

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.82: 620.9

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-44-54



Семантическое моделирование при построении цифровых двойников энергетических объектов и систем

© 2023, Л.В. Массель ✉, А.Г. Массель

Институт систем энергетики им. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация

Рассматривается задача построения цифровых двойников и умных цифровых двойников для моделирования и управления в энергосистемах. Под энергосистемой понимается совокупность энергетических ресурсов всех видов, методы их получения (добычи), преобразования, распределения и использования, а также технические средства и организационные комплексы, обеспечивающие снабжение потребителей различными видами энергии. Анализируются интегрированные интеллектуальные энергосистемы и основные направления цифровизации энергетики. Рассмотрены понятие «цифровые двойники» в технических сферах, онтологический подход к построению цифровых двойников и семантические модели построения умных цифровых двойников. Предложено использование фрактального подхода при выполнении онтологического инжиниринга, который даёт возможность формализации понятий предметной области и позволяет строить разномасштабные онтологии с использованием метауровней онтологий. Представлены модели цифровых двойников и умных цифровых двойников. Разработанные подходы проиллюстрированы на примерах построения цифрового двойника солнечной электростанции и умного цифрового двойника топливно-энергетического комплекса. Описанный в статье подход даёт возможность интеграции цифровых и умных цифровых двойников разных уровней в единое цифровое решение при моделировании объектов энергетики и энергосистем.

Ключевые слова: интегрированные интеллектуальные энергосистемы, цифровой двойник, фрактальный подход, онтологии, семантические модели.

Цитирование: Массель Л.В., Массель А.Г. Семантическое моделирование при построении цифровых двойников энергетических объектов и систем // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №1(47). С.44-54. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-1-44-54.

Финансирование: работа выполнена в рамках проекта по госзаказу ИСЭМ СО РАН, № AAAA-A21-121012090007-7, тема № FNEU-2021-0007.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Разработка интегрированных интеллектуальных энергетических систем (ИИЭС) – одна из важных тенденций в российской энергетике. Энергетика является инфраструктурной отраслью, основная задача которой – обеспечение энергоснабжения потребителей с требуемой надёжностью и приемлемым качеством энергоносителя [1-5].

Инфраструктурная роль присуща системам электро-, газо- и теплоснабжения, имеющим развитую транспортную и распределительную сетевую инфраструктуру. Эти энергетические системы принято подразделять на производственные, транспортные и энергоснабжающие [1]. Производственные и транспортные энергетические системы интегрируются при использовании энергоносителя одной системы в другой (например, газ в качестве топлива на элек-

тростанциях и котельных, электроэнергия на газоперекачивающих агрегатах и т.д.). Эта интеграция определяет ведущую роль энергетических систем в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК).

До недавнего времени интеграция систем электро-, тепло- и газоснабжения рассматривалась на уровне источников электроэнергии и тепла (тепловые электростанции). С появлением у потребителей возможностей выбора устройств использования энергии, в качестве обобщения этих возможностей было введено понятие «энергохаб» [2, 3]. Такая централизация требует реализации новых принципов построения ИИЭС и создания интеллектуальных систем управления (ИСУ) с развитым информационно-коммуникационным обеспечением.

В [2, 3] структура ИИЭС представлена в трёх уровнях. На первом уровне – системы электро-, газо- и теплоснабжения, на втором – уровни микро-, мини- и макросистемы; на третьем, функциональном уровне, – энергетические функции (производство, транспорт, распределение и потребление энергоресурсов), коммуникационные и управляющие функции (получение информации, её обработка, передача и представление, системы управления режимами и развития ИИЭС) и функции принятия решений (модели и методы обоснования решений по разработке ИИЭС).

Наряду с использованием методов искусственного интеллекта (ИИ) в ИИЭС всё большее внимание энергетиков привлекают так называемые «системы целеполагания» [4, 5]. Это ИСУ, имеющие несколько целей функционирования или способные генерировать эти цели, выбирать наиболее подходящую цель в зависимости от среды, прогнозировать поведение среды и собственное состояние. Для систем с неполной информацией и высокой сложностью объектов управления, таких как энергосистемы, всё более актуально использование ситуационных методов управления на основе интеллектуальных технологий [6], а также развитие семиотического подхода к построению интеллектуальных системы поддержки принятия решений [7].

Принятие в России программ «Цифровая экономика» [8] и «Цифровая энергетика» [9] потребовало цифровой трансформации энергетики. Цифровая трансформация, как переход к цифровому обществу, включает следующие направления: формирование нового варианта экономических отношений (цифровая экономика); построение нового уровня отношений общества и государства (цифровое правительство); создание высокотехнологичной инфраструктуры (цифровое пространство) [10]. Данная статья посвящена работам, проводимым в третьем направлении.

Цифровые двойники (ЦД) – важный тренд цифровизации. Технологии ЦД сегодня активно используются в различных областях техники, в том числе и в энергетике в России [11–14] и за рубежом [15–21]. В настоящее время ЦД представляет собой реальное отображение всех компонентов жизненного цикла объекта с использованием физических данных, виртуальных данных и данных о взаимодействии между ними [15]. ЦД объединяет информацию о показателях эффективности объекта и его детальную математическую модель (ММ), параметры которой уточняются с использованием реальных данных [17].

ЦД включает пять программных компонентов [22]:

- ядро ЦД – математические, имитационные и информационные модели;
- системы наблюдения, распознавания и сбора данных, системы мониторинга и управления, обеспечивающие сбор данных с физического объекта, мониторинг и управление физическим объектом (физический элемент/физическая часть ЦД);
- системы, обеспечивающие хранение собранных данных, – реляционные СУБД, СУБД с открытым исходным кодом, облачные хранилища, распределённые файловые системы и др.;

- сервисные элементы, предоставляющие сервисы и интерфейс для клиентов – инструменты для поддержки сервисов оптимизации, математического моделирования, прогнозирования и т.д.;
- платформа Интернета вещей, обеспечивающая связи между компонентами.

ЦД хорошо зарекомендовали себя на разных этапах жизненного цикла объектов и систем. Основная проблема при построении ЦД – это отсутствие единой концепции взаимосвязи и общего взаимодействия различных уровней управления. В статье предложено использовать ЦД для моделирования и интеллектуального управления энергетическими объектами и системами, которые объединяются единой концепцией.

1 Предлагаемые подходы и методы

Вариант онтологического подхода к построению ЦД предложен в [13, 14]. В этих работах в отличие от работ [23-25] рассматривается обобщённый подход к построению не только ЦД отдельных объектов, но и ЦД систем. На основе анализа [11, 12] построена обобщённая архитектура ЦД энергосистемы (подробно рассмотрена в [14]). ЦД получает данные от датчиков, измерительных и автоматизированных систем, а также из баз нормативных и справочных данных. Ядром ЦД являются математические (ММ)¹ и имитационные, информационные и онтологические модели. Взаимодействие всех типов моделей в ЦД основывается на онтологических моделях.

В соответствии с тремя уровнями управления: оперативным, тактическим и стратегическим [26] в энергетике выделяют следующие уровни: объектное управление (функционирование объектов), системное управление (функционирование систем) и управление развитием ТЭК (стратегическое управление). Наиболее сложным является стратегическое управление.

При решении задач управления функционированием энергосистем могут найти применение интеллектуальные модели, причём не только для формирования рекомендаций оперативному персоналу, принимающему решения, но и как самостоятельные элементы многоагентного управления. Интеллектуальные модели позволяют проводить необходимые расчёты в режиме реального времени и адаптировать устройства автоматики энергосистем для изменения уставок релейной защиты и противоаварийной автоматики, специального автоматического отключения нагрузки и отбора резервов мощности у потребителя и в генерирующих установках [27].

При управлении развитием ИИЭС возрастает роль прогнозирования. В [27] выделены три типа прогнозирования.

- *Количественное прогнозирование*, когда на основе ММ многосвязной системы (включая взаимосвязь энергетики и экономики, социальной и технологической сфер) при сохранении структуры и тенденций общего развития получают новые оценки и формулируют будущие параметры экономического и энергетического развития.
- *Качественное прогнозирование*, когда экспертно выбираются несколько сценариев будущего развития, и из этих сценариев выбирается тот, который наиболее соответствует представлениям заказчика и исполнителя этого прогноза.
- *Когнитивное прогнозирование*, когда у эксперта формируется целевое видение будущей системы и путей достижения этого будущего.

Для анализа тенденций в стратегическом управлении предлагается использовать семантические модели, которые включают онтологические, когнитивные, событийные и вероят-

¹ Представляется, что ММ энергетических объектов и систем, широкий спектр которых разработан в Институте систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, могут быть использованы при построении ЦД энергетических объектов и систем.

ностные модели [6, 7]. Онтологическому инжинирингу посвящены работы [28, 29], применение когнитивных моделей описано, например, в [30, 31].

Для управления энергетическими объектами достаточно использовать традиционные ЦД. При управлении энергосистемами могут потребоваться элементы интеллектуальных технологий, а при стратегическом управлении (управлении развитием ТЭК) потребуется интеллектуальный, или умный, ЦД (УЦД). В отличие от [32], где УЦД понимается как виртуальная модель, которая может имитировать планирование на основе методологии глубокого обучения с подкреплением, предлагается расширить содержание данного понятия и использование методов машинного обучения дополнить методами работы с экспертными знаниями.

Модель ЦД (*Digital Twin – DT*) может быть представлена следующим образом:

$$DT = (IM, MM, DB, VT, SE, RC),$$

где *IM* – информационные модели; *MM* – ММ; *DB* – базы данных (БД); *VT* – средства визуализации, *SE* – необходимые сервисные компоненты; *RC* – средства связи между компонентами в режиме реального времени.

Методы ИИ и перечисленные программные компоненты, необходимые для построения ЦД, интегрируются в УЦД.

Модель УЦД (*Smart Digital Twin – SDT*) может быть представлена следующим образом:

$$SDT = (IM, MM, DB, VT, SE, RC, SM, ES, KB),$$

где *SM* – семантические модели, *ES* – экспертные системы, *KB* – базы знаний.

В свою очередь *SM = (OM, CM, EM, PM)*, где *OM* – онтологические модели, *CM* – когнитивные модели, *EM* – событийные модели, *PM* – вероятностные модели.

Построение ЦД включает шесть этапов:

- 1) анализ существующих ММ и программ для ЭВМ, их реализующих;
- 2) онтологический инжиниринг предметной области (соответствующей энергосистемы) и построение онтологических моделей;
- 3) определение исходных данных (состав, источники поступления, возможность получения оперативных данных, БД и т.д.) и характера их взаимодействия с ММ;
- 4) модификация, при необходимости, ММ и реинжиниринг программ и программных комплексов;
- 5) разработка на основе реинжиниринга программных комплексов веб-приложений и веб-сервисов для реализации ЦД;
- 6) внедрение прототипов ЦД для энергетических объектов и систем.

При разработке УЦД добавляется этап анализа интеллектуальных технологий и средств ИИ и их интеграции в УЦД.

При построении онтологий используется фрактальный подход [33], где под фрактальностью понимается возможность использования одни и те же технологии построения для онтологий разного масштаба. Графически фрактальную стратифицированную модель (ФС-модель), описывающую информационное пространство, можно представить в виде набора вложенных сферических оболочек (страт или слоёв), где каждая страта (слой) объединяет информационные модели одного типа. На практике не работают со всем информационным пространством, а только с его частью (сектором), которую можно представить, например, в виде конуса. На рисунке 1 показана ФС-модель, в которой представлены конусы, описывающие четыре типа стратификации: 1) *по типу управления* (оперативное, тактическое, стратегическое); 2) *по функциональным уровням* построения ЦД (ТЭК, энергетические системы, объекты энергетики, где степень агрегации возрастает с каждым слоем); 3) *по типам ЦД* (УЦД на уровне ТЭК, ЦД и УЦД на уровне энергосистем, ЦД на уровне объекта); 4) *по типам моделей* (модели знаний в экспертных системах, семантические модели, ММ). Используется отображение между слоями (от любого слоя к каждому) [33].

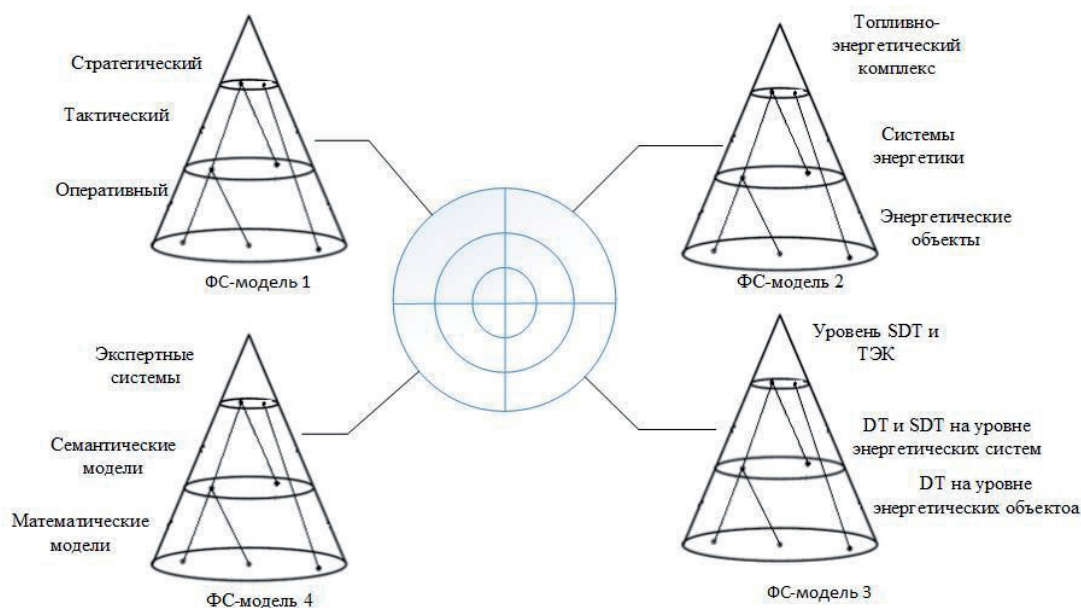


Рисунок 1 – Фрактальная стратифицированная модель, объединяющая ФС-модели для четырёх секторов

Например, для слоя типов моделей (4): $F_S^M: D_M \rightarrow D_S$ – отображение из слоя ММ в слой семантических моделей; $F_K^S: D_S \rightarrow D_K$ – отображение из слоя семантических моделей в слой моделей знаний; $F_K^M: D_M \rightarrow D_K$ – отображение из слоя ММ в слой моделей знаний. Допускаются обратные отображения, например: $F_M^S: D_S \rightarrow D_M$ – отображение из слоя семантических моделей в слой ММ. Для каждого слоя есть инструменты построения моделей разработаны программные продукты, поддерживающие онтологическое, когнитивное, событийное и вероятностное моделирование, а также соответствующие ММ. Отображения поддерживаются соответствующими инструментами. В частности, используется онтологическое пространство знаний, в котором присутствуют связи между основными терминами и их отображения в различных моделях.

2 Полученные результаты

Результаты применения предложенных подходов представлены для двух уровней управления: управления объектами энергетики и стратегического управления развитием ТЭК.

Используя фрактальный подход [33], строится иерархическая система онтологий, на верхнем уровне которой - метаонтология энергетической системы, определяющая её метаконцепты и отношения между ними, на втором уровне она детализируется. Например, метаконцепт «Электроэнергетические системы» детализируется понятиями выработки электроэнергии: гидро-, тепло- электростанции, возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и т.д.

На рисунке 2 представлена онтология архитектуры ЦД солнечной электростанции, интегрирующая цифровую модель, цифровую тень, ММ, методы машинного обучения для прогнозирования погодных условий и др. Интеграция моделей осуществляется за счёт использования единого онтологического пространства знаний, в котором представлены отображения уровней систем, уровней управления, различных моделей и связей концептов в этих моделях. Использование онтологий на уровне проектирования ЦД позволило выявить основные информационные потоки, получаемые с объектов, формализовать основные факторы, которые необходимы для использования в ММ. На основе онтологического инжиниринга спроектированы БД, в которые поступают оперативные данные с датчиков, на основании этих данных строится цифровая модель.

Оперативные данные используются также вычислителем на основе ММ. При формировании онтологий объектов ВИЭ и их ЦД удалось сгруппировать агрегированные данные, необходимые для применения на следующих уровнях управления [34].

Для стратегического управления развитием ТЭК предлагается реализация УЦД, ядром которого является программный комплекс (ПК) INTEC-A (результат реинжиниринга ПК для исследований направлений развития ТЭК с учётом требований энергобезопасности). Описание архитектуры ПК приводится в [35].

УЦД реализуется за счёт автоматизации сбора входной информации с уровней энергетических систем и добавления средств семантического моделирования для внесения и моделирования различных угроз и мероприятий экспертами-энергетиками. Совместное использование ММ и экспертных знаний позволяет рассматривать ситуации с



Рисунок 2 – Онтология архитектуры ЦД солнечной электростанции

большой степенью неопределённости. Так, на данном этапе исследований осуществлена интеграция когнитивных моделей с ММ ТЭК. Это позволяет эксперту взаимодействовать с ММ, используя графическое представление когнитивных моделей в виде когнитивных карт с отображением концептов, характеристики которых автоматически собираются из ММ.

За счёт использования единой методологии построения ЦД и УЦД решается задача получения актуальных данных непосредственно с объектов при условии встраивания объектов в систему ЦД. На рисунке 3 отображена онтология верхнего уровня, описывающая взаимодействия ЦД и УЦД в ТЭК.

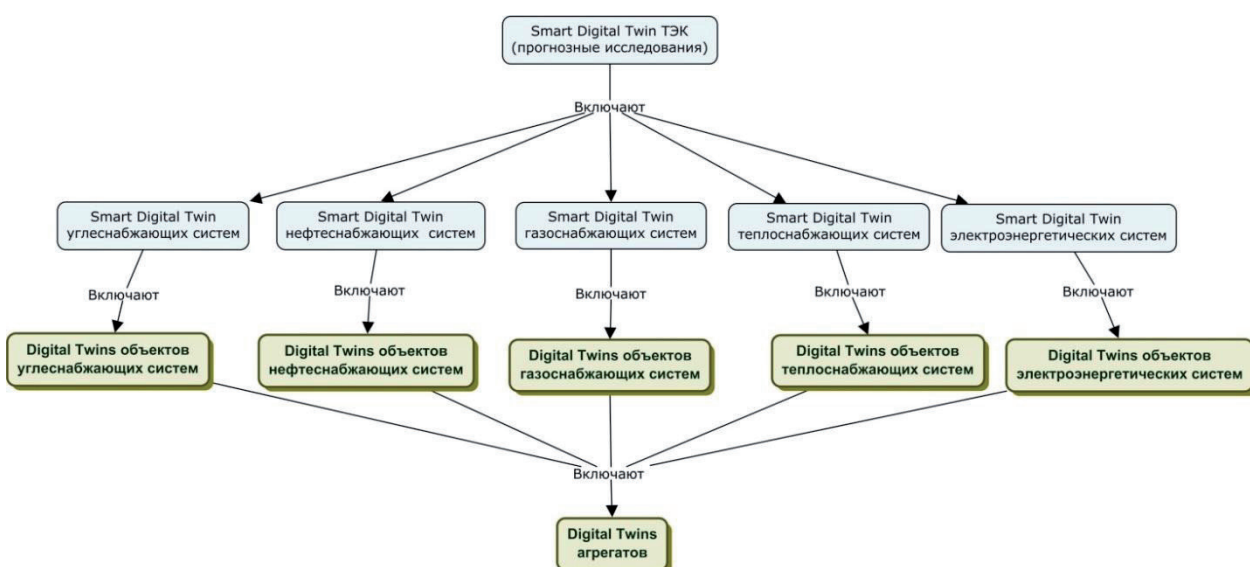


Рисунок 3 – Онтология верхнего уровня, описывающая взаимодействия ЦД и УЦД в ТЭК

Взаимодействие ЦД начинается с уровня агрегатов, которые объединяются сначала на уровне объектов энергетических систем, затем учитываются в УЦД энергетических систем, и потом агрегируются на уровне УЦД ТЭК в целом. Данный подход позволит решить проблемы с актуализацией необходимой информации.

Заключение

В статье рассмотрена концепция ИИЭС и связанная с ней проблема интеллектуального управления энергосистемами.

На основе онтологического подхода к построению ЦД в энергетике предложена обобщённая архитектура УЦД энергетических систем, включающая математические, информационные и онтологические модели. При построении ЦД в электроэнергетике планируется использовать ММ энергетических объектов и систем, которые разработаны в ИСЭМ СО РАН.

Описаны предложенные модели ЦД и УЦД. Модель ЦД включает: информационные модели, ММ, БД; инструменты визуализации, необходимые сервисные компоненты, средства связи между компонентами. Модель УЦД дополнительно включает семантические модели, базы знаний и экспертные системы.

При разработке онтологий использован фрактальный подход, позволяющий строить разномасштабные онтологии с использованием одних и тех же методов.

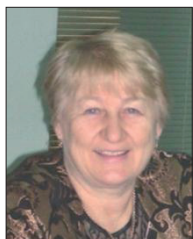
Предложенные подходы построения ЦД и УЦД иллюстрируются их применением при разработке ЦД солнечной электростанции и УЦД ТЭК. Предложена архитектура ЦД солнечной электростанции, объединяющая ММ и реализующую её цифровую модель, а также цифровую тень и реализующую её БД.

Список источников

- [1] *Бушуев В.В., Каменев А.С., Кобец Б.Б.* Энергетика как инфраструктурная «система систем» / Энергетическая политика. 2012. № 5. С.3-14.
- [2] *Воропай Н.И., Стенников В.А., Сендеров С.М., Барахтенко Е.А. и др.* Интегрированные инфраструктура энергетических систем регионального и межрегионального уровня / Энергетическая политика. 2015. Т.3. С.24-32.
- [3] *Воропай Н.И., Стенников В.А., Сендеров С.М.* Интегрированные интеллектуальные системы в энергетике России / Системные исследования в энергетике: методология и результаты. Под редакцией А.А. Макарова и Н.И. Воропая. М.: ИНЭИ РАН. 2018. С.87-101.
- [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 / Инновационная энергетика-21. Под редакцией В.М. Батенина, В.В. Бушуева, Н.И. Воропая. М.: ПК «Энергия». 2017. С.181-193.
- [6] *Массель Л.В., Массель А.Г.* Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетики // Известия Томского политехнического университета. 2012. № 5. Управление, вычислительная техника и информатика. С.135-141.
- [7] *Massel L.V., Massel A.G.* Intelligent system of semiotic type for decision-making support in Russia energy sector based on situational management conception / Proceedings of IV International scientific conference "Information technologies in science, management, social sphere and medicine" (ITSMSSM 2017) // Advances in Computer Science Research (ACSR). Volume 72, 2017. P.423-429. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020902019>.
- [8] «Цифровая экономика РФ». Минцифры России. Последнее обновление: 9 августа 2022. https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/?utm_referrer=https%3a%2f%2fwww.google.com%2f.
- [9] Ведомственный проект «Цифровая энергетика». <https://minenergo.gov.ru/node/14559>.
- [10] *Сойфер В.А.* Human fActor // Онтология проектирования. 2021. Т.11, №1(39). С.8-19. DOI:10.18287/2223-9537-2021-11-1-8-19.
- [11] *Андрюшкевич С.К., Ковалев С.П., Нефедов Е.А.* Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергосистем // Цифровая подстанция. 2019. № 12. С.38-43.

- [12] **Ковалев С.П.** Проектирование информационного обеспечения цифровых двойников энергосистем // Системы и средства информатики. 2020. Т.30. №1. С.66–81.
- [13] **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. P.1-7. DOI: 10.1051/e3sconf/202020902019.
- [14] **Воропай Н.И., Массель Л.В., Колосок И.Н., Массель А.Г.** ИТ-инфраструктура для построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием энергосистем на основе цифровых двойников и цифровых образов / Известия РАН. Энергетика. 2021. №1. С.3-13. DOI: 10.31857/S0002331021010180.
- [15] **Grieves M.W.** Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication–LLC, 2014, 7 p.
- [16] **Fei Tao, Fangyuan Sui, Ang Liu, Qinglin Qi, Meng Zhang, Boyang Song, Zirong Guo, Stephen C.-Y. Lu & A. Y. C. Nee.** Digital twin-driven product design framework, International Journal of Production Research, 2019; 57:12, pp. 1-19. DOI: 10.1080/00207543.2018.1443229.
- [17] **Lim, Kendrik Yan Hong & Zheng, Pai & Chen, Chun-Hsien.** A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. Journal of Intelligent Manufacturing. 2020. P.1313-1337. DOI: 10.1007/S10845-019-01512-W.
- [18] **Ferguson S., Bennett E., Ivashchenko A.** Digital twin tackles design challenges. World Pumps. 2017 (4). P.26–28. DOI: 10.1016/S0262-1762(17)30139-6.
- [19] **Karanjkar N., Joglekar A., Mohanty S., Prabhu V., Raghunath D., Sundaresan R.** Digital Twin for Energy Optimization in an SMT-PCB Assembly Line, IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS), Bali, 2018. P.85-89. DOI:10.1109/IOTAIS.2018.8600830.
- [20] **Pileggi P., Verriet J., Broekhuijsen J., C. van Leeuwen, Wijbrandi W., Konsman M.** A Digital Twin for Cyber-Physical Energy Systems, 7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), Montreal, QC, Canada, 2019. P.1-6. DOI: 10.1109/MSCPES.2019.8738792.
- [21] **Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C.** Digital Twin in Industry: State-of-the-Art, in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol.15, no.4. P.2405-2415, April 2019. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [22] **Прохоров А., Лысачев М.** Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: ООО «АльянсПринт». 2020. 401 с.
- [23] **Марьясин О.Ю.** Разработка онтологий для цифрового двойника зданий // Онтология проектирования. 2019. Т.9, №4(34). С.480-495. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-480-495.
- [24] **Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Mayorov G.** Principles of Building Digital Twins to Design Integrated Energy Systems. *Computation*, vol.10, no.12, Dec. 2022. P.222. DOI:10.3390/COMPUTATION10120222.
- [25] **Steinmetz C., Rettberg A., Ribeiro F.G.C, Schroeder G., Pereira C.E.** Internet of things ontology for digital twin in cyber physical systems. Brazilian Symp Comput Syst Eng SBESC, vol. 2018-November, P.154–159, Jul. 2018. DOI:10.1109/SBESC.2018.00030.
- [26] **Anthony R. N.** Planning and Control: a Framework for Analysis. Cambridge MA: Harvard University Press, 1965.
- [27] **Макаров А.А.** Подходы к оценке устойчивости и рисков долгосрочного развития российской энергетики / Системные исследования в энергетике: методология и результаты. М.: ИНЭИ РАН. 2018. С.87-101.
- [28] **Euzenat J., Shvaiko P.** Ontology matching: Second edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013. P.511. DOI:10.1007/978-3-642-38721-0/COVER.
- [29] **Suarez-Figueroa M.C., Gomez-Perez A., Motta E., Gangemi A. (Eds.).** Ontology engineering in a networked world. Springer Science & Business Media, 2012. P.444. DOI:10.1007/978-3-642-24794-1.
- [30] **Groumpos P., Stylios C.** Modelling supervisory control systems using fuzzy cognitive maps / Chaos, Solitons & Fractals. 2000, Vol.11, №1-3. P.329-336.
- [31] **Papageorgiou E., Stylios C., Groumpos P.** An integrated two-level hierarchical system for decision making in radiation therapy based on fuzzy cognitive maps / IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2003, Vol. 50. № 12. P.1326-1339.
- [32] **Ruiz J.C.S., Bru J.M., Escoto R.P.** Smart Digital Twin for ZDM-based job-shop scheduling. 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0&IoT), Rome, Italy, 2021, P.510-515, DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488473.
- [33] **Массель Л.В.** Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения // Онтология проектирования. 2016. Т.6, №2(20). С.149-161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
- [34] **Массель Л.В., Массель А.Г., Шукин Н.И., Цыбиков А.Р., Лосев А.С.** Построение цифровых двойников ветровой и солнечной электростанций на основе онтологического подхода // Автоматизация в промышленности, 2022. № 7. С.28-32. DOI: 10.25728/avtprom.2022.07.04.
- [35] **Мамедов Т.Г., Массель А.Г.** Адаптация методики реинжиниринга унаследованного программного обеспечения // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. №4(24). С.88-99. DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.009.

Сведения об авторах



Массель Людмила Васильевна, 1949 г. рождения. Окончила Томский политехнический институт (1971). Д.т.н. (1995), профессор (1999). Главный научный сотрудник ИСЭМ СО РАН, профессор Института информационных технологий и анализа данных Иркутского национального технического университета. В списке научных трудов около 300 статей и глав монографий в области проектирования информационных систем и технологий, семантического моделирования, разработки систем интеллектуальной поддержки принятия решений в области энергетики. Author ID (РИНЦ): 9142; ORCID: 0000-0002-3332-5261, Author ID (Scopus): 6603474810; Researcher ID (WoS): B-4793-2014. lvmassel@isem.irk.ru ✉.

Массель Алексей Геннадьевич, 1985 г. рождения. Окончил Иркутский государственный университет в 2007 г., к.т.н. (2011). Старший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН, доцент Института информационных технологий и анализа данных Иркутского национального технического университета. В списке научных трудов более 70 работ в области семантического моделирования, проектирования информационных систем и технологий, разработки систем интеллектуальной поддержки принятия решений в области энергетики. ORCID: 0000-0002-3332-5261; Author ID (РИНЦ): 17628; Author ID (Scopus): 57205017287. amassel@gmail.com.



Поступила в редакцию 01.11.2022, после рецензирования 26.01.2023. Принята к публикации 02.02.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-44-54

Semantic modeling in the construction of digital twins of energy objects and systems

© 2023, L.V. Massel ✉, A.G. Massel

L.A. Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk, Russia

Abstract

The article deals with the problem of building Digital Twins and Smart Digital Twins for control and management in power systems. The energy system is understood as a set of energy resources of all types, methods for their production (extraction), transformation, distribution and use, as well as technical means and organizational complexes that ensure the supply of consumers with all types of energy. Integrated intelligent energy systems are analyzed as one of the important trends in the Russian energy sector, and the main directions of digitization of the energy sector are considered. The concept of "digital twins" in technical fields is considered as one of the main digitalization trends, an ontological approach to building digital twins and semantic models for building smart digital twins are proposed. It is proposed to use a fractal approach when performing ontological engineering, which makes it possible to formalize the concepts of the subject area and allows you to build different-scale ontologies using metalevels of ontologies. Formalized models of digital twins and smart digital twins are presented. The developed approaches are illustrated by the example of construction of digital twins of a solar power plant and smart digital twins of a fuel and energy complex. The approach described in the article makes it possible to integrate different levels of digital and smart digital twins into a single digital solution when modeling energy facilities and power systems.

Key words: *Integrated intelligent energy systems, digital twin, ontologies, semantic models, fractal approach.*

Citation: *Massel LV, Massel AG. Semantic modeling in the construction of digital twins of energy objects and systems [In Russian]. Ontology of designing. 2023; 13(1): 44-54. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-44-54.*

Financial Support: The results were obtained within the framework of the project under the state order of MESI SB RAS, № AAAA-A21-121012090007-7, topic № FWEU-2021-0007.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures

Figure 1 – Fractal stratified model linking FS-models for four sectors

Figure 2 – Ontology of digital twin architecture

Figure 3 – Top-level ontology describing the interactions of DT and SDT in energy

References

- [1] **Bushuev VV, Kamenev AS, Kobec BB.** Energy as an infrastructure "system of systems" [In Russian]. *Energy policy*. 2012; 5: 3-14.
- [2] **Voropaj NI, Stennikov VA, Senderov SM, Barakhtenko EA and etc.** Integrated infrastructure energy systems of the regional and interregional level [In Russian]. *Energy policy*. 2015; 3: 24-32.
- [3] **Voropaj NI, Stennikov VA, Senderov SM.** Integrated intelligent systems in the energy sector of Russia [In Russian]. *Systems Research in Energy: Methodology and Results* Edited by Makarov A.A. and Voropaj N.I. Moscow: ERI RAS. 2018. P.87-101.
- [4] **Voropaj NI, Stennikov VA.** Integrated intelligent energy systems [In Russian]. *News of the RAS. Energy*. 2014; 1: 64-73.
- [5] **Voropaj NI, Stennikov VA.** Integrated energy systems [In Russian]. *Innovative power industry-21*. Edited by Batenin V.M., Bushuev V.V., Voropaj N.I. Moscow: PC "Energy". 2017. P.181-193.
- [6] **Massel LV, Massel AG.** Intelligent computing in studies of energy development trends [In Russian]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Management, computer technology and informatics*. 2012; 321(5): 135-141.
- [7] **Massel LV, Massel AG.** Intelligent system of semiotic type for decision-making support in Russia energy sector based on situational management conception /Proceedings of IV International scientific conference "Information technologies in science, management, social sphere and medicine" (ITSMSSM 2017)) // *Advances in Computer Science Research (ACSR)*. 2017; 72: 423-429. DOI: 10.2991/itsmssm-17.2017.89.
- [8] Digital economy of the Russian Federation. Ministry of Digital Development of Russia. Last updated: August 9, 2022. https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/?utm_referrer=https%3a%2f%2fwww.google.com%2f.
- [9] Departmental project "Digital Energy". <https://minenergo.gov.ru/node/14559>.
- [10] **Soifer VA.** Human fActor [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2020; 11(1): 8-19. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-8-19..
- [11] **Andryushkevich SK, Kovalev SP, Nefedov EA.** Approaches to the development and application of digital twins of energy systems [In Russian]. *Digital substation*. 2019; 12: 38-43.
- [12] **Kovalev SP.** Designing information support for digital twins of energy systems [In Russian]. *Systems and means of informatics*. 2020; 30(1): 66–81. DOI: 10.14357/08696527200106.
- [13] **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.
- [14] **Voropaj NI, Massel LV, Kolosok IN, Massel AG.** IT-infrastructure for construction of intelligent management systems of development and functioning of energy systems based on digital twins and digital images [In Russian]. *News of the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2021; 1: 3-13. DOI:10.31857/S0002331021010180.
- [15] **Grieves MW.** Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication–LLC, 2014, 7 p.
- [16] **Fei Tao, Fangyuan Sui, Ang Liu, Qinglin Qi, Meng Zhang, Boyang Song, Zirong Guo, Stephen C.-Y. Lu & A. Y. C. Nee.** Digital twin-driven product design framework, *International Journal of Production Research*, 2019; 57:12, pp. 1-19. DOI:10.1080/00207543.2018.1443229.
- [17] **Lim, Kendrik Yan Hong & Zheng, Pai & Chen, Chun-Hsien.** A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020. P.1313-1337. DOI:10.1007/S10845-019-01512-W.
- [18] **Ferguson S, Bennett E, Ivashchenko A.** Digital twin tackles design challenges. *World Pumps*. 2017; 4: 26–28. DOI:10.1016/S0262-1762(17)30139-6.
- [19] **Karanjkar N, Joglekar A, Mohanty S, Prabhu V, Raghunath D, Sundaresan R.** Digital Twin for Energy Optimization in an SMT-PCB Assembly Line, *IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS)*, Bali, 2018. P.85-89. DOI:10.1109/IOTAIS.2018.8600830.
- [20] **Pileggi P, Verriet J, Broekhuijsen J, C. van Leeuwen, Wijbrandi W, Konsman M.** A Digital Twin for Cyber-Physical Energy Systems, *7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, Montreal, QC, Canada, 2019. P.1-6. DOI:10.1109/MSCPES.2019.8738792.
- [21] **Tao F, Zhang H, Liu A, Nee AYC.** Digital Twin in Industry: State-of-the-Art, in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, April 2019; 15(4): 2405-2415. DOI:10.1109/TII.2018.2873186.

- [22] **Prohorov A, Lysachev M.** Digital twin. Analysis, trends, world experience [In Russian]. Moscow: Al'yansPrint. 2020. 401 p.
- [23] **Maryasin OYu.** Development of ontologies for the digital twin of buildings [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4): 480-495. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-480-495.
- [24] **Stennikov V, Barakhtenko E, Sokolov D, Mayorov G.** Principles of Building Digital Twins to Design Integrated Energy Systems. *Computation*, Dec. 2022; 10(12): 222. DOI: 10.3390/COMPUTATION10120222.
- [25] **Steinmetz C, Rettberg A, Ribeiro FGC, Schroeder G, Pereira CE.** Internet of things ontology for digital twin in cyber physical systems. *Brazilian Symp Comput Syst Eng SBESC*, 2018. P.154–159. DOI:10.1109/SBESC.2018.00030.
- [26] **Anthony RN.** Planning and Control: a Framework for Analysis. Cambridge MA: Harvard University Press, 1965.
- [27] **Makarov AA.** Approaches to assessing the sustainability and risks of long-term development of the Russian energy sector [In Russian]. *Systems Research in Energy: Methodology and Results*. M.: ERI RAS. 2018. P.87-101.
- [28] **Euzenat J, Shvaiko P.** Ontology matching: Second edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013. 511 p. DOI:10.1007/978-3-642-38721-0/COVER.
- [29] **Suarez-Figueroa MC, Gomez-Perez A, Motta E, Gangemi A.** (Eds.). *Ontology engineering in a networked world*. Springer Science & Business Media, 2012. P.444. DOI:10.1007/978-3-642-24794-1.
- [30] **Groumpos P, Stylios C.** Modelling supervisory control systems using fuzzy cognitive maps / *Chaos, Solitons & Fractals*. 2000; 11(1-3): 329-336.
- [31] **Papageorgiou E, Stylios C, Groumpos P.** An integrated two-level hierarchical system for decision making in radiation therapy based on fuzzy cognitive maps / *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2003; 50(12): 1326-1339.
- [32] **Ruiz JCS, Bru JM, Escoto RP.** Smart Digital Twin for ZDM-based job-shop scheduling. 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0&IoT), Rome, Italy, 2021. P.510-515, DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488473.
- [33] **Massel LV.** Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(2): 149-161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
- [34] **Massel LV, Massel AG, Shchukin NI, Tsybikov AR, Losev AS.** Construction of digital twins of wind and solar power plants based on an ontological approach [In Russian]. *Automation in Industry*, 2022; 7: 28-32. DOI: 10.25728/avtprom.2022.07.04.
- [35] **Mammadov TG, Massel AG.** Adaptation of the methodology of reengineering of legacy software [In Russian]. *Information and mathematical technologies in science and management*. 2021; 4(24): 88-99. DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.009.

About the authors

Liudmila Vasilievna Massel (b. 1949) graduated from the Tomsk Polytechnic Institute (1971), Doctor of Technical Sciences (1995), professor (1999). Chief Researcher at the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. Professor at the Institute of Information Technologies and Data Analysis of the Irkutsk National Research Technical University. The list of scientific papers includes about 300 articles and chapters of monographs in the field of information systems and technology design, semantic modeling, and the development of intelligent decision support systems in the field of energy. ORCID: ORCID: 0000-0002-3332-5261, Author ID (Scopus): 6603474810; Researcher ID (WoS): B-4793-2014. lvmassel@isem.irk.ru ✉.

Aleksei Gennadievich Massel (b. 1985) graduated from the Irkutsk State University (2007), PhD in Engineering Science (2011). Senior researcher at the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. Associate Professor at the Institute of Information Technologies and Data Analysis of the Irkutsk National Technical University. The list of scientific works includes more than 70 articles in the field of semantic modeling, design of information systems and technologies, and the development of intelligent decision support systems in the field of energy solutions. ORCID: 0000-0002-3332-5261; Author ID (РИИЦ): 17628; Author ID (Scopus): 57205017287. amassel@gmail.com.

Received November 1, 2022. Revised January 26, 2023. Accepted February 2, 2023.