источников, таким образом, чтобы они точно соответствовали текущему состоянию электрической сети.

С точки зрения области построения выделяют цифровых двойников продукта, процесса и системы [6]. «Цифровой двойник продукта» представляет собой виртуальную модель конкретного продукта. «Цифровой двойник процесса» - эти модели имитируют производственные процессы. Виртуальный производственный процесс может создать различные сценарии и показать то, что произойдет при различных ситуациях. Это позволяет компании разрабатывать наиболее эффективную методику производства. Процесс можно оптимизировать с помощью виртуальных двойников продукта для каждой части оборудования. «Цифровой двойник системы» - это виртуальные модели всей системы целиком (например, завода или фабрики). Они собирают огромные объемы операционных данных, производимых устройствами и продуктами в системе, получают представление и создают новые бизнес-возможности для оптимизации всех процессов.

Все вышеприведенные определения относятся к применению цифровых двойников в высокотехнологичной промышленности, но в [8] говорится уже о создании цифрового двойника научно-технического центра нефтегазовой промышленности.

Кроме того, используется термин «цифровая тень». Цифровую тень можно определить, как систему связей и зависимостей, описывающих поведение реального объекта, как правило, в нормальных условиях работы и содержащихся в избыточных больших данных, получаемых с реального объекта при помощи технологий промышленного интернета. Цифровая тень способна предсказать поведение реального объекта только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор данных, но не позволяет моделировать другие ситуации [6]. Сравнение цифровых двойников и цифровых теней рассматривается, например, А. Боровковым [3].

3. Цифровые модели и цифровые образы. Руководитель Национального центра когнитивных разработок Университета ИТМО (СПб) д.т.н. А.В. Бухановский в своем интервью сопоставляет цифровые модели, цифровые двойники и цифровые образы [4]. Приведем основные положения этого интервью.

«Цифровая модель, по сути, компьютерная программа, способная с определенной точностью рассчитывать характеристики поведения реального объекта в различных условиях внешней среды – как наблюдаемых, так и гипотетических. Достоинство цифровой модели состоит в том, что она позволяет ставить над объектом виртуальные эксперименты, что особенно важно в ситуациях, когда реальный эксперимент неприемлемо дорог или даже опасен». Это в полной мере относится к исследованиям энергетики.

«Цифровой двойник является более емким информационным объектом, поскольку включает в себя одну или несколько взаимосвязанных цифровых моделей, а также наборы данных, необходимых для их работы, часто получаемых в режиме времени, близком к реальному, непосредственно с реального объекта техники. Еще более общим является понятие «цифрового образа», который, помимо моделей и данных объекта техники, включает в себя поведенческие и когнитивные модели связанной с ним человеческой деятельности (например, операторов оборудования, административного персонала). Цифровые образы – основа для создания нового поколения систем поддержки принятия решений, отвечающих логике седьмого технологического уклада».

«Когнитивные технологии основываются тоже на цифровых моделях, однако предназначенных для имитации принятия решений человеком в условиях неопределенности на основе накопленного опыта.

При обилии разнообразных данных о поведении реального объекта или его цифрового двойника даже квалифицированный эксперт просто не способен быстро и качественно проанализировать ситуацию, полагаясь только на свои органы чувств и мыслительные способности. Потому здесь на помощь приходят различные механизмы искусственного интеллекта, которые автоматизируют процесс интерпретации таких данных с целью определения значимых фактов, для того, чтобы на их основе сформировать объективную оценку ситуации и предложить варианты дальнейших действий.

При этом когнитивные технологии не могут заменить специалиста целиком: они лишь помогают избежать ошибок, неизбежных в условиях ограниченного времени на принятие решений, а также освобождают от рутинных действий, позволяя концентрировать внимание на действительно нетривиальных задачах».

Все вышесказанное можно отнести к разработке интеллектуальных систем поддержки принятия стратегических решений по развитию энергетики, которой занимаются авторы, используя, в том числе, когнитивные технологии.

Кроме того, заслуживает внимание следующее положение, непосредственно связанное с энергетикой:

«Когнитивные технологии в их современном понимании являются очень молодым направлением, поскольку неотъемлемо связаны с возможностями сбора, хранения и обработки сверхбольших объемов данных. Потому приоритет здесь имеют отрасли и предприятия, в которых технологии Big Data уже устойчиво нашли свое место, например – финансы, ритейл, цифровые медиа. Для промышленных предприятий (включая топливно-энергетический комплекс) внедрять такие технологии сложнее, поскольку исходные данные порождаются не цифровыми процессами, а привязаны к материальным объектам. Здесь ключевым фактором роста является наличие собственной инфраструктуры сбора и хранения данных, а также создания коллекций профессиональных данных для обучения когнитивных моделей.

В отличие от традиционных направлений искусственного интеллекта (например, распознавания голоса или технического зрения), специфика профессиональных данных очень сильно связана с технологическими и бизнес-процессами конкретного предприятия. Потому возможности тиражирования таких данных и решений на их основе весьма ограничены; нужно ориентироваться на собственные коллекции» [4].

Опираясь на анализ приведенных источников и собственный опыт в области разработки интеллектуальных СППР и инфраструктуры научных исследований, авторы предлагают следующий подход к организации системных исследований в энергетике с использованием современных трендов цифровизации.

4. Переход в исследованиях энергетики от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам. Обоснование возможности и целесообразности такого перехода можно подтвердить схемой цифрового двойника на основе онтологической модели, предложенной д.т.н. С.П. Ковалевым (ИПУ РАН) с соавторами [1, 19] (рис. 2).

Для нас важным в этой архитектуре является то, что «главным компонентом цифрового двойника является комплекс математических и экономических расчетных, имитационных, нейросетевых моделей, описывающих все аспекты поведения объекта. Предусматриваются мощные механизмы калибровки моделей в целях повышения их

достоверности, в том числе путем машинного обучения [22]. В целях обеспечения удобного доступа к моделям в составе цифрового двойника, их часто оформляют как сервисы [26].

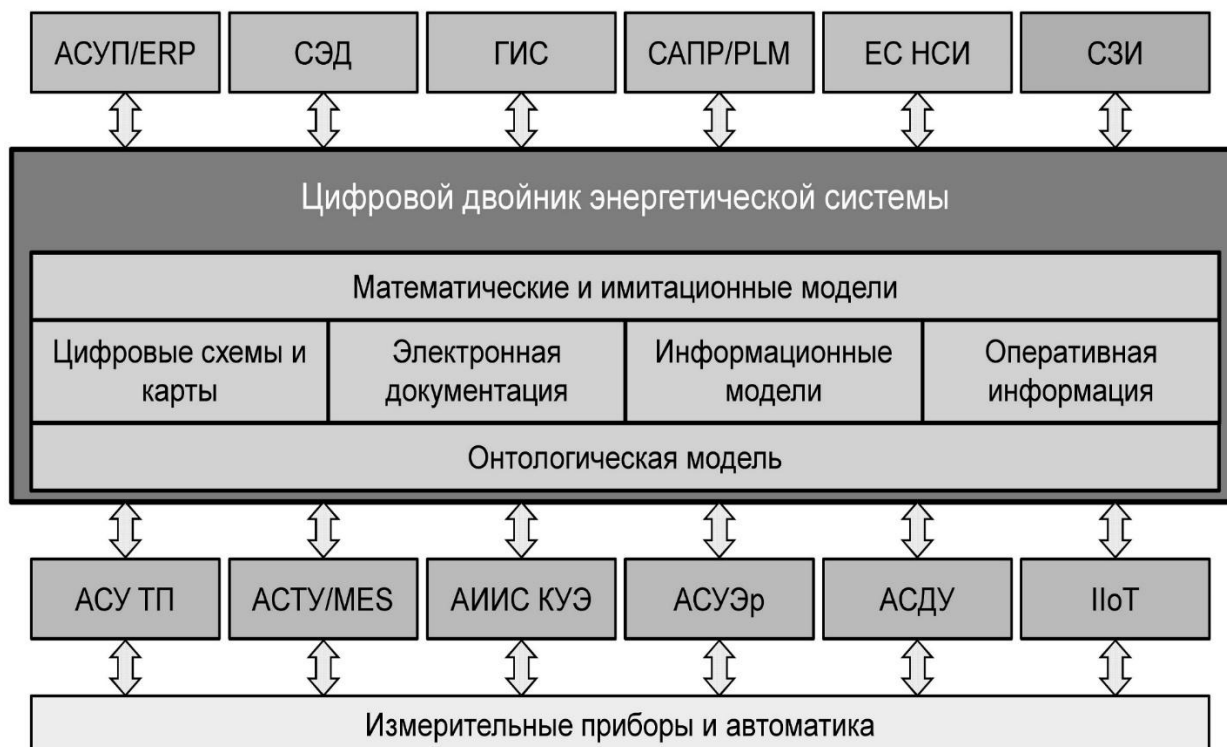


Рис. 2. Архитектура цифрового двойника энергетической системы.

Идея использования имитационных моделей в качестве основы цифрового двойника высказывалась, в частности, в [16], но нельзя согласиться с утверждением автора, что «информационные технологии являются обеспечивающим функционирование цифровых двойников инструментом, который не является определяющим фактором», поскольку именно развитие информационных технологий и достижения в этой области позволили говорить о цифровых двойниках.

В рисунке 2 для нас важно, что слой математических моделей цифрового двойника «собирается» над онтологической моделью. Если вернуться к иерархической схеме по обоснованию развития энергетики (рис. 1), то представляется, что на основе онтологических и математических (физико-технических) моделей отраслевых систем энергетики могут быть построены цифровые двойники этих систем. После решения вопросов обеспечения этих моделей данными, вопросов информационного взаимодействия с потоками данных и проведения вычислительных экспериментов на цифровых двойниках они могут быть рекомендованы для практического использования при управлении соответствующими энергетическими системами.

Можно предложить следующие этапы перехода к «цифровым двойникам» в исследованиях энергетических систем:

- 1) анализ существующих математических моделей и реализующих их компьютерных программ (программных комплексов);
- 2) онтологический инжиниринг предметной области (соответствующей энергосистемы) и построение онтологической модели;

- 3) модификация, при необходимости, математических моделей и реинжиниринг программ и программных комплексов (если они перешли в категорию унаследованного программного обеспечения);
- 4) определение исходных данных (состав, источники получения, возможность получения оперативных данных, базы данных и др.);
- 5) разработка web-приложений и web-сервисов для реализации цифровых двойников, на основе прошедших реинжиниринг цифровых программ, создание инфраструктуры для проведения иерархических комплексных исследований с использованием цифровых двойников.

Более сложной задачей является построение «цифровых образов», необходимых для исследований развития ТЭК, которые могут стать основой для интеллектуальных систем поддержки стратегических решений по развитию энергетики. Здесь ставится задача интеграции математических и семантических моделей (в первую очередь – когнитивных), опыт разработки которых у авторов имеется [10, 11]. Полная библиография работ авторов в области разработки и применения интеллектуальных и когнитивных технологий приведена в [12].

При переходе к «цифровым образам» к вышеперечисленным этапам добавятся (после этапа 4) еще два этапа: разработки семантических (в первую очередь когнитивных) моделей и их интеграции с математическими моделями.

5. Инфраструктура для проведения иерархических комплексных исследований в энергетике с использованием цифровых двойников и цифровых образов. Основой инфраструктуры для проведения иерархических комплексных исследований в энергетике с использованием цифровых двойников и цифровых образов может стать модифицированная архитектура многоагентной интеллектуальной среды (рис. 4), предложенная авторами ранее в [14]. Для схемы, приведенной на рисунке 1, были выделены следующие уровни (этапы) исследований и поддерживающие их инструментальные средства (рис. 3):

1. Уровень анализа (используется семантическое моделирование), поддерживается Интеллектуальной ИТ-средой [24].
2. Уровень коллективной выработки согласованных решений (может использоваться, в т.ч., семантическое моделирование, методы согласования решений) – поддерживается Интеллектуальной системой поддержки коллективной экспертной деятельности [29].
3. Уровень обоснования решений (выполняются расчеты вариантов, предложенных на предыдущем этапе, с использованием традиционных программных комплексов для исследований ТЭК и СЭ) – в новом подходе – с использованием цифровых двойников и цифровых образов.
4. Уровень представления предлагаемых решений (используются средства визуальной аналитики и когнитивной графики).

Интеграция инструментальных средств осуществляется с помощью языка управления знаниями, который рассматривается как упрощенная версия разработанного ранее языка ситуационного управления (Contingency Management Language – CML) [28].

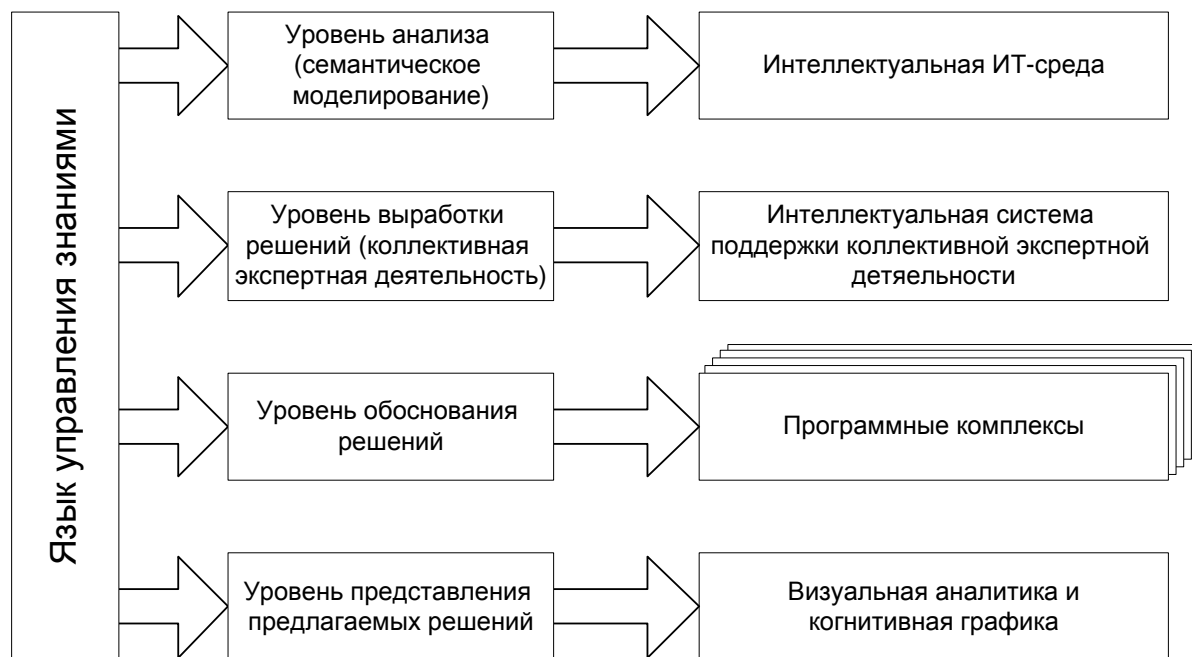


Рис. 3. Уровни (этапы) исследований и поддерживающие их инструментальные средства

При реализации предлагаемой инфраструктуры «ПК и БД для исследований ТЭК и проблем энергетической безопасности» (на рис. 4 вверху слева) предлагается заменить «цифровыми образами» ТЭК, а «ПК и БД для исследований отраслевых систем энергетики» (на рис. 4 вверху справа) – заменить «цифровыми двойниками» соответствующих систем.

Заключение. В статье предлагается новый подход к организации системных исследований в энергетике, основанный на использовании современных трендов в развитии цифровых технологий – цифровых двойников и цифровых образов. Подробно рассматриваются эти понятия. Цитаты из работ авторов, посвященные этой тематике, приводятся в кавычках, с тем, чтобы не исказить их смысл. Предлагается интеграция математических и онтологических моделей для построения цифровых двойников систем энергетики, которые дополняются семантическими (в первую очередь когнитивными) моделями для построения цифровых образов в исследованиях развития ТЭК. Как ядро инфраструктуры комплексных исследований, основанных на использовании цифровых двойников и цифровых образов, предлагается модифицированная архитектура многоагентной интеллектуальной среды, основные компоненты которой уже реализованы в авторском коллективе, как научные прототипы. Данная статья является первой попыткой изложить предлагаемый подход. Представляется, что ее обсуждение может привести к переосмыслению подхода к проведению системных исследований энергетик и позволит говорить о новом качестве исследований и приближении их результатов к практическому применению при управлении системами энергетики и обосновании и принятии стратегических решений по развитию ТЭК в целом.

Благодарности. Результаты получены в рамках выполнения проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН АААА-А17-117030310444-2 (проект №349-2016-0005) и при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №19-07-00351, №18-07-00714, № 17-07-01341, авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований.

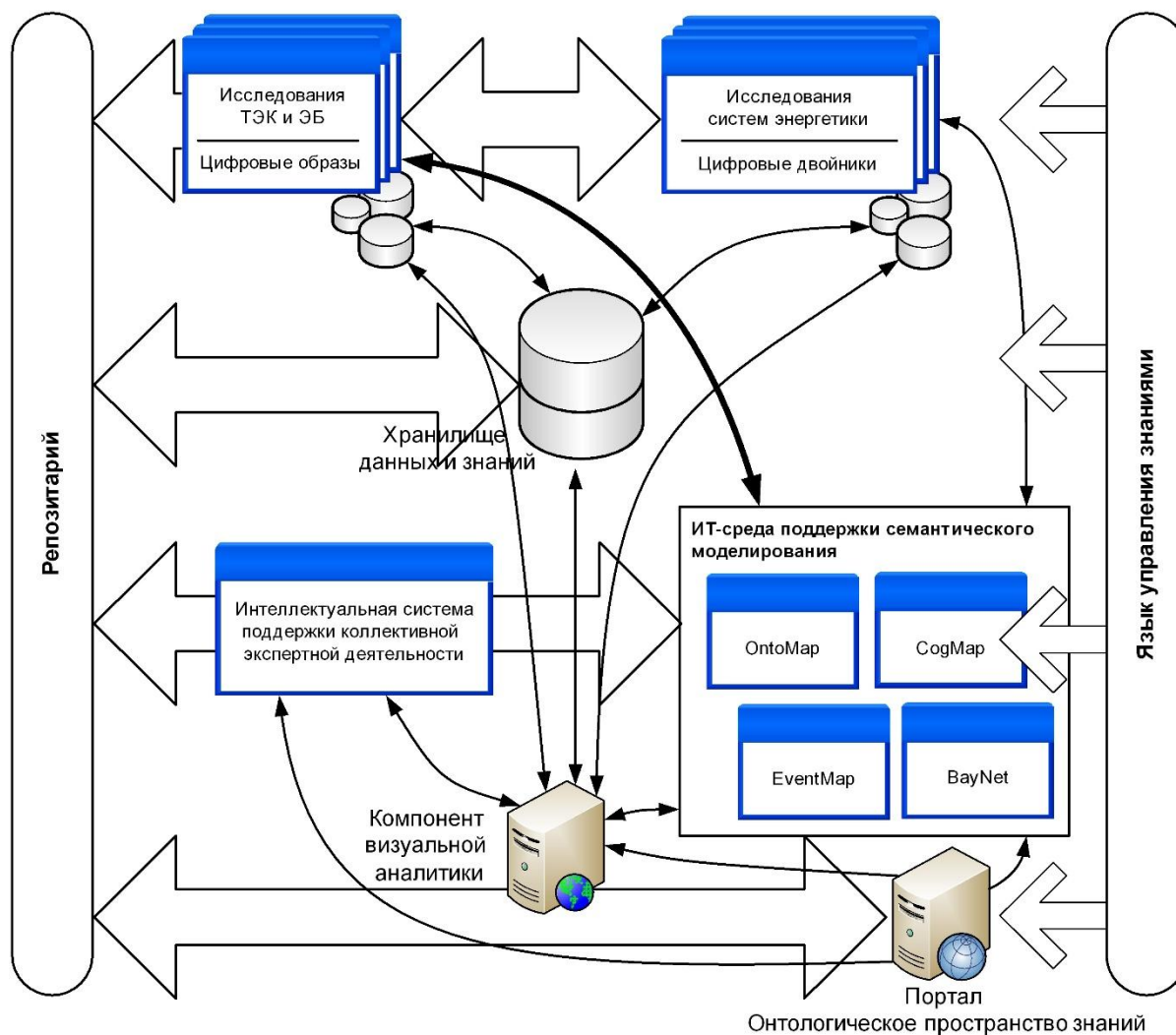


Рис. 4. Модифицированная архитектура многоагентной интеллектуальной среды как основа инфраструктуры для проведения иерархических комплексных исследований энергетики с использованием цифровых двойников и цифровых образов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриюшкевич С.К., Ковалев С.П., Нефедов Е. Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем // *Цифровая подстанция*. № 12. 2019. С. 38–43.
2. Бердников Р.Н., Бушуев В.В., Васильев С.Н., Веселов Ф.В., Воропай Н.И. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно - адаптивной сетью. М.: ФСК ЕЭС. 2012. 219 с.
3. Боровков А. Цифровые двойники и цифровые тени в высокотехнологичной промышленности Режим доступа: <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoyniki-i-cifrovie-teni-v-visokotehnologichnoi-promishlennosti> (дата обращения 24.11.2019)
4. Бухановский А.В. Цифровые двойники ведут нас в седьмой технологический уклад // *Газета "Энергетика и промышленность России"*. № 07 (363), апрель 2019 г.
5. Воропай Н.И., Клер А.М., Кононов Ю.Д., Санеев Б.Г., Сендеров С.М., Стенников В.А. Методические основы стратегического планирования развития энергетики // *Энергетическая политика*. 2018. вып.3. С. 35–44.

6. Кокорев Д.С., Юрин А.А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса. *Colloquium-journal // Technical science*. №10(34), 2019. С. 31–35.
DOI: [10.24411/2520-6990-2019-10264](https://doi.org/10.24411/2520-6990-2019-10264)
7. Копайгородский А.Н. Управление знаниями в коллективной экспертной деятельности по обоснованию рекомендуемых решений в энергетике // Труды XX Российской научной конференции «Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ – 2017)». М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова. 2017. С. 128–135.
8. Краснов Ф., Хасанов М. Цифровой двойник научной организации: подходы и методики // *International Journal of Open Information Technologies*. ISSN: 2307-8162. 2019. vol 7. № 6. С. 62–66. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-nauchnoy-organizatsii-podhody-i-metodiki> (дата обращения 24.11.2019)
9. 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.
10. Массель Л.В., Массель А.Г. Семантические технологии на основе интеграции онтологического, когнитивного и событийного моделирования // *Открытые семантические технологии для интеллектуальных систем*. № 3. 2013. Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. С. 247–250.
11. Массель Л.В. Интеграция семантического и математического моделирования в исследованиях проблем энергетической безопасности // *Международная конференция «Моделирование-2012»: труды*. Киев. ИПМЭ НАН Украины. 2012. С. 270–273.
12. Массель Л.В. Проблемы создания интеллектуальных систем семиотического типа для стратегического ситуационного управления в критических инфраструктурах // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. Научный журнал. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2016. № 1. С. 7–27.
13. Массель Л.В., Массель А.Г. Язык описания и управления знаниями в интеллектуальной системе семиотического типа // *Труды XX Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении»*. Т. 3. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2015. С. 112–124.
14. Массель Л.В. Методы и интеллектуальные технологии научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики // *Энергетическая политика*. 2018. № 5. С. 30–42.
15. Никитина Е. Попали в сети: как работают цифровые двойники в электроэнергетике. Режим доступа: <https://pro.rbc.ru/news/5db1b59a9a79474bb142a3fe> (дата обращения 24.11.2019)
16. Петров А.В. Имитация как основа цифровых двойников. *Вестник ИрГТУ*. 2018. Том 2. №10. С. 56–66.
17. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука. 2010. 686 с.

18. Толстых Т.О., Гамидуллаева Л.А., Шкарупета Е.В. Ключевые факторы развития промышленных предприятий в условиях цифрового производства и индустрии 4.0 // Экономика в промышленности. 2018. Т. 11. №. 1. С. 11–19.
 19. Andryushkevich S.K., Kovalyov S.P., Nefedov E. Composition and application of power system digital twins based on ontological modeling // Proc. 17th IEEE Intl. Conf. on Industrial Informatics INDIN'19. Helsinki-Espoo, Finland: IEEE. 2019. Pp. 1–6.
 20. Bolton R. N. et al. Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms // Journal of Service Management. 2018. Т. 29. №. 5. Pp. 776–808.
 21. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies // IEEE MultiMedia. 2018. Т. 25. №. 2. Pp. 87–92.
 22. Frolov D. How machine learning empowers models for digital twins // Benchmark. July 2018. Pp. 48–53.
 23. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012. Pp. 1818.
 24. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing letters. 2015. Т. 3. Pp. 18–23.
 25. Michael W. Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC. 2014. 7 p.
 26. Qia Q., Taof F., Zuoa Y., Zhaob D. Digital twin service towards smart manufacturing // Procedia CIRP. 2018. Vol. 72. Pp. 237–242.
 27. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-PapersOnLine. 2015. Pp. 567–572.
 28. Söderberg R. et al. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production // CIRP Annals. 2017. Т. 66. №. 1. Pp. 137–140.
 29. Tao F. et al. Digital twin-driven product design framework // International Journal of Production Research. 2018. Pp. 1–19.
-

UDK 004.89 : 620.9

THE EVOLUTION OF ENERGY RESEARCH AND APPLICATION OF THEIR RESULTS: FROM MATHEMATICAL MODELS AND COMPUTER PROGRAMS TO DIGITAL TWINS AND DIGITAL IMAGES

Lyudmila V. Massel

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher,
Head Laboratory "Information Technologies in Energy", e-mail: massel@isem.irk.ru

Alexey G. Massel

Ph.D., Senior Researcher Laboratory "Information Technologies in Energy"

Alexey N. Kopygorodsky

Ph.D., Leading Specialist Laboratory "Information Technologies in Energy"

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, 664033 Irkutsk, st. Lermontov 130

Abstract. The article proposes a new approach to organizing systemic studies of energy, taking into account modern trends in digitalization digital twins and digital images. It is proposed to apply, as their basis, developed at the Institute of Energy Systems of the SB RAS the mathematical models of energy systems and the software systems, used for calculations using these models. Ontological engineering of the subject area and research tools will allow to build, for each research area, integrated mathematical and ontological models. These models will become the nucleus of digital twins in studies of the functioning of energy systems and the nucleus of digital images in studies of the development of the fuel and energy complex (FEC) that combines these energy systems. To support hierarchical research using a new approach, an IT infrastructure based on the use of modern information and intelligent technologies is proposed.

Keywords: energy systems, mathematical model, computer program, ontological model, intelligent technologies, digital double, digital image, digital shadow.

Acknowledgment. The results were obtained in the framework of the project on state assignment to ISEM SB RAS AAAA-A17-117030310444-2 (project № 349-2016-0005) and with partial financial support from RFBR grants № 19-07-00351, № 18-07-00714, № 17 -07-01341, the authors are grateful to the Russian Foundation for Basic Research.

References

1. Andryushkevich S.K., Kovalev S.P., Nefedov E. Podhody k razrabotke i primeneniju cifrovyyh dvoynikov jenergeticheskikh sistem [Approaches to the development and use of digital twins of energy systems] // Cifrovaja podstancija = Digital substation. 2019. № 12. Pp. 38–43. (in Russian)
2. Berdnikov RN, Bushuev VV, Vasiliev S.N., Veselov F.V., Voropay N.I. et al. Konceptcija intellektual'noj jelektrojenergeticheskoy sistemy s aktivno- adaptivnoj set'ju [The concept of an intelligent electric power system with an active adaptive network]. Moscow. FGC UES, 2012. 219 p. (in Russian)
3. Borovkov A. Cifrovye dvoyniki i cifrovye teni v vysokotehnologichnoj promyshlennosti [Digital twins and digital shadows in the high-tech industry]. Available at: <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoyniki-i-cifrovie-teni-v-visokotehnologichnoi-promishlennosti> (accessed 11.24.2019). (in Russian)
4. Bukhanovsky A.V. Cifrovye dvoyniki vedut nas v sed'moj tehnologicheskij uklad [Digital twins lead us to the seventh technological stage] // Gazeta "Jenergetika i promyshlennost' Rossii" = The newspaper "Energy and Industry of Russia". April 2019. № 07 (363). (in Russian)
5. Voropai N.I., Cler A.M., Kononov Yu.D., Saneev B.G., Senderov S.M., Stennikov V.A. Metodicheskie osnovy strategicheskogo planirovanija razvitija jenergetiki [Methodological foundations of strategic planning for the development of energy] // Jenergeticheskaja politika = Energy Policy. 2018. Issue 3. Pp. 35–44 (in Russian)..

6. Kokorev D.S., Yurin A.A. Cifrovye dvojniki: ponjatie, tipy i preimushhestva dlja biznesa. [Digital twins: concept, types and benefits for business]. Colloquium-journal / Technical science. 2019. No. 10 (34). Pp. 31–35. DOI: 10.24411 / 2520-6990-2019-10264 (in Russian)
7. Kopaygorodsky A.N. Upravlenie znanijami v kollektivnoj jekspertnoj dejatel'nosti po obosnovaniju rekomenduemyh reshenij v jenergetike [Knowledge management in collective expert activity on the substantiation of recommended solutions in the energy sector] // Trudy XX Rossijskoj nauchnoj konferencii «Inzhiniring predpriyatij i upravlenie znanijami» = Proceedings of the XX Russian Scientific Conference "Enterprise Engineering and Knowledge Management". 2017. Moscow. REU im. G.V. Plekhanova = Plekhanov Russian University of Economics. Pp. 128–135. (in Russian)
8. Krasnov F., Khasanov M. Tsifrovoy dvoynik nauchnoy organizatsii: podkhody i metodiki [Digital twin of scientific organization: approaches and methods] // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 7. № 6. 2019. Pp. 62–66. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-nauchnoy-organizatsii-podhody-i-metodiki> (accessed 11.24.2019) (in Russian)
9. Massel L.V., Massel A.G. Intellegual'nye vychislenija v issledovanijah napravlenij razvitija jenergetiki [Intelligent computing in studies of energy development directions] // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2012. V. 321. № 5. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika = = News of Tomsk Polytechnic University. 2012. V. 321. № 5. Management, computer engineering and computer science. Pp. 135-141. (in Russian)
10. Massel L.V., Massel A.G. Semanticheskie tehnologii na osnove integracii ontologicheskogo, kognitivnogo i sobytijnogo modelirovanija [Semantic technologies based on the integration of ontological, cognitive and event modeling] // Otkrytye semanticheskie tehnologii dlja intellegual'nyh system = Open semantic technologies for intelligent systems. 2013. № 3. Minsk: Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki = Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Pp. 247–250. (in Russian)
11. Massel L.V. Integracija semanticheskogo i matematicheskogo modelirovanija v issledovanijah problem jenergeticheskoy bezopasnosti = Integration of semantic and mathematical modeling in studies of energy security problems // Mezhdunarodnaja konferencija «Modelirovanie-2012»: trudy = International Conference "Modeling-2012": proceedings. Kiev. IPME NAS of Ukraine. 2012. Pp. 270–273. (in Russian)
12. Massel L.V. Problemy sozdaniya intellegual'nyh sistem semioticheskogo tipa dlja strategicheskogo situacionnogo upravlenija v kriticheskikh infrastrukturah [Problems of creating intelligent systems of the semiotic type for strategic situational management in critical infrastructures] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii. Nauchnyj zhurnal = Information and mathematical technologies in science and management. Science Magazine. Irkutsk: ESI SB RAS. 2016. № 1. Pp. 7–27. (in Russian)
13. Massel L.V., Massel A.G. Jazyk opisaniya i upravlenija znanijami v intellegual'noj sisteme semioticheskogo tipa [Language for describing and managing knowledge in an intelligent system of semiotic type] // Trudy XX Bajkal'skoj Vserossijskoj konferencii "Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii" = Proceedings of the XX Baikal All-Russian Conference "Information and mathematical technologies in science and management". T. 3. Irkutsk. ESI SB RAS. 2015. Pp. 112–124. (in Russian)

14. Massel L.V. Metody i intellektual'nye tehnologii nauchnogo obosnovaniya strategicheskikh reshenij po cifrovoj transformacii jenergetiki [Methods and intelligent technologies for the scientific justification of strategic decisions on the digital transformation of energy] // Jenergeticheskaja politika = Energy Policy. 2018. № 5. Pp. 30–42. (in Russian)
15. Nikitina E. Popali v seti: kak rabotajut cifrovye dvojniki v jelektrojenergetike [Caught in the network: how digital doubles work in the electric power industry]. Available at: <https://pro.rbc.ru/news/5db1b59a9a79474bb142a3fe> (accessed 11.24.2019) (in Russian)
16. Petrov A.V. Imitacija kak osnova cifrovyh dvojnikov [Imitation as the basis of digital twins] // Vestnik IrGTU = Bulletin of ISTU. 2018. Volume 2. № 10. Pp. 56–66. (in Russian)
17. Sistemnye issledovaniya v jenergetike: Retrospektiva nauchnyh napravlenij SJeI–ISJeM [Systemic research in the energy sector: Retrospective of scientific directions SEI – ISEM] / ed. by N.I. Voropay. Novosibirsk. Nauka = Science. 2010. 686 p. (in Russian)
18. Tolstykh T.O., Gamidullaeva L.A., Shkarupeta E.V. Klyuchevyye faktory razvitiya promyshlennykh predpriyatij v usloviyakh tsifrovogo proizvodstva i industrii 4.0 [Key factors for the development of industrial enterprises in the context of digital production and Industry 4.0] // Ekonomika v promyshlennosti = Economics in Industry. 2018. T. 11. № 1. Pp. 11–19. (in Russian)
19. Andryushkevich S.K., Kovalyov S.P., Nefedov E. Composition and application of power system digital twins based on ontological modeling // Proc. 17th IEEE Intl. Conf. on Industrial Informatics INDIN'19. Helsinki-Espoo, Finland: IEEE. 2019. Pp. 1–6.
20. Bolton R. N. et al. Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms // Journal of Service Management. 2018. T. 29. №. 5. Pp. 776–808.
21. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies // IEEE MultiMedia. 2018. T. 25. №. 2. Pp. 87–92.
22. Frolov D. How machine learning empowers models for digital twins // Benchmark. July 2018. Pp. 48–53.
23. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012. Pp. 1818.
24. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing letters. 2015. T. 3. Pp. 18–23.
25. Michael W. Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC. 2014. 7 p.
26. Qia Q., Taoa F., Zuoa Y., Zhaob D. Digital twin service towards smart manufacturing // Procedia CIRP. 2018. Vol. 72. Pp. 237–242.
27. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-PapersOnLine. 2015. Pp. 567–572.
28. Söderberg R. et al. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production // CIRP Annals. 2017. T. 66. №. 1. Pp. 137–140.
29. Tao F. et al. Digital twin-driven product design framework // International Journal of Production Research. 2018. Pp. 1–19.