

---

---

УДК 004.89:620.9

## ИТ-ИНФРАСТРУКТУРА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВ

© 2021 г. Н. И. Воропай<sup>1</sup>, Л. В. Массель<sup>1</sup>, И. Н. Колосок<sup>1</sup>, А. Г. Массель<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

\*e-mail: amassel@gmail.com

Поступила в редакцию 18.08.2020 г.

После доработки 01.12.2020 г.

Принята к публикации 04.12.2020 г.

Предлагается подход к построению ИТ-инфраструктуры для создания интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики, основанный на применении результатов системных исследований энергетики с использованием современных концепций – цифровых двойников и цифровых образов. Рассматривается роль когнитивных технологий в создании цифровых образов. Выделяются две стадии построения цифровых двойников и цифровых образов: 1) разработка технологии, основанной на сборе информации и ее хранении для выполнения исследований и построения опытных образцов – прототипов цифровых двойников и цифровых образов; 2) разработка технологии апробации взаимодействия прототипов цифровых двойников и цифровых образов с информационными потоками, как основы для создания интеллектуальных систем управления развитием и функционированием энергетических систем и комплексов. Рассмотрены вопросы информационной обеспеченности на примере разработки цифрового двойника ЭЭС для управления ее режимами. Предлагается разработка ИТ-инфраструктуры системных исследований энергетики для поддержки этих технологий на основе модифицированной архитектуры многоагентной интеллектуальной инструментальной среды и имеющихся прототипов ее базовых компонентов.

*Ключевые слова:* системы энергетики, интеллектуальные системы управления, цифровые двойники, цифровые образы, математические, информационные, онтологические модели, когнитивные технологии

DOI: 10.31857/S0002331021010180

### ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях перехода к цифровизации и интеллектуализации энергетики [1, 2] очевидно, что необходима разработка нового подхода к построению интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики. Под системами энергетики понимаются как отраслевые системы энергетики, так и их объединение в виде топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны. Представляется, что важную роль при разработке этого подхода могут сыграть актуальные тренды – цифровые двойники и цифровые образы. В то же время при их реализации целесообразно использовать имеющиеся наработки, в первую очередь, в виде математических моделей отраслевых систем энергетики и ТЭК в целом, которые в течение многих лет

разрабатываются в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН [3, 4].

В статье рассматриваются основные понятия цифровых двойников и цифровых образов, этапы их разработки на основе интеграции математических, информационных и онтологических моделей и возможности перехода от цифровых двойников и цифровых образов к построению интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики. Для поддержки процесса разработки цифровых двойников и цифровых образов и последующего перехода к созданию интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики предлагается соответствующая ИТ-инфраструктура, основные научные прототипы которой реализованы в ИСЭМ СО РАН и рассматривались, в частности, в [5]. Обсуждаются предпосылки и направления исследований по разработке цифрового двойника ЭЭС для управления ее режимами.

**1. Проблема создания интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики в условиях цифровизации энергетики.** Проблема создания современных интеллектуальных систем управления энергетикой вытекает из существующих проблем перехода к цифровой энергетике. Эти проблемы анализировались, в том числе в [5]. В настоящее время намечается некоторый положительный сдвиг в решении выявленных когнитивных и управленческих проблем: на уровне руководителей энергетических компаний возникает понимание в необходимости цифровой трансформации отрасли, более глубоко осознаются преимущества внедрения новых технологий (главным образом в сфере электроэнергетики), а также принимаются во внимание потенциальные опасности, связанные с развитием киберфизических систем. В первой половине 2018 года, в соответствии с “Дорожной картой” развития цифровой экономики России, была разработана генеральная схема развития инфраструктуры хранения и обработки данных, учитывающая планы развития энергетической и телекоммуникационной инфраструктуры для обеспечения доступности услуг по хранению и обработке данных на всей территории России для граждан, бизнеса и власти. Однако экономических стимулов для перехода к цифровой энергетике, с одновременным отказом от финансирования “старых технологий” и имитации инновационной деятельности, не наблюдается.

Положительная тенденция к разрешению научных и технологических ограничений намечается внутри компаний топливно-энергетического комплекса. Исследовательские подразделения энергетических компаний проводят испытания отдельных элементов “цифровой сети” для отработки технологий и формирования типовых решений. В то же время в современных системах энергетики значительно увеличена и продолжает расти доля морально устаревшего и физически изношенного оборудования, что отражается и на снижении уровня автоматизации технологических процессов.

Высокая зависимость от импорта и, как следствие, увеличение внешнеполитических угроз негативно отражаются на безопасности отрасли в целом, что, ввиду ее критичности и инфраструктурных аспектов, может вызывать лавинообразное влияние на другие отрасли национальной экономики Российской Федерации. Выходом из сложившегося положения является стимулирование развития отечественного оборудования и технологий в отраслях энергетики, обновление производственных фондов за счет средств самих энергетических компаний и повышение требований к автоматизации технологических процессов на объектах энергетики. Требуются разработка и внедрение финансовой стратегии организации деятельности и управления энергетических компаний. Немаловажным является и создание системы комплексного прогнозирования, выявления, анализа и оценки рисков аварий на объектах энергетики.

Развитие сервисного подхода к созданию инфраструктуры нового поколения и интеграция информационно-телекоммуникационных технологий и систем энергоснабжения может иметь синергетический эффект. В частности, для безопасного функцио-

нирования объектов энергетики требуются системы мониторинга состояния оборудования, видеонаблюдения и контроля, использование которых базируется на сетях передачи данных, в свою очередь, такие системы мониторинга является составляющей частью “умного и безопасного города”. Одновременное комплексное развитие информационно-коммуникационных сетей и сетей передачи электроэнергии должно способствовать уменьшению совокупной стоимости их строительства и обслуживания, реализации новых возможностей по управлению и контролю сетей передачи электроэнергии и улучшению качества обслуживания конечных потребителей.

Все вышеперечисленное необходимо учитывать при разработке интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики.

В отчете о разработке стратегической программы исследований технологической платформы “Интеллектуальная энергетическая система России” (ИЭСР) (одним из участников которой является ИСЭМ СО РАН), подготовленном Российским энергетическим агентством в 2018 г. [6] (переработанная в 2019 г. версия отчета приведена в [7]), перечисляются *Ключевые технологии ИЭСР в сфере системного управления*, которые, как представляется, должны быть реализованы в интеллектуальных системах управления развитием и функционированием систем энергетики:

- технологии мониторинга и оценки ситуаций, включая оценку устойчивости состояния энергосистемы, выработки и принятия оперативных и долгосрочных решений, в том числе на основе мультиагентных систем, нейронных сетей и робототехнических комплексов, на всех уровнях иерархии управления ИЭСР (от объекта до энергосистемы);

- технологические модели энергосистемы, позволяющие осуществлять большой спектр аналитической обработки информации, начиная от оперативного и автоматического управления и заканчивая прогнозированием спроса и развития энергосистемы;

- системы автоматизированной организации торговли электроэнергией и различными видами услуг на электронных площадках;

- технологии унификации обмена данными на основе организуемого единого информационно-технологического пространства ИЭСР, включающие описание процессов управления, массивов характеристик объектов, средств измерения и управления, систем передачи информации и измерительных каналов, нормативно-справочной информации, организации защиты информационного пространства, включая кибербезопасность;

- технологии высокоскоростной передачи информации, хранения и обработки сверхбольших объемов информации в различном масштабе времени;

- технологии создания приложений (прикладных программ), обеспечивающих обработку и анализ данных, необходимые расчеты для принятия управленческих решений (в том числе в реальном масштабе времени), включаемые в состав агентов мультиагентных систем управления различного уровня и назначения [6].

Очевидно, что проблема создания интеллектуальных систем управления, поддерживающих эти технологии, может быть решена только поэтапно, с условием разработки и отладки отдельных элементов, с их последующей интеграцией. Для этого предлагается использовать концепцию цифровых двойников и цифровых образов.

**2. Понятия цифровых двойников и цифровых образов.** Следует отметить, что эти понятия до сих пор не устоялись и активно обсуждаются, хотя утверждается, что “цифровой двойник” вошел в десятку главных стратегических технологических трендов 2019 года.

Обзор понятий цифрового двойника выполнен, например, в [8], на основании источников [9–14]. Согласно мнению главного инженера подразделения “Интеллектуальные сети” компании Siemens Е. Литвиновой, “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” [15].

По мнению специалистов, на основе анализа, выполненного в [8], 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.

Например, 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. 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.). Эти вопросы рассмотрены подробнее в разделе 4.

С точки зрения области построения выделяют цифровых двойников продукта, процесса и системы [8]. “Цифровой двойник продукта” представляет собой виртуальную модель конкретного продукта. “Цифровой двойник процесса” имитирует 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. “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.

Понятие цифрового двойника часто подменяют понятием “цифровой тени”. 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 [8]. Сравнение цифровых двойников и цифровых теней рассматривается, например, А. Боровковым в [16].

Цифровые образы – это сравнительно новое понятие. В [17] руководителем Национального центра когнитивных разработок Университета ИТМО (СПб) д.т.н. А.В. Бухановским сопоставляются цифровые модели, цифровые двойники и цифровые образы.

“Цифровая модель” определяется как компьютерная программа, которая позволяет рассчитывать характеристики поведения реального объекта в различных условиях внешней среды и ставить над объектом виртуальные эксперименты, что особенно важно в ситуациях, когда реальный эксперимент неприемлемо дорог или даже опасен, что в полной мере относится к энергетике.

Понятие “цифрового образа”, помимо моделей и данных объекта техники, включает в себя поведенческие и когнитивные модели связанной с ним человеческой деятельности (например, операторов оборудования, административного персонала). Когнитивные технологии основываются также на цифровых моделях, однако предназначенных для имитации принятия решений человеком в условиях неопределенности на основе накопленного опыта. Отмечается, что при обилии разнообразных данных о поведении реального объекта или его цифрового двойника даже квалифицированный эксперт 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 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 [17]. Все вышесказанное можно отнести к разработке интеллектуальных систем поддержки принятия стратегических решений по развитию энергетики [5], используя, в том числе, когнитивные технологии. Представляется, что эти технологии могут быть применены при разработке интеллектуальных систем управления развитием энергетики.

**3. Интеграция математических, информационных и онтологических моделей в цифровых двойниках и цифровых образах энергетических систем и комплексов.** Возможность такой интеграции можно подтвердить схемой цифрового двойника, включающего математические, информационные и онтологические модели (рис. 1), на основе обобщения схемы, предложенной д.т.н. С.П. Ковалевым (ИПУ РАН) с соавторами в [18, 19]. Для нас важным в этой архитектуре является то, что главный компонент цифрового двойника – комплекс математических и экономических расчетных, имитационных, нейросетевых моделей, описывающих все аспекты поведения объекта. Возможно использование механизмов калибровки моделей в целях повышения их достоверности, в том числе путем машинного обучения [20]. В целях обеспечения удобного доступа к моделям в составе цифрового двойника их часто оформляют как сервисы [21]. Кроме того, в рис. 1 для нас важно, что слой математических моделей цифрового двойника “собирается” над онтологической моделью. 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 построении интеллектуальных систем управления функционированием соответствующих систем энергетики.

Целесообразно рассматривать следующие этапы перехода к построению “цифровых двойников”, основанному на исследованиях отраслевых энергетических систем:

- 1) анализ существующих математических моделей и реализующих их компьютерных программ (программных комплексов);
- 2) онтологический инжиниринг предметной области (соответствующих энергосистем) и построение онтологических моделей;
- 3) модификация, при необходимости, математических моделей и реинжиниринг программ и программных комплексов (если последние перешли в категорию унаследованного программного обеспечения – *legacy software*);
- 4) определение исходных данных (состав, источники получения, возможность получения оперативных данных, базы данных и др.);

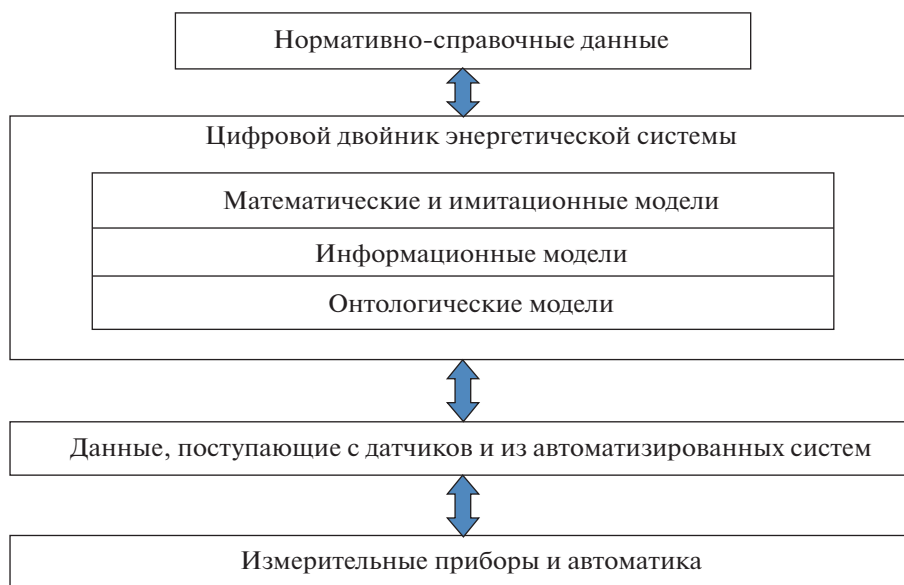


Рис. 1. Архитектура цифрового двойника энергетической системы.

5) разработка *web*-приложений и *web*-сервисов (или агентов-сервисов) для реализации цифровых двойников на основе прошедших реинжиниринг компьютерных программ;

6) реализация цифровых двойников энергетических систем (двойников–прототипов).

Более сложной задачей является построение “цифровых образов”, основанных на исследованиях развития ТЭК, которые, в свою очередь, могут использоваться при создании интеллектуальных систем управления развитием энергетики. Здесь ставится задача интеграции математических и семантических моделей (в первую очередь – когнитивных), опыт разработки которых отражен в [22, 23]. Полная библиография работ в области построения и применения интеллектуальных и когнитивных технологий приведена в [24].

При переходе к “цифровым образам” к вышеперечисленным этапам добавятся (после этапа 4) следующие этапы:

- Разработка когнитивных технологий (на основе семантических моделей);
- Интеграция математических моделей и когнитивных технологий;
- Реализация цифровых образов (прототипов) (аналогично цифровым двойникам-прототипам).

При этом необходимо использовать большой опыт проведения онтологического инжиниринга и построения онтологических моделей систем энергетики и ТЭК в целом (например, [25]).

**4. Вопросы информационной обеспеченности при разработке цифрового двойника ЕЭС России для управления ее режимами.** Сложившаяся к настоящему времени эффективно работающая иерархическая система диспетчерского и автоматического управления режимами Единой энергетической системы (ЕЭС) России обеспечивается детальной текущей измерительной информацией, получаемой от традиционных и векторных средств измерений систем SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) и СМПП (Система мониторинга переходных режимов). На основе получаемых данных формируются текущие информационные модели ЕЭС, Объединенных и Региональных

энергетических систем, являющиеся основой для решения технологических задач мониторинга и прогнозирования режимов и управления ими, реализуемых системой EMS (Energy Management System) на каждом уровне территориальной иерархии. Для управления режимами ЭЭС вырабатываются управляющие воздействия, выполняемые диспетчером и системой автоматического управления. Вопросы обработки информационных потоков при мониторинге и управлении режимами интеллектуальных электроэнергетических систем рассматривались, в частности, в [26].

Разработанная и используемая Системным оператором (СО) ЭЭС России распределенная иерархическая информационная модель ЭЭС является представительной развитой базой для формирования цифрового двойника энергообъединения на всех уровнях территориальной иерархии. Работа по формированию информационных моделей цифрового двойника представляется целесообразной по следующим направлениям.

- Цифровой двойник ЭЭС формируется как единое информационное пространство энергообъединения, реализованное по общим принципам и распределенное по уровням территориальной иерархии управления. На основе информации цифрового двойника с использованием единых принципов и методов конструируются информационные модели для решения конкретных задач управления режимами на каждом уровне иерархии. Отмеченные принципы формирования единого цифрового двойника ЭЭС гарантируют непротиворечивость результатов решения различных задач управления режимами энергообъединения на различных уровнях.

- Разработка и использование цифрового двойника ЭЭС, учитывая масштабы энергообъединения, необходимую детальность представления элементов системы и информационные возможности используемых средств измерения, связаны с работой с большими данными. Современные средства информационного обеспечения задач управления режимами (SCADA, СМПП) уже сейчас предоставляют огромные объемы информации [27], при этом полезно используется ее незначительная доля. Расширение этой доли может дать импульс к пониманию новых неожиданных, полезных или негативных, свойств объекта управления.

- При обработке и анализе больших объемов данных целесообразно использовать CIM-модели (Common Information Model) [28]. Технология CIM-моделей, основываясь на формате данных ODM (Open Model for Exchanging Power System Simulation Data), позволяет формировать модели любой сложности, которые потом могут быть конвертированы в любой известный или новый формат данных, используя дополнительно подключаемые модули. ODM является международным открытым стандартом обмена данными для моделирования ЭЭС, поддерживает расчеты динамических процессов. Модели CIM и ODM, в частности, используются в открытой информационной среде для решения энергетических задач InterPSS (международный проект, в разработке которого, в том числе, принимали участие сотрудники ИСЭМ СО РАН) [29]. Информация в формате CIM хранится в базе данных и может быть использована в различных приложениях ИТ-инфраструктуры при создании цифрового двойника ЭЭС и интеллектуальной системы управления ее режимами.

- В качестве технологий интеллектуальной поддержки принятия решений диспетчером целесообразно исследовать возможности онтологического, когнитивного и событийного моделирования, интегрированные в рамках ИТ-инфраструктуры. В последующем эти интеллектуальные технологии могут быть дополнены технологиями искусственных нейронных сетей, нечетких множеств и нечеткой логики, вейвлет-анализа и др.

Таким образом, цифровой двойник ЭЭС основывается на единой распределенной базе данных, которая должна быть интегрирована с другими ИТ-системами. Цифровой двойник должен синхронизировать информацию из разных источников таким об-

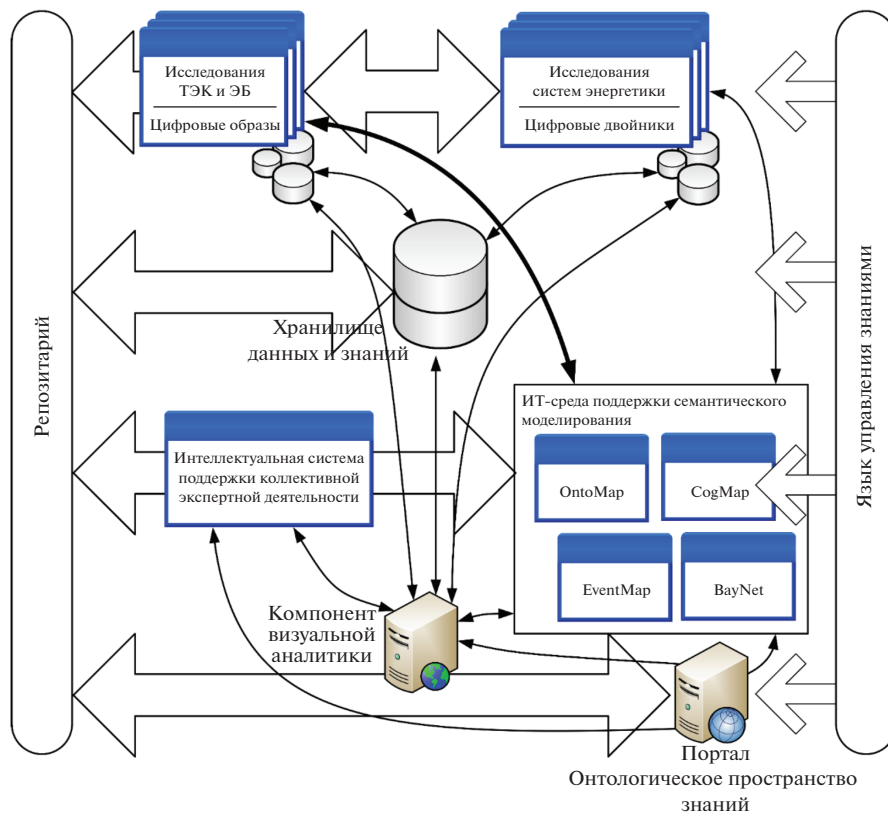


Рис. 2. Модифицированная архитектура многоагентной интеллектуальной среды (МАИС) как основа построения ИТ-инфраструктуры для разработки и исследования цифровых двойников и цифровых образов.

разом, чтобы они однозначно соответствовали текущему состоянию системы и с требуемой точностью отражали характеристики элементов и системы в целом.

Опираясь на анализ приведенных источников и собственный опыт в области разработки интеллектуальных СППР и ИТ-инфраструктуры научных исследований, авторы предлагают изложенный далее подход к организации системных исследований в энергетике с использованием современных концепций цифровизации, основанный на создании интеллектуальной ИТ-инфраструктуры.

**5. Существующие предпосылки создания ИТ-инфраструктуры для разработки и исследования цифровых двойников и цифровых образов.** В [5] были рассмотрены основные уровни (этапы) исследований и поддерживающие их инструментальные средства и предложена архитектура многоагентной интеллектуальной инструментальной среды (МАИС) на основе разработанного подхода к построению многоагентных систем, изложенного в [30]. На рисунке 2 приведена модифицированная архитектура МАИС, которую предлагается рассматривать как основу разрабатываемой ИТ-инфраструктуры.

Модификация заключается в первую очередь в том, что при реализации ИТ-инфраструктуры предлагается исследования топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и проблем энергетической безопасности (ЭБ) (см. рис. 2 вверху слева) основывать на «цифровых образах» ТЭК, а исследования отраслевых систем энергетики (см. рис. 2



вверху справа) – на “цифровых двойниках” соответствующих систем, что потребует выполнения выше перечисленных этапов перехода от существующих математических моделей и реализующих программных комплексов и БД к цифровым двойникам и цифровым образам. Соответственно, это повлияет на характер взаимосвязей между компонентами ИТ-инфраструктуры, в первую очередь, с Хранилищем данных и знаний, Репозитарием и Порталом, поддерживающим онтологическое пространство знаний.

Основными компонентами ИТ-инфраструктуры являются следующие:

1. Цифровые образы ТЭК и цифровые двойники отраслевых систем энергетики на основе математических моделей и баз данных для исследований ТЭК и отраслевых систем энергетики.

2. Хранилище данных и знаний (для хранения баз знаний, семантических моделей и баз данных).

3. Интеллектуальная ИТ-среда для поддержки семантического моделирования, интегрирующая инструментальные средства *OntoMap*, *CogMap*, *EventMap*, *BayNet* и компонент для интеграции семантических и математических моделей.

4. Интеллектуальная система поддержки коллективной экспертной деятельности, интегрирующая проблемно-ориентированные экспертные системы и обеспечивающая поддержку согласования экспертных решений.

5. Средства визуальной аналитики и когнитивной графики, основанные на 3D-визуализации (развитие Геокомпонента).

6. Репозитарий для хранения описаний всех интеллектуальных и информационных ресурсов, поддерживаемых МАИС.

7. Язык управления знаниями (*Knowledge Management Language – KML*) для обеспечения взаимосвязи и взаимодействия всех компонентов (агентов) МАИС.

8. Портал, поддерживающий онтологическое пространство знаний в области энергетики.

9. Средства обеспечения кибербезопасности.

Следует отметить, что имеются реализации научных прототипов основных компонентов МАИС, перечисленные выше. Целесообразность и возможность перехода от математических моделей и компьютерных программ в исследованиях энергетики к цифровым двойникам и цифровым образам подробно обосновывалась в [31].

Предполагаются две стадии построения цифровых двойников и цифровых образов: 1) разработка технологии, основанной на сборе информации и ее хранении для выполнения исследований и построения опытных образцов – прототипов цифровых двойников и цифровых образов, в рамках ИТ-инфраструктуры комплексных иерархических исследований в энергетике; 2) разработка технологии, основанной на апробации взаимодействия прототипов цифровых двойников и цифровых образов с информационными потоками, как основы для создания интеллектуальных систем управления развитием и функционированием энергетических систем и комплексов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается подход к построению ИТ-инфраструктуры для создания интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики, основанный на использовании цифровых двойников и цифровых образов, разработка и отладка которых выполняются в ходе проведения системных исследований энергетики, при поддержке интеллектуальной ИТ-инфраструктуры. Рассмотрены основные понятия современных трендов: цифровой двойник, цифровой образ, цифровая тень. Показано, что в ИСЭМ СО РАН имеются все предпосылки для реализации предлагаемого подхода как в области математического моделирования, так и в области онтологического инжиниринга и когнитивных технологий. Рассмотрены вопросы информационной обеспеченности на примере цифрового двойника ЕЭС России для управле-

ния ее режимами. Для поддержки таких исследований обосновывается необходимость разработки соответствующей ИТ-инфраструктуры. Приведена модифицированная архитектура многоагентной интеллектуальной инструментальной среды (МАИС), которая может стать основой такой инфраструктуры. Перечислены основные компоненты МАИС, научные прототипы которых уже реализованы.

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; авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердников Р.Н., Бушуев В.В., Васильев С.Н., Веселов Ф.В., Воронай Н.И. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. М.: ФСК ЕЭС, 2012. 219 с.
2. Воронай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Изв. РАН. Энергетика. 2014. № 1. С. 64–78.
3. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воронай. Новосибирск: Наука, 2010. 686 с.
4. Воронай 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. № 3. С. 35–44.
5. Масель Л.В. Методы и интеллектуальные технологии научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики / Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 30–42.
6. Отчет о разработке стратегической программы исследований технологической платформы “Интеллектуальная энергетическая система России” [http://rosenergo.gov.ru > data > attach](http://rosenergo.gov.ru/data/attach) (дата обращения 25.03.2020).
7. Технологическая платформа “Интеллектуальная электроэнергетическая система России” [http://rosenergo.gov.ru/regulations\\_and\\_methodologies/tehnologicheskaya\\_platforma\\_tp\\_ies](http://rosenergo.gov.ru/regulations_and_methodologies/tehnologicheskaya_platforma_tp_ies) (дата обращения 09.04.2020).
8. Кокорев Д.С., Юрин А.А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса. *Colloquium-journal* // Technical science. 2019. № 10(34). С. 31–35. <https://doi.org/10.24411/2520-6990-2019-10264>
9. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies // *IEEE MultiMedia*. 2018. V. 25. №. 2. P. 87–92.
10. 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. P. 1818.
11. Michael W. Grieves. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC. 2014. 7 p.
12. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-PapersOnLine. 2015. P. 567–572.
13. Söderberg R. et al. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production // *CIRP Annals*. 2017. T. 66. № 1. P. 137–140.
14. Tao F. et al. Digital twin-driven product de-sign framework // *International Journal of Production Research*. 2018. P. 1–19.
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. Боровков А. Цифровые двойники и цифровые тени в высокотехнологичной промышленности. Режим доступа: <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoyniki-i-cifrovie-teni-v-visokotekhnologichnoi-promishlennosti> (дата обращения 24.11.2019).
17. Бухановский А.В. Цифровые двойники ведут нас в седьмой технологический уклад // Газета “Энергетика и промышленность России”. № 07(363), апрель 2019 г.
18. Андриюшкевич С.К., Ковалев С.П., Неведов Е. Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем // *Цифровая подстанция*. 2019. № 12. С. 38–43.
19. Andryushkevich S.K., Kovalyov S.P., Nefedov E. Composition and application of power system digital twins based on ontological modeling // *Proc. 17<sup>th</sup> IEEE Intl. Conf. on Industrial Informatics INDIN’19*. Helsinki-Espoo, Finland: IEEE. 2019. P. 1–6.
20. Frolov D. How machine learning empowers models for digital twins // *Benchmark*. July 2018. P. 48–53.

21. *Qia Q., Taao F., Zuoa Y., Zhaob D.* Digital twin service towards smart manufacturing // *Procedia CIRP*. 2018. V. 72. P. 237–242.
22. *Массель Л.В., Массель А.Г.* Интеллектуальные вычисления в исследовании направлений развития энергетики // *Известия Томского политехнического университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2012. Т. 321. № 5. С. 135–141.
23. *Массель Л.В., Массель А.Г.* Семантические технологии на основе интеграции онтологического, когнитивного и событийного моделирования // *Открытые семантические технологии для интеллектуальных систем*. Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. 2013. № 3. С. 247–250.
24. *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.
25. *Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И.* Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике // *Онтология проектирования*. 2017. Т. 7. № 1(23). С. 66–76.  
<https://doi.org/10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76>
26. *Массель Л.В., Колосок И.Н., Гурина Л.А.* Обработка информационных потоков при мониторинге и управлении режимами интеллектуальных электроэнергетических систем / *Вестник ИрГТУ*. 2013. № 2(73). С. 30–35.
27. *Дубинин Д.М.* Актуальные задачи развития и применения технологии синхронизированных векторных измерений для задач управления в электроэнергетике // *Доклад на заседании НТС СО ЕЭС*. (06.12. 2019).
28. *Кирпичев К.Ю., Соловьев С.Ю.* Интеграция информационных систем предприятий электроэнергетики на базе СИМ-модели // *Информатизация и системы управления в промышленности*. 2008. № 3(19).
29. *Массель Л.В., Бахвалов К.С.* Открытая интеграционная среда InterPSS как основа ИТ-инфраструктуры Smart Grid / *Вестник ИрГТУ*. 2012. № 7(67). С. 6–10.
30. *Массель Л.В., Гальперов В.И.* Разработка многоагентных систем распределенного решения энергетических задач с использованием агентных сценариев // *Известия Томского политехнического университета*. 2015. Т. 326. № 5. С. 45–53
31. *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.  
<https://doi.org/10.25729/2413-0133-2019-4-01>

## IT-Infrastructure for Construction of Intelligent Management Systems of Development and Functioning of Energy Systems Based on Digital Twins and Digital Images

N. I. Voropai<sup>a</sup>, L. V. Massel<sup>a</sup>, I. N. Kolosok<sup>a</sup>, and A. G. Massel<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>*Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

*\*e-mail: amassel@gmail.com*

An approach to the construction of IT-infrastructure for creation of intelligent management systems for the development and functioning of energy systems is proposed, based on the application of the results of system studies of energy sector using modern conceptions – digital twins and digital images. The role of cognitive technologies in creating of digital images is considered. Two stages of building digital twins and digital images are distinguished: 1) development of a technology based on the collection of information and its storage for research and construction of the digital twins and digital images prototypes; 2) development of a technology for testing the interaction of the digital twins and digital images prototypes with information flows, as the basis for creating of intelligent management systems for the development and functioning of energy systems and complexes. The issues of information procuring are considered on the example of the development of a digital double of EES for controlling its modes. It is proposed to develop an IT-infrastructure for complex hierarchical studies of energy to support these technologies, based on a modified architecture of a multi-agent intelligent instrumental environment and available prototypes of its basic components.

*Keywords:* energy systems, intelligent management systems, digital twins, digital images, mathematical, informational, ontological models, cognitive technologies