

Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики

Л.В. Массель, Т.Н. Ворожцова

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация

Рассматриваются предпосылки применения онтологического подхода к построению цифровых двойников, учитывая имеющиеся результаты в области онтологического инжиниринга систем энергетики. Предлагается использовать известный опыт разработки математических моделей объектов и систем энергетики разных уровней, а также опыт построения онтологий задач и методов, онтологических моделей для описания и накопления экспертных знаний, для построения и интеграции математических, имитационных и онтологических моделей, как основы цифровых двойников. Приводятся основные понятия в области цифровых двойников, рассматриваются основные типы цифровых двойников и их отличие от «цифровых теней». Предложены этапы перехода к цифровым двойникам, включающие онтологический инжиниринг предметной области и построение соответствующих онтологических моделей. Приведены примеры онтологий предметной области, связанной с теплоэнергетикой и онтологии на языке XML для тепловой электростанции. При создании цифровых двойников предварительно выполняется структурирование знаний предметной области с помощью онтологических моделей, на основе которых осуществляется построение информационных и математических моделей, составляющих основу цифровых двойников, и разработка программных комплексов.

Ключевые слова: цифровой двойник, энергетические системы, онтология, онтологический инжиниринг, математическая модель.

Цитирование: Массель, Л.В. Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики / Л.В. Массель, Т.Н. Ворожцова // Онтология проектирования. – 2020. – Т.10, №3(37). – С.327-337. – DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.

Введение

Создание цифровых двойников – это один из современных трендов в развитии цифровых технологий. По данным института Гартнера¹, «цифровой двойник» вошёл в десятку главных стратегических технологических трендов 2019 года. Актуальность построения цифровых двойников обусловлена проблемами развития энергетической отрасли в условиях реализации программы цифровизации экономики и задач, сформулированных в рамках стратегической программы исследований энергетики и проекта «Цифровая энергетика» [1].

Концепция цифровых двойников может быть использована для решения задач интеллектуального управления системами энергетики на разных уровнях и этапах их функционирования, в том числе мониторинга, оценки ситуаций и принятия решений, а также, проектирования и прогнозирования развития объектов и систем энергетики.

В статье рассматриваются возможности использования результатов научных исследований, выполняемых в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН на основе математического моделирования и семантических технологий, в частности, онтологического моделирования для разработки цифровых двойников объектов и систем энергетики [2].

¹ <https://www.gartner.com/>

Семантические технологии используются для обработки и интеграции данных и позволяют работать со смыслом информации, структурировать концептуализированные знания [3]. В статье рассматривается онтологический подход к построению цифровых двойников на примере систем теплоэнергетики.

1 Понятие цифровых двойников

Концепция цифровых двойников (*Digital Twin*) относится к числу базовых элементов высокотехнологичной и интеллектуальной системы управления в контексте четвёртой промышленной революции (*Industry 4.0*) [4, 5]. Разработка цифровых двойников объектов энергетики расширит возможности решения задач проектирования, прогнозирования и управления в системах энергетики за счет моделирования структуры объектов и производственных процессов, имитации их деятельности с помощью разработанных моделей.

Стратегическая программа исследований технологической платформы «Интеллектуальная энергетическая система России»², предусматривает ряд ключевых технологий для реализации в интеллектуальных системах управления развитием и функционированием энергетических систем [6-8]. К ним относятся технологии мониторинга и оценки ситуаций, в том числе оценки устойчивости состояния энергосистемы, выработки и принятия решений; технологии обмена данными на основе единого информационно-технологического пространства, включающие описание процессов управления, массивов характеристик объектов и нормативно-справочной информации; технологии создания приложений, обеспечивающих обработку и анализ данных, необходимые расчёты для принятия управленческих решений и др.

Создание цифровых двойников энергетических систем рассматривается как один из инструментов в интеллектуальных системах управления развитием и функционированием энергетических систем и комплексов. Строгого определения понятия «цифровой двойник» пока не существует [9-12], однако смысл появления такого термина состоит в том, чтобы создать виртуальную модель или прототип физического объекта, отображающие его компоненты и процесс функционирования с использованием реальных или виртуальных данных [13, 14]. Основные задачи такого моделирования – управление функционированием объекта, прогнозирование его поведения, проверка гипотез и проведение экспериментов, основываясь на реальных или экспериментальных данных [15, 16].

Рассматриваются следующие типы цифровых двойников [10, 11]:

- двойник-прототип, как аналог реального объекта, содержащий информацию для описания его жизненного цикла от производства до утилизации;
- двойник-экземпляр, основанный на информации о составе, материалах, комплектующих и данных о мониторинге конкретного реального объекта;
- агрегированный двойник содержит информацию двойника-прототипа и двойника-экземпляра.

Выделяют цифровые двойники продукта, процесса и системы [10]. В [16] вводится понятие «цифровой образ», который, наряду с моделями и данными объекта техники, включает в себя поведенческие и когнитивные модели связанной с ним человеческой деятельности (например, операторов оборудования, административного персонала). Используется также понятие «цифровая тень», которое определяют как систему связей и зависимостей, описыва-

² Технологическая платформа «Интеллектуальная электроэнергетическая система России»

http://rosenergo.gov.ru/regulations_and_methodologies/tehnologicheskaya_platforma_tp_ies.

<https://in.minenergo.gov.ru/tek/prioriteti/perspektivnye-tehnologicheskie-napravleniya/tehnologicheskaya-platforma-intellektualnaya-elektroenergeticheskaya-sistema-rossii>

ющих поведение реального объекта, и содержащихся в данных, получаемых с реального объекта при помощи сетевых технологий. Цифровая тень способна предсказать поведение реального объекта только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор данных, но не позволяет моделировать другие ситуации [11].

Анализ исследований, выполняемых в области использования концепции цифровых двойников [12, 17], подтверждает актуальность построения цифровых двойников для применения в интеллектуальных системах управления развитием энергетических систем. При этом для энергетических систем и объектов разных уровней возможно применение разных типов цифровых двойников.

2 Интеграция моделей при построении цифровых двойников

Концепция цифровых двойников предполагает разработку моделей разных типов и направлений для решения различных задач моделирования структуры и процессов. Такими задачами могут быть снижение затрат и времени на проектирование, отработка перспективных технических решений на виртуальных моделях, выработка предложений по режимам эксплуатации с учётом особенностей объекта и другие [15].

На рисунке 1 представлена архитектура цифрового двойника энергетической системы, являющаяся обобщением схемы, предложенной для электроэнергетических систем в [17]. Архитектура отражает интеграцию математического, имитационного, информационного и онтологического моделирования. При этом предполагается обмен данными и передача информации с одного уровня моделей на другой.



Рисунок 1 – Архитектура цифрового двойника энергетической системы

Информационные модели в широком смысле представляют собой совокупность информации о наиболее существенных свойствах и параметрах объекта или процесса. В более узком смысле информационные (инфологические) модели в информатике используются при разработке баз данных и являются их основой, так как отражают набор данных об объектах, их наименования, структуру, взаимосвязи, ограничения и т.д. На современном этапе развития информационных технологий производственные и технологические процессы все более тесно интегрируются с информационными системами, в результате чего создаются киберфизические системы, в том числе и в энергетике. В исследованиях энергетики находят применение разнообразные информационные модели, как для разработки баз данных, так и для описания и представления структуры систем энергетики, исследуемых объектов и процессов.

Для решения задачи анализа, проектирования, прогнозирования, оптимизации объектов и систем энергетики широко используется математическое и имитационное моделирование топливно-энергетического комплекса в целом, отдельных систем энергетики, энергетических объектов и их элементов. Разрабатываются программные комплексы (ПК) на основе моделей, а знания о структуре систем, прикладных задачах и математических моделях представляются в виде онтологий [18].

Технология цифровых двойников предполагает междисциплинарное моделирование, т.е. интеграцию результатов численного моделирования структурных элементов и физических процессов в системе на основе обмена данными между компонентами системы.

3 Онтологический инжиниринг как этап проектирования цифровых двойников

Предложены следующие этапы перехода к цифровым двойникам в исследованиях энергетических систем [2]:

- 1) Анализ существующих математических моделей и реализующих их ПК;
- 2) Онтологический инжиниринг предметной области (ПрО) и построение онтологической модели;
- 3) Определение исходных данных или потоков данных (состав, источники получения, возможность получения оперативных данных, базы данных и др.) и их взаимодействия с математическими моделями;
- 4) Модификация математических моделей и реинжиниринг программ и ПК;
- 5) Разработка web-приложений и web-сервисов для реализации цифровых двойников.
- 6) Реализация цифровых двойников.

Использование семантических технологий, в частности онтологического моделирования, предусматривает работу не только с данными, но и со знаниями, т.е. со смыслом информации.

Онтологии дают возможность представлять знания в формализованном виде, удобном для автоматизированной обработки и решать следующие задачи:

- интеграция и структурирование данных, знаний, задач и систем;
- обеспечение доступности и восприятия информации и обмен знаниями;
- структурирование знаний для поддержки имитационного моделирования;
- описание взаимообмена данными и знаниями между семантическими и математическими моделями;
- поддержка принятия решений и получение логических выводов.

Все эти задачи требуется решать при построении цифровых двойников.

Онтологическое описание моделей разных уровней, с учётом информационных взаимосвязей и обмена данными, даёт возможность интеграции их в единый моделирующий комплекс.

В структуре онтологических моделей для построения цифровых двойников в энергетике предлагается рассматривать разные уровни детализации.

- Онтология верхнего уровня (метаонтология исследований) – базовые концепты, относящиеся к исследованиям, моделированию и функционированию объектов (рисунок 2). Эти понятия являются общими для разных ПрО.
- Онтология ПрО – описывает базовые понятия ПрО с точки зрения их формулирования, согласования, группировки и классификации (пример онтологии теплоэнергетики приведен на рисунке 3). Представленная онтология теплоэнергетики отражает классификацию основных базовых понятий, связанных с теплоэнергетикой. Она включает такие

классы как *Объект*, *Установка*, *Топливо*, *Теплоноситель*, *Система теплоснабжения* и другие. Каждый из этих классов имеет подклассы, а на более детальном уровне включает индивиды, характеризующиеся набором соответствующих свойств. Данная онтология является основой при разработке прикладных онтологий.

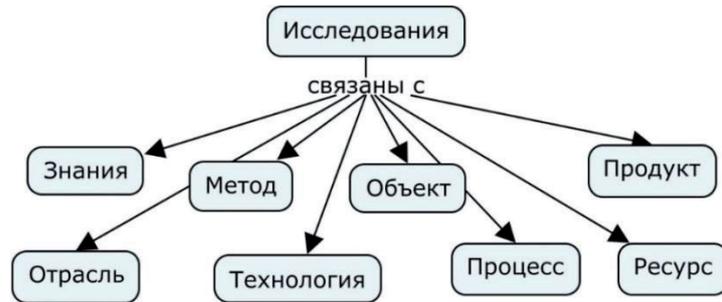


Рисунок 2 – Метаонтология исследований

- Описания концептуальной модели задачи, приложения, ПК и других компонентов моделируемой системы. В качестве примера представлена онтология ПК (рисунок 4).



Рисунок 4 – Онтология программного комплекса

Применение онтологий при построении ПК, представленное в [18, 19], может быть использовано при построении цифровых двойников.

Онтологическое моделирование состоит из следующих этапов:

- декомпозиция* моделируемого фрагмента реальности на отдельные элементы (объекты), которые являются базовыми элементами модели. Глубина такой декомпозиции зависит от практического назначения модели.
- идентификация* объектов, результатом которой является их однозначное обозначение.
- классификация*, необходимая для того, чтобы формулировать знания и делать логические выводы. Классы, как правило, образуют таксономию, иерархию. Основания классификации зависят от целей моделирования и области применения.
- выделение* свойств объектов, их типов и ограничений.
- дополнение* онтологии набором правил для получения логических выводов.

Помимо структурирования знания, онтология выполняет важную коммуникационную роль, являясь своеобразным интерфейсом между ИТ-специалистами и специалистами ПрО. Использование онтологий при разработке цифровых двойников позволяет осуществить интеграцию информационных, математических и имитационных моделей, согласование структуры данных на этапе обмена данными при переходе с одного уровня моделирования на другой и автоматизировать процесс информационного обмена между моделями.

4 Пример разработки ПК на основе онтологии

На рисунке 5 показан пример описания фрагмента онтологии на языке XML для схемы ТЭЦ ВАЗа³. Онтология сформирована с помощью авторских программных средств на основе подготовленного описания структуры исследуемого или проектируемого объекта энергетики и решаемых задач, а затем использована для автоматизированной генерации компонентов ПК и формирования его интерфейса.

На рисунке 6 приведена копия экрана ПК, содержащая общую схему ТЭЦ ВАЗа. Разработка ПК выполнялась с использованием принципов технологии ODA (Ontology Driven Architectures) [20] на основе онтологического описания требуемых компонентов – графических схем, расчётных модулей, списка решаемых задач, числовых данных, подготовленных на основе информационного обследования энергетического объекта.

The screenshot displays a web browser window showing an XML ontology description for a power plant (ТЭЦ ВАЗа). The XML code defines several entities (e1-e7) with descriptions and links to images and documents. The entities are:

- e1:** Иерархия схем (Hierarchy of schemes)
- e2:** Общая схема ТЭЦ (General scheme of the power plant)
- e3:** Расчет модели (Calculation model)
- e4:** Исходное состояние (Initial state)
- e5:** Исходное состояние (Initial state)
- e6:** Параметры турбин Т-100/120 (Parameters of turbines T-100/120)
- e7:** Параметры турбин Т-100/120 (Parameters of turbines T-100/120)

The interface also shows a schematic diagram of a steam boiler system (Пл сальниковые подогреватели) with various parameters and a table of values:

Parameter	Value
G _{ox.B}	155.578 т/ч
P _{ox.B ВХ}	31.463 кг/см²
P _{ox.B ВЫХ}	2.7989 кг/см²
T _{ox.B ВХ}	665.545 °C
T _{ox.B ВЫХ}	3.2805 °C

Рисунок 5 - Пример описания фрагмента онтологии на языке XML

³ Теплоэлектроцентраль Волжского автозавода.

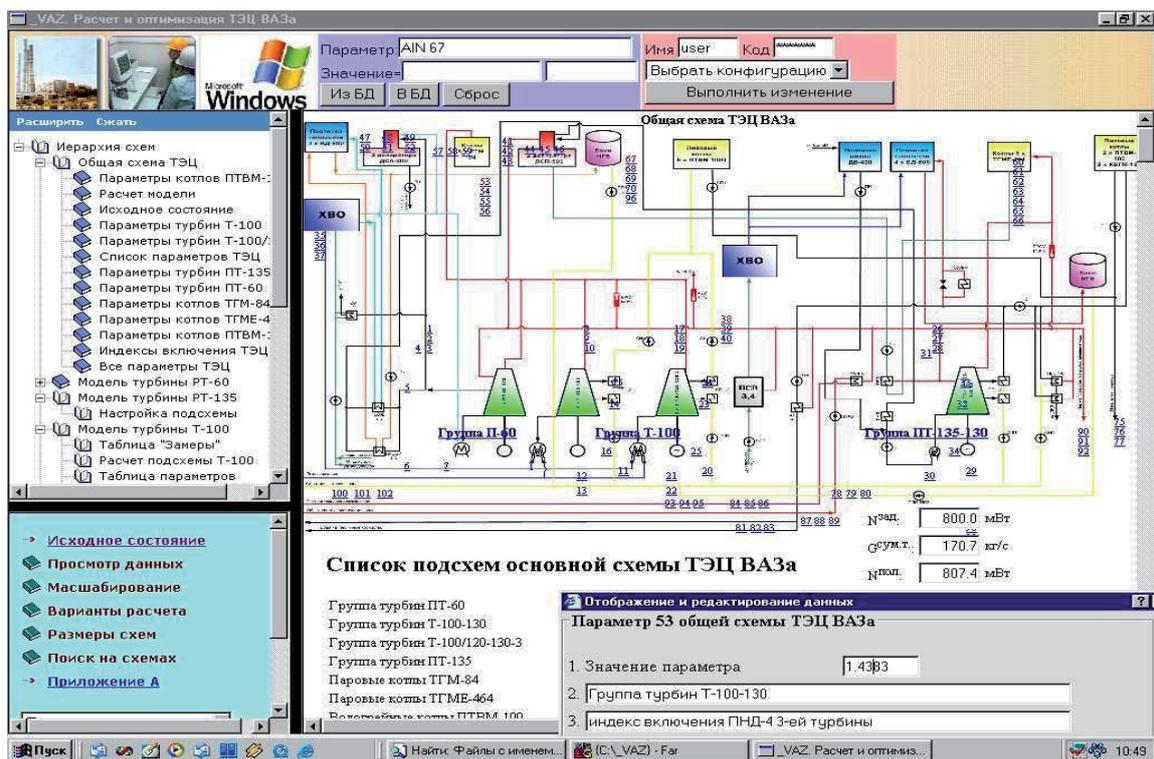


Рисунок 6 – Копия экрана ПК, содержащая общую схему ТЭЦ ВАЗа

Заключение

Предложено использовать онтологический подход при моделировании цифровых двойников энергетических систем. Рассмотрен онтологический инжиниринг, как необходимый этап при построении цифровых двойников. Показано использование онтологических моделей для описания структуры объектов энергетики, их основных компонентов и взаимосвязей. Основным назначением онтологий при разработке цифровых двойников является формальное описание и интеграция всех компонентов: моделей, баз данных, баз знаний и их взаимосвязей. Приведены примеры онтологий, как инструмента коммуникации, и пример описания онтологии на языке XML для одного из энергетических объектов.

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, № 20-07-00195.

Список источников

- [1] Ведомственный проект «Цифровая энергетика» - <https://minenergo.gov.ru/node/14559>.
- [2] *Массель, Л.В.* Эволюция технологий исследований энергетики и применения их результатов: от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам / Л.В. Массель, А.Г. Массель, А.Н. Копайгородский // Информационные и математические технологии в науке и управлении. - 2019. - № 4 (16). - С.5-19. - DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-01.
- [3] *Хорошевский, В.Ф.* Семантические технологии: ожидания и тренды / В.Ф. Хорошевский // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS -2012). Материалы II Международной научно-технической конференции. БГУиР. Минск. - 2012. - С.143-158.

- [4] Цифровой двойник, Индустрия 4.0. Информатизация и системы управления в промышленности. - <https://zen.yandex.ru/media/isup/cifrovoi-dvoinik-industriia-40-5b83b7155b279900a96c54e8>.
- [5] **Rosen, R.** About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing / R. Rosen, G. Wichert, G. Lo, K. Bettenhausen // IFAC-Papers OnLine. - 2015. - P.567-572.
- [6] **Бердников Р.Н.** Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно - адаптивной сетью / Р.Н. Бердников, В.В. Бушуев, С.Н. Васильев, Ф.В. Веселов и др. // М.: ФСК ЕЭС. - 2012. - 219 с.
- [7] **Воропай, Н.И.** Методические основы стратегического планирования развития энергетики / Н.И. Воропай, А.М. Клер, Ю.Д. Кононов, Б.Г. Санеев, С.М. Сендеров, В.А. Стенников // Энергетическая политика. - 2018. - №3. - С.35-44.
- [8] **Массель, Л.В.** Методы и интеллектуальные технологии научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики / Л.В. Массель // Энергетическая политика. - 2018. - №3. - С.30-42.
- [9] **Saddik, A.E.** Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies / A.E. Saddik // IEEE MultiMedia. - 2018. - Т.25. - №. 2. - P.87-92.
- [10] **Кокорев, Д.С.** Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса / Д.С. Кокорев, А.А. Юрин // Colloquium-journal. Technical science. - 2019. - №10 (34). - С.3135. - DOI: 10.24411/2520-6990-2019-10264.
- [11] **Боровков, А.** Цифровые двойники и цифровые тени в высокотехнологичной промышленности / А. Боровков // - <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoiniki-i-cifrovie-teni-v-visokotehnologichnoi-promishlennosti>.
- [12] **Андрюшкевич, С.К.** Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем / С.К. Андрюшкевич, С.П. Ковалев, Е. Нефедов // Цифровая подстанция. - 2019. - № 12. - С.38-43.
- [13] **Rosen, R.** About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing / R. Rosen, G. Wichert, G. Lo, K. Bettenhausen // IFAC - PapersOnLine. - 2015. - P.567-572.
- [14] **Шмитке, Ч.** Цифровые двойники: своевременное создание интеллектуальной продукции в рамках бюджета / Ч. Шмитке. - <https://controlengrussia.com/industry-4-0/cifrovye-dvojniki/>.
- [15] **Шмотин, Ю.** Цифровой двойник на производстве: задачи, вопросы, перспективы / Ю. Шмотин. - http://www.up-pro.ru/library/information_systems/project/d7fb9dd59e1ffa29.html.
- [16] **Бухановский, А.В.** Цифровые двойники ведут нас в седьмой технологический уклад / А.В. Бухановский // Энергетика и промышленность России. - 2019. - № 7 (363). - <https://www.eprussia.ru/epr/>.
- [17] **Ковалёв, С.П.** Проектирование информационного обеспечения цифровых двойников энергетических систем / С.П. Ковалев // Системы и средства информатики. - 2020. - Т. 30. №1. - С.66–81.
- [18] **Массель, Л.В.** Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике / Л.В. Массель, Т.Н. Ворожцова, Н.И. Пяткова // Онтология проектирования. – 2017. – Том. 7. №1 (23). – С.66-76. – DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.
- [19] **Massel, L.V.** Ontological Engineering of Knowledge Space for Situational Management in Russian Energy Sector / L.V. Massel, T.N. Vorozhtsova // 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC) IEEE. - 2018. - P.1-5. - <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=8469127>. DOI: 10.1109/RPC.2018.8482144.
- [20] Ontology Driven Architectures and Potential Uses of the Semantic Web in Systems and Software Engineering. - <https://www.w3.org/2001/sw/BestPractices/SE/ODA/>.

Сведения об авторах



Массель Людмила Васильевна, 1949 г. рождения. Окончила Томский политехнический институт, факультет автоматики и вычислительной техники по специальности «Прикладная математика» (1971). Д.т.н. (1995), профессор (1999). Главный научный сотрудник, зав. отделом «Системы искусственного интеллекта в энергетике» Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ), 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 энергетике. AuthorID (РИНЦ): 8466. Author ID (Scopus): 56440157300; Researcher ID (WoS): K-5060-2018. lvmassel@gmail.com

Ворожцова Татьяна Николаевна, 1952 г. рождения, к.т.н. (2008). Окончила Иркутский институт народного хозяйства (ныне Байкальский государственный университет) (1975). Ведущий инженер отдела «Системы искусственного интеллекта в энергетике» ИСЭМ. В списке научных трудов более 30 работ в области автоматизации научных исследований, проектирования и программирования. AuthorID (РИНЦ): 11040. Author ID (Scopus): 57204605100; Researcher ID (WoS): K-2048-2018. tnn@isem.irk.ru



Ontological approach to the creation of digital twins of energy objects and systems

L.V. Massel, T.N. Vorozhtsova

Energy Systems Institute named L.A. Melentiev SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract

The article discusses prerequisites for the application of the ontological approach to the construction of digital twins, taking into account the available results in the field of ontological engineering of energy systems. It is proposed to use the accumulated experience in developing mathematical models of energy objects and systems of different levels, as well as experience in building ontologies of tasks and methods, ontological models for describing and accumulating expert knowledge for building and integrating mathematical, imitation and ontological models as the basis for digital twins. Basic concepts in the field of digital twins are introduced, the main types of digital twins and their difference from “digital shadows” are considered. The stages of the transition to digital twins are proposed, the most important of which is the ontological engineering of the subject area, which ends with the construction of the corresponding ontological models. Examples of heuristic ontologies are given as a result of ontological engineering of the subject area related to heat power engineering. An example of a logical ontology in XML for a thermal power plant is given. The novelty of the proposed approach lies in the fact that when creating digital twins, the structuring of the knowledge of the subject area is preliminarily performed using ontological models, on the basis of which the information and mathematical models are then built constituting the basis of digital twins and software systems driven by ontologies are developed.

Key words: digital twin, energy systems, ontology, ontological engineering, mathematical model.

Citation: Massel LV, Vorozhtsova TN. Ontological approach to the creation of digital twins of energy objects and systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(3): 327-337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.

Acknowledgment: The results were obtained within the framework of the project under the state assignment of the ISEM SB RAS AAAA-A17-117030310444-2 (project No. 349-2016-0005) and with partial financial support from RFBR grants № 19-07-00351, № 20-07-00195.

List of figures

- Figure 1 - Architecture of the digital twin of the energy system
- Figure 2 - Metaontology of research
- Figure 3 - Ontology of heat power engineering
- Figure 4 - Ontology of the software package
- Figure 5 - Example of an ontology description in XML
- Figure 6 - The General scheme of thermal power station.

References

- [1] “Digital Energy”, a departmental project [In Russian]. <https://minenergo.gov.ru/node/14559>.
- [2] Massel LV, Massel AG, Kopygorodsky AN. Evolution of energy research technologies and the application of their results: from mathematical models and computer programs to digital twins and digital images [In Russian]. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, 2019; 4(16): 5-19. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-01.
- [3] Khoroshevsky VF. Semantic Technologies: Expectations and Trends [In Russian]. *Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2012)*. Materials of the II International Scientific and Technical Conference. BSUIR. Minsk, 2012. P.143-158.

- [4] Digital twin, Industry 4.0 [In Russian]. Informatization and management systems in industry. Electronic resource: <https://zen.yandex.ru/media/isup/cifrovoi-dvoinik-industriia-40-5b83b7155b279900a96c54e8>.
- [5] **Rosen R, Wichert G, Lo G, Bettenhausen K.** About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-Papers OnLine. 2015. P.567-572.
- [6] **Berdnikov RN, Bushuev VV, Vasiliev SN, Veselov FV, Voropay NI. etc.** The concept of an intelligent power system with an active - adaptive grid [In Russian]. Moscow. Federal Grid Company of the Unified Energy System, 2012. 219 p.
- [7] **Voropai NI, Cler AM, Kononov YuD, Saneev BG, Senderov SM, Stennikov VA.** Methodological bases of strategic planning of energy development [In Russian]. *Energy policy*. 2018; 3: 35-44.
- [8] **Massel LV.** Methods and intelligent technologies for scientific substantiation of strategic decisions on the digital transformation of energy [In Russian]. *Energy policy*. 2018; 5: 30-42.
- [9] **Saddik AE.** Digital twins: the convergence of multimedia technologies. *IEEE MultiMedia*. 2018; 25(2): 87-92.
- [10] **Kokorev DS, Yurin AA.** Digital twins: concept, types and benefits for business. *Colloquium-journal* [In Russian]. *Technical science*. 2019; 10(34): 3135. DOI: 10.24411 / 2520-6990-2019-10264.
- [11] **Borovkov A.** Digital twins and digital shadows in high-tech industry [In Russian]. <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoiniki-i-cifrovie-teni-v-visokotehnologichnoi-promishlennosti>.
- [12] **Andryushkevich SK, Kovalev SP, Nefedov E.** Approaches to the development and application of digital twins of energy systems [In Russian]. *Digital substation*. 2019; 12: 38-43.
- [13] **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.
- [14] **Schmitke Chad.** Digital twins: timely creation of intelligent products within the budget [In Russian]. <https://controlengrussia.com/industry-4-0/cifrovye-dvojniki/>.
- [15] **Shmotin Y.** Digital twin in production: tasks, issues, prospects [In Russian]. http://www.up-pro.ru/library/information_systems/project/d7fb9dd59e1ffa29.html.
- [16] **Bukhanovsky AV.** Digital twins lead us to the seventh technological order / HYPERLINK "https://www.eprussia.ru/epr/" "Energy and Industry of Russia" newspaper. No. 07 (363), 2019 (in Russian).
- [17] **Kovalev SP.** Designing information support for digital twins of power systems [In Russian]. *Systems and means of informatics*. 2020; 30(1): 66–81.
- [18] **Massel LV, Vorozhtsova TN, Pyatkova NI.** Ontological engineering to support strategic decision making in the energy sector [In Russian]. *Ontology of designing*, 2017; 7(1): 66-76. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.
- [19] **Massel LV, Vorozhtsova TN.** Ontological Engineering of Knowledge Space for Situational Management in Russian Energy Sector / Published in: 2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC) Publisher: IEEE. P.1-5. <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=8469127>. DOI: 10.1109/RPC.2018.8482144.
- [20] *Ontology Driven Architectures and Potential Uses of the Semantic Web in Systems and Software Engineering - <https://www.w3.org/2001/sw/BestPractices/SE/ODA/>.*

About the authors

Liudmila Vasilievna Massel (b. 1949) graduated from the Tomsk Polytechnic Institute, Faculty of Automation and Computer Engineering in the specialty "Applied Mathematics" in 1971, Doctor of Technical Sciences (1995), professor (1999). Chief Researcher, Head of "Artificial Intelligent Systems in Energy Sector" department at Energy Systems Institute SB RAS. Professor of the Information Technologies and Data Analysis Institute in the Irkutsk National Research Technical University. The list of scientific works includes about 300 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. AuthorID (RSCI): 8466. Author ID (Scopus): 56440157300; Researcher ID (WoS): K-5060-2018. lvmassel@gmail.com.

Tatyana Nikolayevna Vorozhtsova (b. 1952) graduated from the Irkutsk Institute of National Economy (1975). Ph.D. (2008). Leading engineer of "Artificial Intelligent Systems in Energy Sector" department at Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. She is the author and co-author more 30 scientific articles in the field of automation of scientific research, design, and programming. AuthorID (RSCI): 11040. Author ID (Scopus): 57204605100; Researcher ID (WoS): K-2048-2018. tnn@isem.irk.ru.

Received August 17, 2020. Revised September 25, 2020. Accepted September 28, 2020.