

DOI:

МУЛЬТИМОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Ковалёв С.П.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65*

kovalyov@sibnet.ru

Аннотация: Предложены подходы к формированию и применению цифрового двойника крупномасштабной технологической инфраструктуры в качестве фундамента системы интеллектуального управления. Приведен пример мультимодельного описания процессов управления инфраструктурой распределенной энергетики активных потребителей в составе цифрового двойника.

Ключевые слова: цифровой двойник, технологическая инфраструктура, имитационное моделирование, распределенная энергетика, структурная динамика.

Введение

Современные крупномасштабные технологические инфраструктуры в различных отраслях (топливно-энергетический комплекс, транспортные сети, распределенные вычислительные ресурсы и т.д.) представляют собой сложные гетерогенные сетевые объекты, нуждающиеся в системах управления с высокой степенью автоматизации циклов оценивания состояния, выработки решений и оказания регулирующих воздействий [1]. Главным принципом организации управления такими объектами, в соответствии с парадигмой четвертой промышленной революции (Industrie 4.0) и подходом модельно-ориентированной системной инженерии (Model-Based Systems Engineering), является формирование цифрового двойника (Digital Twin) – виртуальной копии объекта, достоверно воспроизводящей и задающей структуру, состояние и поведение оригинала в реальном времени [2]. Цифровой двойник, будучи интеллектуальной надстройкой над средой интернета вещей (Internet of Things, IoT) и информационной моделью объекта, способен стать ключевым базовым элементом высокоавтоматизированной системы управления объектом: все операции над объектом сначала определяются, оптимизируются и верифицируются на моделях «в цифре», и только потом выполняются «в железе». По данным Gartner, к 2021 году почти половина крупных промышленных компаний будут использовать технологию цифровых двойников, чтобы увеличить точность оценивания производительности изделий и технических рисков, достигнув при этом повышения операционной эффективности изделий примерно на 10 % [3].

Такой цифровой двойник можно реализовать только при условии включения в него множества разнородных моделей, представляющих оригинал с различных точек зрения (аспектов). Здесь могут формироваться и применяться аналитико-имитационные модели поведения элементов и оригинала в целом, логико-динамические модели управления ресурсами и потоками, методы и алгоритмы многокритериального оценивания состояния элементов. Все модели должны иметь общую семантическую основу, обеспечивающую их совместимость друг с другом по входным/выходным данным. Более того, модели должны совместно эволюционировать по ходу жизненного цикла оригинала, отражая его структурную динамику – относительно медленные изменения в ходе процессов проектирования, строительства, модернизации, технического обслуживания и ремонта, вывода из эксплуатации [4]. Подходы к мультимодельному описанию процессов управления технологической инфраструктурой с учетом структурной динамики на базе цифрового двойника представлены в настоящем докладе.

1 Принципы формирования и применения цифрового двойника

1.1 Организация и формирование цифрового двойника

Цифровой двойник объекта представляет собой комплекс взаимосвязанных компьютерных моделей и средств, достаточный для выполнения следующих действий:

- достоверное отображение состояния объекта и его окружения в реальном времени;
- достоверное предсказание поведения объекта в штатных и нештатных условиях;
- достоверное порождение управляющих воздействий на объект.

Таким образом, цифровые двойники предназначены для моделирования всевозможных воздействий на объект в ходе его полного жизненного цикла (в том числе не осуществлявшихся

физически), прогнозирования последствий воздействий, выработке и реализации мер по предотвращению негативных последствий. В отличие от традиционных компьютерных моделей и систем, создаваемых под заранее заданные задачи, цифровой двойник ориентирован на применение при решении неограниченно широкого круга задач анализа и управления, в том числе не известных во время проектирования. Поэтому главным компонентом цифрового двойника является комплекс разнородных информационных, расчетных, имитационных, нейросетевых и других моделей, способных описать все аспекты поведения оригинала с приемлемым уровнем достоверности [5]. В целях обеспечения удобного доступа к моделям в составе цифрового двойника их часто оформляют как (микро)сервисы. Сервисная архитектура, скрывающая детали реализации моделей, особенно удобна для применения в сетевых технологических инфраструктурах с распределенным управлением, в том числе децентрализованным.

В ходе жизненного цикла инфраструктуры цифровой двойник начинает формироваться задолго до физического оригинала, на стадии разработки концепции, при помощи средств класса САПР. Далее по мере проектирования и строительства двойник насыщается детальными моделями, позволяющими предсказывать характеристики оригинала, виртуально отрабатывать его поведение в различных условиях, проводить многокритериальное оценивание состояния. Здесь актуальны технологии порождающего проектирования (Generative Design), предназначенные для автоматического поиска оптимальных проектных и технологических решений на цифровых моделях [6]. Цикл порождающего проектирования включает автоматическое преобразование требований к изделию в задачу многокритериальной оптимизации, выбор наилучшего варианта решения этой задачи и последующее его воплощение при помощи средств автоматического производства. Такой подход был успешно апробирован в проектировании отдельных деталей высоконагруженных конструкций изделий машиностроения, с применением топологической оптимизации формы и трехмерной печати. Однако для сетевой технологической инфраструктуры проектирование на уровне деталей неактуально: варианты, порождаемые и оцениваемые компьютером, должны представлять архитектуру инфраструктуры, состав и характеристики оборудования, алгоритмы управления. Здесь требуются мощные алгоритмы навигации в мультимодельном пространстве дискретных нечисловых параметров, таких как структурные схемы, записи из каталогов оборудования, циклограммы алгоритмов. Целесообразно применять технологии порождающего проектирования и для поиска наилучших вариантов модернизации инфраструктуры на более поздних стадиях ее жизненного цикла, что способствует автоматизации управления ее структурной динамикой.

Мультимодельное описание оригинала реализуется в информационном обеспечении цифрового двойника, которое состоит из следующих компонентов (рис. 1):

- онтологическая модель;
- цифровые схемы и карты;
- электронная документация;
- информационные модели;
- оперативная информация;
- математические и имитационные модели.

При вводе цифрового двойника в эксплуатацию компоненты подключаются к источникам и получателям данных оригинала, которыми служат как датчики и исполнительные механизмы, так и всевозможные автоматизированные системы, в том числе указанные на рис. 1:

- автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУТП);
- автоматизированная система управления производственными процессами (manufacturing execution system, MES);
- автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ);
- автоматизированная система учета ресурсов (АСУР);
- автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ);
- система Industrial Internet of Things (IIoT);
- автоматизированная система управления предприятием (АСУП) или планирования ресурсов (enterprise resource planning, ERP);
- система электронного документооборота (СЭД);
- геоинформационная система (ГИС);
- система автоматизированного проектирования (САПР) или управления жизненным циклом оборудования (product lifecycle management, PLM);

- единая система управления нормативно-справочной информацией (ЕС НСИ);
- средства защиты информации (СЗИ).

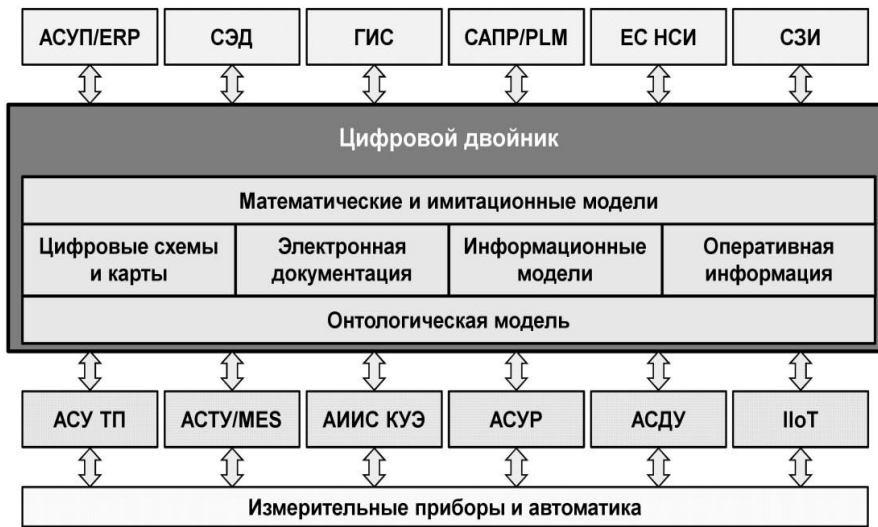


Рис. 1. Информационная архитектура цифрового двойника

В ходе функционирования инфраструктуры компоненты интенсивно взаимодействуют как с источниками и получателями данных, так и друг с другом, в том числе в режиме циклов с обратной связью, направленных на повышение достоверности двойника. В число вариантов использования каждого компонента входит предоставление данных другим слоям, ссылочная привязка данных других компонентов, верификация данных, а также генерация структуры компонентов (рис. 2) [5].



Рис. 2. Взаимодействие компонентов цифрового двойника

1.2 Онтологическая модель

Согласно ГОСТ Р 56272-2014/ISO/TS 15926-8:2011 «Системы промышленной автоматизации и интеграция. Интеграция данных жизненного цикла перерабатывающих предприятий, включая нефтяные и газовые производственные предприятия. Часть 8. Практические методы интеграции распределенных систем: практическая реализация сетевого языка онтологий (OWL)», онтологией предметной области (онтологической моделью) называется «формальное представление множества понятий в рамках некоторой области, а также отношения между этими понятиями». Онтологию можно рассматривать как набор утверждений, вытекающих из определений понятий. Онтология предназначена для обеспечения однозначности и корректности именования и интерпретации понятий

всеми участниками предметной деятельности, в первую очередь в условиях применения автоматизированных систем.

Основной структурой онтологии является граф в форме дерева, в узлах которого находятся понятия (классы), а ребра описывают отношение «частное–общее» (наследование, таксономию). Понятия имеют свойства (атрибуты) различных типов. Между понятиями могут быть заданы различные отношения (эквивалентность, близость, «часть–целое» и т. д.). В рамках онтологии могут быть описаны отдельные экземпляры понятий (индивиды), для которых в явном виде задаются значения свойств и факты нахождения в тех или иных отношениях с другими индивидами. Наконец, могут быть сформулированы утверждения об элементах онтологии, которые должны быть справедливыми на любом информационном массиве, удовлетворяющем этой онтологии (аксиомы). Примером аксиомы служит утверждение о симметричности некоторого отношения (что характерно для отношений эквивалентности и близости).

Для представления онтологии в машино-читаемой форме применяется язык OWL (Ontology Web Language), рекомендованный международным консорциумом W3C. Язык OWL позволяет декларировать классы, описывать их атрибутивный состав, задавать наследование и другие отношения, вводить индивиды путем инстанцирования классов. Правила записи аксиом и вывода теорем из них в OWL основаны на так называемой дескрипционной логике, близкой к логике первого порядка. Предусматривается возможность совместного использования онтологий: термины из одной онтологии могут ссылаться на термины другой, что позволяет создавать распределенные хранилища онтологических моделей. Такие хранилища заполняются триплетами (triple), представляющими элементарные единицы онтологического знания в форме утверждений вида «*подлежащее – сказуемое – дополнение*» (например, «*хвост – виляет – собакой*»).

Элементы онтологии итеративно извлекаются из письменных источников предметной области: стандартов, учебников, документов, баз данных и т. д. Результаты извлечения проходят процедуры анализа, нормирования и дополнения сообществом предметных экспертов, пользующихся доверием.

При онтологическом моделировании сетевой технологической инфраструктуры в качестве основных понятий выступают виды узлов сети, в том числе оборудования, приборов, средств связи, контроллеров и программных модулей. Предусматриваются классы для задания физических величин. Вводятся понятия, отношения и аксиомы для группировки узлов в различных разрезах: по типу/марке, по физическому (географическому) размещению, по организационной (субъектной) структуре, по функциональному признаку (включая компоновку измерительных каналов), по взаимозаменяемости и истории фактических замен и др. В качестве индивидов заводятся записи всевозможных справочников.

Основными вариантами использования онтологии являются:

- генерация структуры информационной модели;
- управление нормативно-справочной информацией;
- разработка прикладных протоколов взаимодействия, в том числе для мультиагентных систем;
- формирование моделей качества сервисов;
- разработка форм документов и видеокладов пользовательского интерфейса;
- вывод и верификация проектных решений;
- изучение предметной области.

1.3 Цифровые схемы и карты

Согласно ГОСТ 2.102-2013 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Виды и комплектность конструкторских документов», схема – это «*документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними*». Схема объекта может быть привязана к физическому расположению его структурных единиц в пространстве – для этого она наносится на подложку, условно изображающую область расположения объекта на земной поверхности (карту) или несущее его здание/сооружение (план). Схемы предназначены для того, чтобы показывать человеку наглядный целостный образ структуры и состояния большого объекта. Схемы позволяют визуально оценить главные факторы, определяющие мгновенное состояние объекта, точно рассчитать которые может быть трудно или вовсе невозможно.

Цифровые схемы предполагают развитые возможности навигации, в том числе изменение масштаба, поворот, перемещение между участками, позиционирование по заданным координатам. Также схемы делаются интерактивными: они размечаются ссылками на описания элементов объекта в информационной модели и снабжаются индикаторами всевозможной оперативной информации –

объема перетоков ресурсов, состояния коммутационных аппаратов, значений показателей технического состояния оборудования и др.

Схемы хранятся в виде многослойных векторных графических файлов, аннотированных атрибутивной информацией (в первую очередь уникальными идентификаторами элементов объекта в информационной модели). Для формирования и актуализации схем применяются как специализированные средства (САПР и инструменты цифровой картографии), так и графические редакторы общего назначения.

Для описания сетевой технологической инфраструктуры часто используются цифровые схемы различных типов, например:

- структурные схемы сетей (мнемосхемы);
- планы расположения оборудования и проводок;
- карты-схемы размещения узлов и сегментов сетей на местности.

Основными вариантами использования схем являются:

- наглядная визуализация целостного образа структуры и состояния объекта;
- оперативная индикация критических участков объекта;
- поиск информации о свойствах и состоянии составных частей объекта по топологическим критериям.

1.4 Электронная документация

Согласно ГОСТ Р 7.0.83-2012 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Электронные издания. Основные виды и выходные сведения», электронный документ – это (как и следует ожидать) *«документ в цифровой форме, для использования которого необходимы средства вычислительной техники или иные специализированные устройства для воспроизведения текста, звука, изображения»*. Перевод документов в электронный вид позволяет радикально снизить издержки, связанные с доступом к ним и с внесением изменений. Электронная документация на объект предназначена для оперативного предоставления всем участникам деятельности, связанной с объектом, информации об объекте в значимой (в том числе юридически) отчуждаемой форме.

Электронные документы служат стандартной входной и выходной формой для многих программных инструментов подготовки и обработки информации: от настольных редакторов текстов и изображений до САПР и ERP систем. Такие инструменты могут интегрироваться с информационными компонентами, перенося данные из хранилищ компонентов в документы и в обратном направлении. Также электронные документы могут возникать в качестве копий бумажных оригиналов при помощи сканирующих устройств. Из электронных документов, приходящих извне, извлекается наполнение различных информационных компонентов.

Электронная документация хранится в архиве, упорядоченном согласно иерархии категорий («папок»), отражающих назначение и содержание документов. Каждый документ имеет цифровую карточку, состоящую из уникального идентификатора, набора метаданных и перечня файлов, составляющих содержание документа. Типовой набор метаданных документа определен в стандарте ГОСТ Р ИСО 23081-1-2008 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Процессы управления документами. Метаданные для документов. Часть 1. Принципы».

Основными вариантами использования электронной документации являются:

- представление информации об объекте в значимой (в том числе юридически) отчуждаемой форме;
- выявление и проверка оснований для выполнения воздействий на объект;
- извлечение онтологических понятий и аксиом;
- извлечение схем и карт объекта;
- актуализация и верификация информационной модели объекта;
- актуализация и верификация оперативной информации;
- поиск документов по контексту и по метаданным;
- накопление архива документации на объект.

1.5 Информационные модели

Согласно ГОСТ 34.003-90 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения», информационная модель – это *«модель объекта, представленная в виде информации, описывающей*

существенные для данного рассмотрения параметры и переменные величины объекта, связи между ними, входы и выходы объекта и позволяющая путем подачи на модель информации об изменениях входных величин моделировать возможные состояния объекта». Элементы информационной модели часто называются мастер-данными. Информационная модель предназначена для использования в качестве полного непротиворечивого структурного описания объекта в форме, пригодной для эффективной обработки при помощи современных компьютерных технологий.

Информационная модель часто оформляется как реляционная база данных, структура которой формируется путем трансформации из онтологии предметной области: онтологические классы переходят в таблицы, свойства – в атрибуты, отношения – в ссылочные ключи и связующие таблицы, экземпляры – в записи, аксиомы – в правила верификации наполнения. Основным источником наполнения такой базы данных служит проектная документация, причем многие САПР позволяют накапливать мастер-данные непосредственно по мере проектирования. Если же производится «оцифровка» ранее построенного объекта, то мастер-данные формируются путем его обследования – документального и натурального.

При всех своих достоинствах, реляционные базы данных обладают существенным недостатком: они плохо приспособлены для хранения истории изменений значений атрибутов и особенно отношений между составляющими объекта. Ярким примером служит отношение «часть–целое на интервале времени» («TemporalWholePart»), введенное в стандартах серии ГОСТ Р ИСО 15926 с естественной целью отразить в информационной модели замену запасных частей в ходе эксплуатации технических изделий и ставшее показательным примером трудностей в реализации требований этих стандартов средствами современных информационных технологий. Один из способов обхода этого затруднения состоит в том, чтобы хранить полную историю изменений информационной модели в форме машино-читаемого журнала событий, а в реляционной базе размещать только актуальные мастер-данные. Этот подход известен под названием CQRS (Command Query Responsibility Segregation). В условиях его применения ретроспективная конфигурация объекта на любой момент времени может быть восстановлена путем «проигрывания» начального участка журнала до этого момента над пустой базой. Можно также распределять фрагменты журнала, описывающие формирование мастер-данных разных частей объекта, между разными хранилищами, находящимися «близко» к этим частям. Такая возможность важна при информационном моделировании крупномасштабной географически распределенной сетевой инфраструктуры.

Основными вариантами использования информационной модели являются:

- максимально точная привязка оперативных данных к составным частям объекта;
- предоставление мастер-данных расчетным и имитационным моделям поведения объекта;
- присвоение уникальных идентификаторов и кодов объекту, его составным частям и элементам;
- разграничение доступа по составным частям объектам;
- ведение истории изменений объекта в ходе жизненного цикла;
- проверка полноты и непротиворечивости данных путем сверки с фактической структурой объекта;
- поиск информации о составных частях объекта по значениям характеристик;
- генерация и верификация проектно-сметной документации на объект;
- визуализация состава и характеристик объекта в таблицах и на схемах.

1.6 Оперативная информация

Согласно ГОСТ 34.003-90 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения», оперативная информация автоматизированной системы – это «информация, отражающая на данный момент времени состояние объекта, на который направлена деятельность автоматизированной системы». Наиболее высококачественными считаются единицы оперативной информации, полученные путем полностью автоматического сбора с надлежащим образом проверенных (аттестованных) средств измерений с нормированной погрешностью, либо расчетным путем посредством аттестованных алгоритмов. Оперативная информация предназначена для достоверной оценки мгновенного состояния объекта.

К оперативной информации относятся, в частности, следующие массивы данных:

- временные ряды результатов периодических измерений физических величин, характеризующих функционирование объекта;
- журналы событий, в том числе телесигналов;

- маршрутные журналы передвижных единиц объекта;
- потоки аудиовизуальной информации об объекте;
- массивы значений экономических показателей функционирования объекта и рыночных условий;
- результаты оперативных расчетов, прогнозирования и оптимизации.

Каждый элемент оперативных данных снабжается метаданными, такими как тип, время возникновения, идентификаторы источника и процесса, в ходе которого возник элемент.

Хранение оперативной информации разделяется на два уровня: первичный и вторичный. На первичный уровень хранения оперативные данные поступают непосредственно по мере прихода от источников. Первичное хранилище должно успевать размещать данные и снабжать их необходимыми метаданными в темпе поступления, поэтому оно часто реализуется как база данных класса Time series database (TSDB), разделенная на контейнеры по источникам. Для дальнейшего анализа оперативная информация перемещается во вторичное хранилище, где она выстраивается вдоль различных измерений. Вторичное хранилище часто состоит из OLAP-кубов, конструируемых в той или иной системе аналитической отчетности.

Основными вариантами использования оперативной информации являются:

- оценивание состояния объекта и его элементов;
- оперативное обнаружение выхода значений параметров состояния объекта за пределы штатных диапазонов, включая аварийные ситуации;
- предоставление данных о состоянии объекта математическим и имитационным моделям объекта;
- накопление статистики по фактическому поведению объекта в различных условиях;
- поиск закономерностей в поведении объекта;
- структурная и параметрическая идентификация и верификация информационной модели объекта;
- верификация математических и имитационных моделей, в том числе ретропрогнозирование;
- генерация и верификация оперативной отчетной документации;
- визуализация параметров состояния объекта в условно реальном времени в виде таблиц, графиков, диаграмм и на схемах.

1.7 Математические и имитационные модели

Математические и имитационные модели непосредственно реализуют основное назначение цифрового двойника. В настоящее время выделяются два основных принципа построения этих моделей: путем численного описания физических явлений и путем машинного обучения по прецедентам. Модели физических явлений, основанные на численных методах решения дифференциальных уравнений математической физики, интенсивно развиваются в составе САПР (компьютерные инструменты инженерных расчетов – Computer Aided Engineering, CAE) согласно концепциям, сформировавшимся еще в XX веке, задолго до появления термина «цифровой двойник». Достижением последних лет можно считать появление высокопроизводительных вычислительных средств, способных выполнять инженерные расчеты не при проектировании изделия в конструкторском бюро, а в ходе эксплуатации в (условно) реальном времени на данных, поступающих с датчиков объекта. Это позволяет использовать САЕ в цифровых двойниках, однако трудно назвать такой подход концептуальным прорывом.

А для цифровых двойников крупномасштабной технологической инфраструктуры актуальны модели процессов, не поддающихся описанию дифференциальными уравнениями, таких как общесистемные (эмерджентные) процессы, процессы с участием человека, дискретные переходные процессы и др. Для таких процессов строятся, в частности, модели на основе глубоких (многослойных) искусственных нейронных сетей, способных выстраивать аппроксимации неизвестных зависимостей путем обучения на массивах известных примеров, грубо воспроизводя некоторые когнитивные процессы мозга. Такие модели способны прогнозировать поведение оригинала с приемлемой точностью в случаях, когда определяющие его закономерности очень сложны или неизвестны. Однако это возможно лишь при наличии хорошей обучающей выборки – статистически репрезентативного набора наблюдаемых сценариев поведения оригинала при различных значениях всех влияющих факторов. Поэтому при помощи нейросетевых моделей трудно предсказывать экстремальные и критические ситуации, история наблюдений которых невелика. И в нормальных условиях точность прогноза гарантируется лишь в среднем: могут существовать значения факторов, на которых выход

обученной нейросети будет сколь угодно сильно отличаться от правильного значения. В связи с этим, целесообразно включать в цифровые двойники множество принципиально различных моделей, способных верифицировать друг друга.

Основными вариантами использования математических моделей сетевой технологической инфраструктуры, а значит, и цифровых двойников в целом, являются:

- 1) многокритериальное оценивание и прогнозирование показателей функционирования узлов сети во всех аспектах;
- 2) многокритериальное оценивание и прогнозирование пропускной способности сегментов сети, соединяющих узлы;
- 3) расчет и отработка режимов функционирования сети, в том числе аварийных;
- 4) предсказательный мониторинг состояния оборудования, оценка аварийности и потребности в техническом обслуживании;
- 5) калибровка и верификация моделей и управляющих алгоритмов;
- 6) виртуальная апробация и оценивание проектных решений;
- 7) обучение и виртуальная тренировка персонала.

2 Алгебраические методы формирования и актуализации цифрового двойника

Для сложных объектов трудоемкой задачей может быть сборка целостного корректного цифрового двойника из двойников составляющих. Фактически, требуется виртуально воспроизвести процесс строительства сетевой технологической инфраструктуры на информационных и математических моделях. Перспективный подход к решению этой задачи предложен на базе алгебраического аппарата теории категорий [6]. Структурная схема объекта представляется диаграммой в категории, объектами которой служат алгебраические представления моделей системных единиц, а морфизмы описывают действия по сборке моделей сложных системных единиц из моделей составляющих. Для такой диаграммы вычисляется универсальная конструкция копредела (colimit) – алгебраический аналог сборки объекта. А в рамках порождающего проектирования ставятся и решаются обратные задачи поиска вариантов структуры объекта, наилучших с точки зрения целевых критериев, задаваемых функторами на подходящих категориях диаграмм.

Описанный подход может применяться начиная с уровня онтологических моделей. Предметом теоретико-категорной формализации здесь выступает процесс построения онтологий путем итеративного добавления групп тесно взаимосвязанных понятий, описывающих различные подобласти в предметной области. Такой процесс напоминает привычный подход к строительству зданий и кораблей, когда сначала возводятся несущие конструкции, затем прокладываются сети водоснабжения, электропроводка и другие инженерные и технологические системы, а в завершение выполняется отделка, покраска и меблировка. Каждой из этих стадий строительства соответствует выделенный фрагмент предметной области (дисциплина, аспект), имеющий сравнительно немного пересекающихся понятий с остальными. Формально онтологии и их фрагменты представляются (мульти)графами понятий и отношений, аксиомы на которых задаются в виде требований коммутативности различных путей, имеющих общее начало и общий конец. Между такими графами определяются гомоморфизмы, в результате чего получают категории онтологического моделирования. Процедура сборки сложных онтологических моделей отвечают трансформации графов, описываемые при помощи разнообразных универсальных конструкций в этих категориях.

Известно теоретико-категорное представление и для информационных моделей [7]. Здесь объектами служат множества данных различных типов, а морфизмы отвечают реляционным ссылкам – отображениям, посредством которых конструируются сложные массивы взаимосвязанных данных. При помощи копределов, произведений и других универсальных конструкций в такой категории строятся составные типы, в том числе задаваемые таблицами и целыми базами данных. Генерация структуры информационной модели из онтологии описывается функтором, действующим из категории онтологического моделирования в категорию всех множеств и отображений.

К числу прикладных методов теории категорий, актуальных для использования в составе цифровых двойников, относятся также представление дискретно-событийных имитационных моделей объектов помеченными частично упорядоченными множествами [6] и представление узлов распределенных вычислительных сред облачного типа полупримальными алгебрами [8].

3 Цифровой двойник инфраструктуры распределенной электроэнергетики

В литературе описано много практических примеров цифровых двойников изделий машиностроения – транспортных средств, станков, энергетических агрегатов [2]. Такие изделия имеют относительно малый масштаб (хотя и очень высокую сложность), и их модели часто базируются на САЕ. В отличие от них, в настоящем докладе рассматривается, в качестве примера крупномасштабной технологической инфраструктуры как оригинала для цифрового двойника, распределенная электроэнергетика. Современные территориально распределенные электроэнергетические системы включают разнообразное энергопринимающее оборудование с управляемым потреблением, локальное генерирующее оборудование на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) и накопители электричества. В настоящее время многие проблемы формирования, актуализации, верификации и применения цифровых двойников таких систем не решены и находятся в стадии интенсивных исследований. Ряд технологий цифровых двойников заимствуются из машиностроения, но приживаются в энергетике с большим трудом, поскольку требуют громоздких дорогостоящих программных инструментов и очень высокой квалификации персонала. Эти проблемы особенно остро ощущаются в жизненном цикле энергосистем массовых небольших потребителей низкого уровня напряжения (0,4 кВ), не располагающих ни инструментами, ни персоналом.

Рассмотрим подходы к решению этих проблем на примере разработки цифрового двойника энергосистемы пилотного объекта активного потребителя учебно-лабораторного назначения [9]. На этом цифровом двойнике были отработаны следующие варианты использования из списка, приведенного выше в п.1.7: (1) для показателей объема генерации, потребления, хранения электроэнергии оборудованием объекта, (5) в части уточнения профилей потребления отдельных энергоприемников по суммарным показаниям счетчиков, установленных на вводах в помещения (деагрегация), (6) в части автоматического поиска оптимальной конфигурации системы энергоснабжения. Были реализованы модели всех видов, представленных на рис. 1. Онтологическая модель была разработана в части электросетевого хозяйства и локальной генерации объекта на базе актуальных версий стандартов общей информационной модели CIM (Common Information Model) IEC 61968 и 61970, и дополнена понятиями из области инфраструктуры энергопотребления низкого напряжения, в которой существуют специализированные онтологии, такие как Smart Appliances REference (SAREF) ontology. Онтологическая модель позволила обеспечить однозначность и корректность интерпретации и использования понятий распределенной энергетики во всем цифровом двойнике, в том числе за счет реализации автоматического обмена информацией между моделями на языке OWL/XML. Цифровая однолинейная схема электроснабжения представляла топологию энергосистемы. Документация фиксировала проектные решения по электроснабжению в отчуждаемом от цифрового двойника виде. Информационная модель состояла из широкого набора реестров состава и характеристик оборудования генерации, потребления, хранения электроэнергии, содержащих в том числе паспортные характеристики, типовые профили нагрузки и диаграммы мощности генераторов. Оперативная информация в форме временных рядов потоков мощности периодически автоматически импортировалась из локальной системы сбора данных с цифровых счетчиков, установленной на объекте, и проходила деагрегацию, для которой существуют алгоритмы на базе искусственных нейронных сетей [10]. Была реализована экономико-математическая модель системы электроснабжения, позволяющая автоматически решать задачу порождающего проектирования в части подбора (суб)оптимальной конфигурации – состава оборудования генерации на ВИЭ и накопителей, способного обеспечить целевые профили нагрузки объекта. Конфигурации, полученные на выходе этой модели, передавались в имитационную модель, способную формировать и визуализировать графики состояния единиц оборудования, включая профили генерации/потребления, в том числе в переходных процессах, таких как переключение на питание от накопителя и цикл управляемого снижения потребления.

Была выполнена макетная программная реализация вышеописанного цифрового двойника энергосистемы пилотного объекта на базе продуктов Nrgpack, Matlab Simulink и Homer PRO (рис. 3).

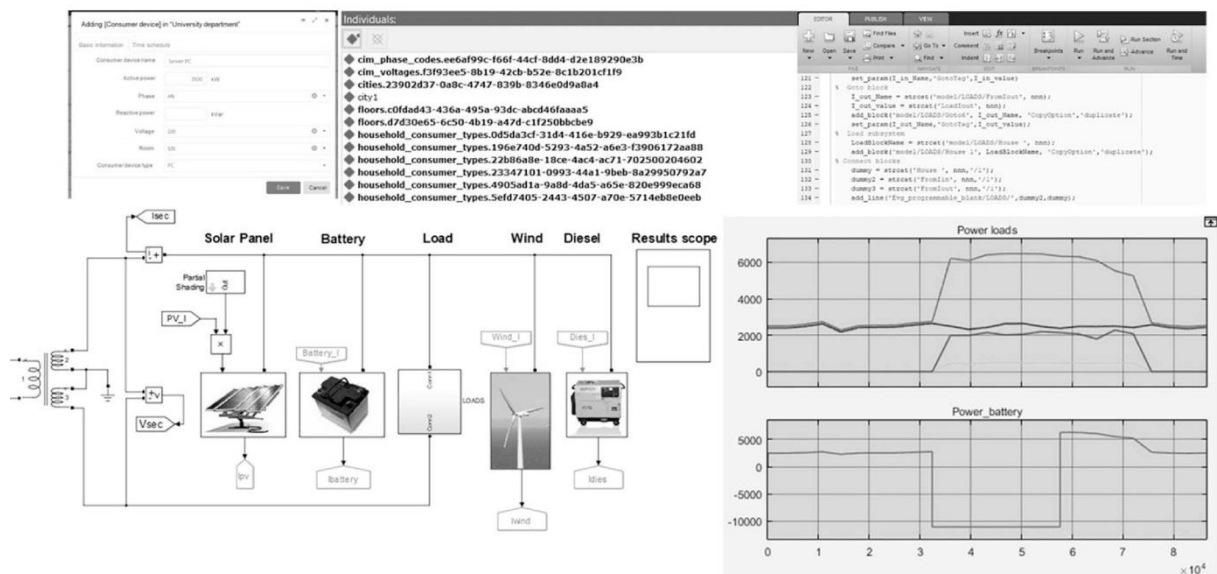


Рис. 3. Макет цифрового двойника энергосистемы [9]

Заключение

Подходы к мультимодельному описанию процессов управления технологической инфраструктурой с учетом структурной динамики на базе цифрового двойника, представленные в докладе, прошли апробацию на примере системы электроснабжения пилотного объекта активного потребителя учебно-лабораторного назначения. Теперь подходы подлежат полномасштабному воплощению в инструментах промышленного уровня готовности, которые позволят эффективно «оцифровать» широкий спектр технологических инфраструктур различного назначения. В ходе разработки таких инструментов возникнет много новых задач для дальнейших исследований.

Литература

1. Ковалёв С. П. Системный анализ жизненного цикла больших информационно-управляющих систем // Автоматика и телемеханика. 2013. № 9. – С. 98–118.
2. Madni A. M., Madni C. S., Lucero S. D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering // Systems. 2019. Vol. 7(1). – P. 7. – <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/1/7/html>.
3. Pettey C. Prepare for the impact of digital twins. – Stamford, CT, USA: Gartner, 2017.
4. Ковалёв С. П., Толок А. В. Применение модельно-ориентированного подхода в управлении жизненным циклом технических изделий // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 2. – С. 3–9.
5. Ковалёв С. П. Проектирование информационного обеспечения цифровых двойников энергетических систем // Системы и средства информатики. 2020. Т. 30, № 1. – С. 66–81.
6. Ковалёв С.П. Алгебраические методы порождающего проектирования крупномасштабных технических систем // Материалы двенадцатой Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2019). М.: ИПУ РАН, 2019. С. 384–386.
7. Spivak D., Kent R. Ologs: a categorical framework for knowledge representation // PloS one. 2012. Vol. 7. – P. e24274.
8. Ковалёв С. П. Алгебраический подход к проектированию распределенных вычислительных систем // Сибирский журнал индустриальной математики. 2007. Т. 10, № 2. – С. 70–84.
9. Андрияшевич С. К., Ковалёв С. П., Нефедов Е. И. Разработка цифрового двойника энергетической системы на основе онтологической модели // Автоматизация в промышленности. 2020. № 1. – С. 51–56.
10. Faustine A., Mvungi N. H., Kaijage S., Michael K. A survey on non-intrusive load monitoring methodies and techniques for energy disaggregation problem. – arXiv, 2017. – <https://arxiv.org/abs/1709.02513>.