



РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

С.К. Андриюшкевич (ООО «ИТСГ Регион»), С.П. Ковалёв (ИПУ РАН),
Е.И. Нефедов (Институт арктических технологий МФТИ)

Цифровой двойник энергетической системы рассматривается в качестве основного инструмента автоматизации управления объектами цифровой децентрализованной декарбонизированной¹ энергетики. Представлены результаты разработки цифрового двойника на репрезентативном пилотном объекте активного потребителя учебно-лабораторного назначения. Предложена архитектура цифрового двойника. В качестве примера применения цифрового двойника реализован расчет оптимальной конфигурации системы энергоснабжения, включающей накопителя электричества и генераторы на возобновляемых источниках энергии. Выполнена макетная программная реализация цифрового двойника энергосистемы пилотного объекта на базе продуктов Ngrack, Matlab и Homer PRO.

Ключевые слова: цифровой двойник, энергетическая система, онтологическое моделирование, активный потребитель электроэнергии.

Введение

В настоящее время во всем мире идет так называемый энергетический переход (energy transition) — формирование цифровой децентрализованной декарбонизированной энергетической инфраструктуры (перспектива 3D: digitalization, decentralization, decarbonization). Предполагается значительное технологическое и организационное развитие микроэнергетических систем современных активных потребителей с локальной генерацией на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) и накопителями электричества. Главным принципом организации управления такой высокотехнологичной энергетической инфраструктурой, в соответствии с парадигмой Industry 4.0, является формирование цифрового двойника (Digital Twin) — цифровой копии энергетического актива, достоверно воспроизводящей структуру, состояние и поведение оригинала в реальном времени, а также способной рассчитывать и оказывать управляющие воздействия на оригинал [1]. Комплекс цифровых двойников, целиком охватывающих инфраструктуру, способен обеспечить ее управляемость, устойчивость и оптимизацию в условиях децентрализованного распределенного управления. Особенно актуально управление на базе цифровых двойников для агрегаторов — субъектов рынка, объединяющих возможности больших групп владельцев активов по снижению потребления, накоплению и производству электричества в цельные экономические объекты оптимального/системного масштаба. При этом важно, чтобы разноплановые участники жизненного цикла активов одинаково и корректно именовали и интерпретировали понятия, с которыми оперирует цифровой двойник.

Для этого в его основу помещается онтологическая модель энергетической инфраструктуры, для формирования которой накоплен значительный задел [2].

В то же время многие проблемы формирования, актуализации и применения цифровых двойников в энергетике не решены и находятся на стадии интенсивных исследований. Концептуальная основа цифрового проектирования энергетических систем в целом соответствует уровню традиционных САПР и PLM систем образца начала XXI столетия. Технологии формирования и применения цифровых двойников, заимствованные «по умолчанию» из машиностроения, приживаются в энергетике с большим трудом, требуют громоздких дорогостоящих программных инструментов и очень высокой квалификации персонала. Не хватает однозначно интерпретируемых достоверных данных в стандартных машинно-читаемых форматах, адекватных математических моделей, приборного оснащения. Очень медленно развиваются технологии типа порождающего проектирования (Generative Design), позволяющие автоматически находить оптимальные проектные решения по энергоснабжению. Эти проблемы особенно остро ощущаются в жизненном цикле энергосистем массовых небольших потребителей низкого уровня напряжения (0,4 кВ), не располагающих мощными информационными системами и высококвалифицированным персоналом.

Для выработки подходов к решению этих проблем в приложении к объектам цифровой децентрализованной декарбонизированной энергетики, выполненна научно-исследовательская работа, направленная

¹ Декарбонизация энергетики — это решение актуальной проблемы снижения углеродоемкости в энергетике.

на апробацию принципов цифрового моделирования и порождающего проектирования энергетических систем нового поколения при помощи программных макетов на примере пилотного объекта активного потребителя учебно-лабораторного назначения [3]. Работа включает автоматизированное формирование цифрового двойника его энергосистемы и автоматический поиск оптимальной конфигурации системы энергоснабжения, содержащей локальное генерирующее оборудование на ВИЭ и накопители электроэнергии. Результаты этой работы представлены в настоящей статье.

Архитектура цифрового двойника энергетической системы

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. Предусматриваются мощные механизмы калибровки моделей в целях повышения их достоверности, в том числе путем машинного обучения. В целях обеспечения удобного доступа к моделям в составе цифрового двойника их часто оформляют как сервисы. Сервисная архитектура, скрывающая детали реализации моделей, особенно удобна для применения в распределенных системах с децентрализованным управлением.

Для энергетических систем основными вариантами использования цифровых двойников являются:

- 1) оценка и прогнозирование генерации, потребления, хранения энергоресурсов во всех аспектах;
- 2) оценка и прогнозирование пропускной способности сегментов энергосетей;
- 3) расчет и обработка уставок, переключений, аварийных режимов;
- 4) предсказательный мониторинг состояния оборудования, оценка аварийности и потребности в техническом обслуживании;
- 5) калибровка и верификация моделей и управляющих алгоритмов;
- 6) виртуальная апробация и оценка проектных решений;
- 7) обучение и виртуальная тренировка персонала энергетических объектов.

Для энергосистемы пилотного объекта учебно-лабораторного назначения был построен классический

цифровой двойник базового типа (Baseline Twin) [4]. Как описано в последующих разделах, на нем были отработаны следующие варианты использования: (1) в полном объеме; (5) в части уточнения профиля потребления отдельных энергоприемников по интегральным показаниям приборов учета, установленных на вводах в комнаты (деагрегация); (6) в части автоматического поиска оптимальной конфигурации системы энергоснабжения. При этом было подтверждено, что для корректного функционирования математических моделей необходимо снабжать их исходными данными из базовых информационных компонентов, описывающих объект в различных аспектах в машинно-читаемом виде. Во избежание ошибок интерпретации данные были структурированы согласно онтологической модели. Предоставление данных математическим моделям выполняется в автоматическом режиме, чтобы двойники всегда имели актуальную неискаженную картину структуры и состояния объекта.

Основываясь на обширном опыте авторов в проектировании больших информационно-управляющих систем в энергетике [5], были выявлены следующие базовые информационные компоненты цифрового двойника:

- цифровые схемы и карты (в первую очередь однолинейная схема электроснабжения);
- электронная документация (проектно-сметная, эксплуатационная и др.);
- информационные модели (мастер-данные);
- оперативная информация (результаты приборных измерений потребления и первичных характеристик технического состояния оборудования).

Был сформирован перечень классов смежных автоматизированных систем, выступающих как источниками, так и потребителями данных цифрового двойника, в том числе:

- 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 энергоресурсов (АСУЭр);
- 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);

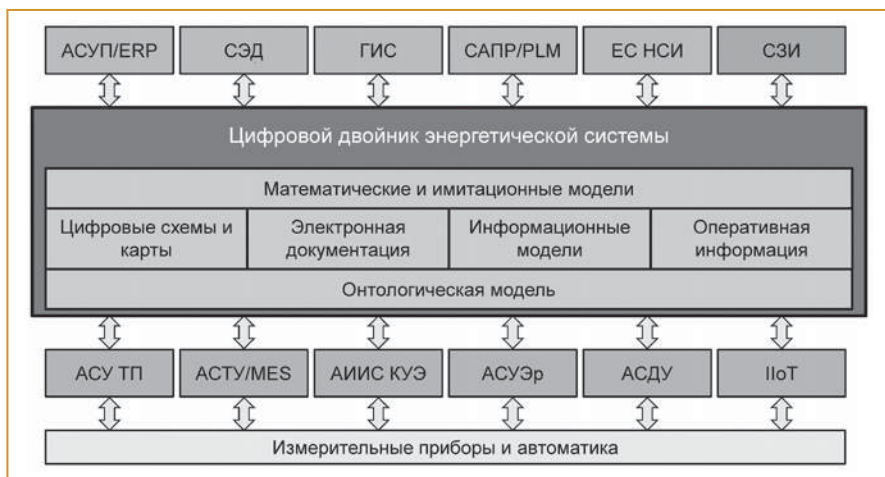


Рис. 1. Архитектура цифрового двойника энергетической системы

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

Разработанная архитектура цифрового двойника, включая его структуру и взаимосвязи со смежными автоматизированными системами, изображена на рис. 1.

Для сложных объектов возникает проблема сборки целостного цифрового двойника из двойников составляющих с учетом правил их соединения. По существу, здесь требуется виртуально воспроизвести процесс сборки энергосистемы объекта на информационных и математических моделях. Перспективный подход к решению этой проблемы предложен на базе математического аппарата теории категорий [6]. Схема энергосистемы представляется диаграммой в категории, объектами которой служат алгебраические представления моделей системных единиц, а морфизмы описывают действия по сборке моделей систем из моделей составляющих. Для этой диаграммы вычисляется универсальная конструкция копредела (colimit) — алгебраический аналог сборки системы.

Для информационных моделей такое теоретико-категорное представление известно [7]. Здесь объектами служат множества данных различных типов,

а морфизмы отвечают реляционным ссылкам, посредством которых конструируются сложные массивы данных. При помощи копределов, произведений и других универсальных конструкций в такой категории строятся составные типы, в том числе задаваемые таблицами и целыми базами данных.

Онтологическое моделирование инфраструктуры активного потребителя

Процесс формирования цифрового двойника крупноблочно показан на рис. 2. Онтологическое моделирование составляет в нем фундамент стадии проектирования.

Для энергетической инфраструктуры потребителей онтологическое моделирование затруднено тем обстоятельством, что широко распространенные обобщенные информационные модели (common information models — CIM), служащие источником терминов и отношений, в основном ориентированы на крупные энергетические объекты: электростанции, линии электропередачи, подстанции. Моделирование территориально локализованных энергетических объектов потребления низкой мощности представляет сложную задачу, в том числе ввиду высокой вариативности имеющегося у них энергетического оборудования. В процессе моделирования необходимо одновременно решать несколько подзадач: анализ предметной области, выявление сущностей, определение состава и типа их характеристик, формирование связей между ними, апробация конструируемой модели для решения практических задач.

В описываемой работе этот процесс был разбит на итерации. Одна итерация включает действия по формированию и апробации очередной версии онтологии. При необходимости корректировки или уточнения онтологии, итерации повторяются. Апробация онто-

логии включает следующие шаги: настройка метамодели для информационной модели пилотного объекта, внесение данных об объекте в информационную модель, выгрузка этой модели для поиска оптимальной конфигурации системы энергоснабжения, проверка семантической корректности и достаточности данных. Если на введенных данных удается решить при-

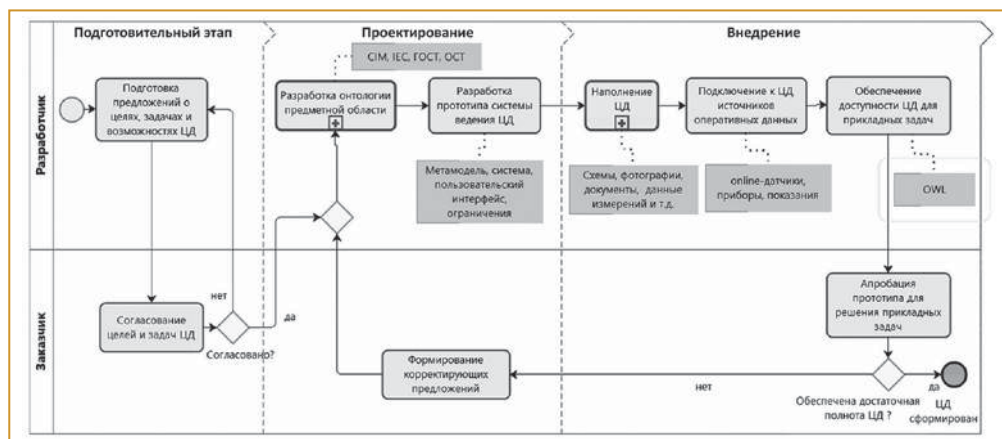


Рис. 2. Процесс формирования цифрового двойника (ЦД)

кладную задачу поиска конфигурации и выполнить имитационное моделирование процессов ее функционирования и расчет управляющих воздействий с практически приемлемой степенью достоверности (в рассматриваемом случае, с ошибкой $\leq 10\%$), то полнота цифрового двойника признается достаточной, и итерации прекращаются.

Для ведения информационных моделей и других компонентов цифрового двойника энергетической системы пилотного объекта был разработан макет программного комплекса на базе отечественного продукта «Конструктор сбора и анализа данных Njrasck» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619833). Продукт представляет собой программный конструктор, предназначенный для построения систем автоматизации моделирования сложных технических объектов. Продукт состоит из множества микросервисов — компактных, слабо связанных и легко изменяемых модулей, взаимодействующих на основе стандартных коммуникационных протоколов [8]. Микросервисы конструктора поддерживают процедуры хранения и ведения метамodelей, справочников, мастер-данных, документов и других данных, а также функции расчета и анализа данных, предоставления Web-интерфейса пользователям, формирования отчетов, защиты информации, интеграции со смежными автоматизированными системами (в том числе с системами сбора данных и оперативного управления), выгрузки данных моделей в машинно-читаемых форматах, ведения системного журнала и др. Примеры экранов комплекса, предназначенных для отображения и ввода элементов информационной модели, показаны на рис. 3 (с условными значениями характеристик элементов).

Архитектурную основу комплекса составляет метамодель — описание информационных сущностей, характеристик, связей между ними. Такое проектное решение позволило автоматизировать выполнение рутинных программистских задач:

- компоновка форм пользовательского интерфейса для выполнения операций создания, просмотра, обновления и удаления данных (CRUD-операции);
- автоматическое формирование структуры и наполнения базы данных;
- выгрузка информационной модели для передачи на вход математических и имитационных моделей.

Тем самым поддержка ведения цифрового двойника сводится к настройке метамодели в соответствии с онтологией. Такой подход позволяет сократить затраты времени и труда на выполнение итераций разработки двойника по сравнению с традиционным подходом. Дело в том, что традиционно элементы онтологии представляются в виде классов и объектов, описанных непосредственно в исходном тексте программ. Поэтому при изменении онтологии недостаточно перенастроить метамодель через пользовательский интерфейс, как в разработанном программном комплексе: приходится изменять исходный текст,

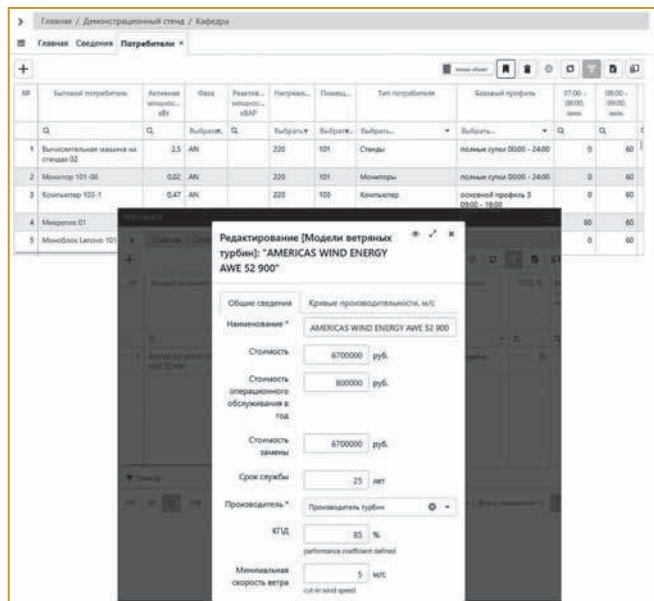


Рис. 3. Пример экранов отображения и ввода элементов информационной модели

перекомпилировать, тестировать и устанавливать новую версию программного обеспечения.

Программный комплекс ведения цифрового двойника построен по архитектуре CQRS (command query request segregation), которая предполагает разделение набора обращений пользователя к системе на два независимых потока: запросы и команды. При внесении изменений в информационную модель или метамодель пользователь формирует запрос на изменение, на который система реагирует изменением структуры данных или их наполнения посредством соответствующих событий. Следует отметить, что архитектура CQRS применена не только к сущностям информационной модели, но и к сущностям метамодели, что позволило выделить в отдельный поток события, направленные на изменение структуры информационной модели, а не только наполнения. Одним из способов обработки событий является представление информационной модели в реляционной базе данных. Такой подход, традиционный для высоконагруженных систем, представляет особый интерес в задачах создания и ведения цифрового двойника, поскольку позволяет формировать разные реляционные проекции, оптимизированные под разные варианты использования двойника.

На базе метамодели в программном комплексе реализована автоматическая выгрузка полного набора сведений об объекте в файл на стандартном языке онтологического моделирования OWL (Ontology Web Language), рекомендованном международным консорциумом Web-технологий W3C. Инструменты выгрузки основываются на метамодели и поэтому автоматически адаптируются под изменения онтологии. Использование языка OWL позволило обеспечить легкость подключения произвольных математических и имитационных моделей и тем самым

максимально расширить сферу применения цифрового двойника.

Поиск оптимальной конфигурации гибридной системы энергоснабжения

Построенные модели пилотного объекта были использованы для автоматического поиска оптимальной конфигурации системы энергоснабжения. Под оптимальной конфигурацией подразумевается такой состав компонентов генерации и накопителей, которое приводит к наибольшему эксплуатационному эффекту по сравнению с пассивным питанием от внешней электрической сети. Критерии эффекта могут быть экономическими (приведенная годовая стоимость энергоснабжения), электротехническими (качество электроснабжения), экологическими (объем вредных выбросов) [9]. Существуют различные способы математического решения подобных задач оптимизации. Например, можно было бы использовать генетический алгоритм, как в работе [9], однако в распоряжении авторов статьи не было требуемых алгоритмом вычислительных ресурсов. Поэтому вместо него использовался более «легковесный» программный продукт HOMER Pro, предназначенный для нахождения экономически субоптимальных решений по электроснабжению для активных микроэнергосистем или изолированных территорий. Таким образом, слой математических моделей цифрового двойника пилотного объекта был собран над онтологической моделью из следующих частей, как показано на рис. 4:

- модель в HOMER Pro для определения оптимального состава системы энергоснабжения;
- динамическая модель в Matlab Simulink для проверки функционирования конфигурации;
- набор скриптов на языках Python и Matlab для связи всех моделей между собой.

Модель в HOMER Pro подбирает субоптимальное соотношение компонентов генерации на ВИЭ и накопителей электроэнергии для обеспечения профиля нагрузки, сформированного согласно информационной модели. Результаты экспортируются в файлы формата Excel для передачи в динамическую модель энергосистемы. Динамическая модель была создана на основе известной модели микроэнергетической системы из базы моделей Matlab [10] и переработана под варианты использования цифрового двойника пилотного объекта. Модель автоматически создает конфигурацию системы энергоснабжения по выходным файлам продукта HOMER Pro; также в ней смоделирована централизованная электрическая сеть, которая либо обеспечивает энергоснабжение нагруз-

ки (в случае, когда не хватает собственной генерации и накопленной энергии), либо принимает избыток мощности (генерации). Период симуляции выбирается пользователем; так, модель хорошо подходит для определения режима энергоснабжения на сутки вперед. Данные, определяющие сценарий работы компонентов (такие как профили нагрузки каждого энергоприемника, степень износа накопителя электроэнергии, скорость ветра) для выбранного периода времени импортируются из информационной модели и внешних сервисов. Модель выводит график состояния для каждой единицы оборудования, параметры, профили генерации/потребления. Отображаются переходные процессы, такие как переключение на питание от накопителя и цикл управляемого снижения нагрузки. Имеется возможность рассчитать и задать уставки для инвертора накопителя.

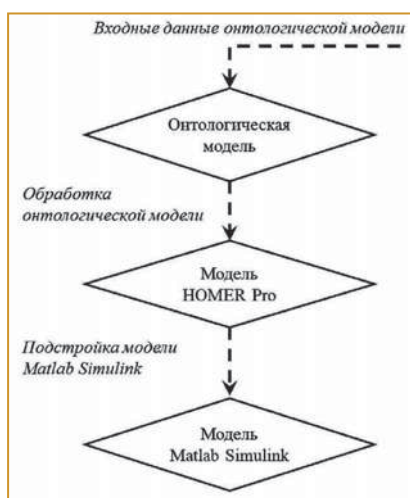


Рис. 4. Схема функционирования слоя математических моделей цифрового двойника

Как отмечалось выше, одной из главных проблем, решаемых в ходе представленной работы, была нехватка средств автоматической синхронизации данных между слоями цифрового двойника и со смежными системами. С целью решения этой проблемы, были разработаны скрипты на языках Python и Matlab, из которых наиболее важными являются следующие два.

Первый скрипт обрабатывает файл OWL/XML, автоматически выгружаемый из программного комплекса ведения информационных компонентов цифрового двойника. Из файла формируется почасовой профиль потребления для

каждого энергоприемника, указанного в информационной модели, и суммарный профиль по всем энергоприемникам. Профиль рассчитывается на основе информации о номинальном энергопотреблении и режиме работы энергоприемника. Этот профиль является оценочным и подлежит калибровке по данным о фактическом потреблении согласно приборам учета. При этом, поскольку один прибор учета чаще всего охватывает несколько энергоприемников (располагаясь, например, на вводе в рабочее помещение), требуется деагрегация — распределение его показаний между приемниками. Данные с приборов учета сопоставляются с составленными расчетными профилями, после чего по характеру изменения потребления (например, быстрое заметное увеличение либо уменьшение мощности) оценивается энергопотребление каждого отдельного прибора. В результате формируется достоверный профиль, который поступает на вход продукту HOMER Pro.

Второй скрипт выполняет автоматическую подстройку динамической модели Matlab по результатам работы продукта HOMER Pro. В ходе подстройки

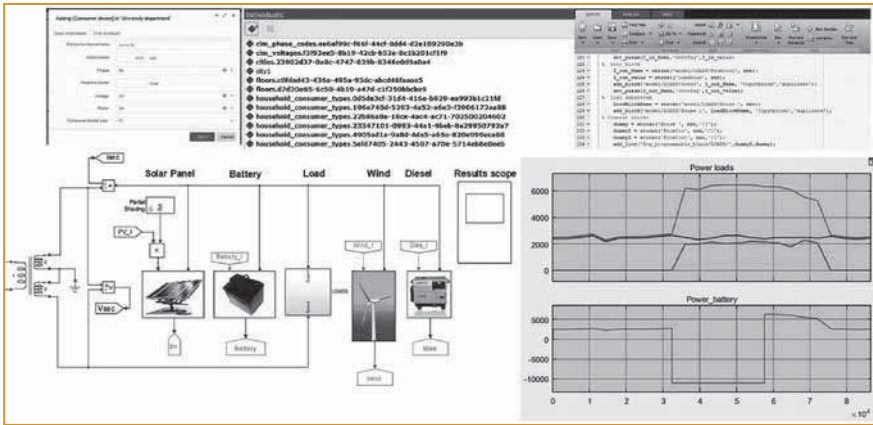


Рис. 5. Пример имитационной модели функционирования энергосистемы

в модель Simulink программно вносятся изменения, приводящие к созданию необходимого числа блоков и элементов, а также электрических и информационных сигналов между ними, согласно информационной модели потребителя и рассчитанной конфигурации системы энергоснабжения. В результате формируется итоговая имитационная модель функционирования энергосистемы, обладающая высокой степенью достоверности, пример которой показан на рис. 5.

Таким образом, участие пользователя необходимо лишь на этапе ввода информации об энергоприемниках (число, расположение по помещениям, номинальное энергопотребление, режим использования) в Web-интерфейс программного комплекса и для запуска продукта HOMER Pro. Формирование полномасштабного цифрового двойника энергосистемы происходит уже в полностью автоматическом режиме. Далее пользователь лишь выбирает, в каких условиях ему необходимо оценить функционирование энергосистемы в целом и ее составляющих, какие конкретные параметры состояния и виды управляющих воздействий его интересуют. Тем самым сформирована программно-технологическая база, на которой можно без излишних затрат реализовать многие другие варианты использования цифрового двойника энергосистемы, возникающие при управлении сетью, расчете и оптимизации режимов, диагностике и прогнозировании отказов и катастроф, виртуальной тренировке персонала.

Заключение

На примере репрезентативного пилотного объекта, а именно учебно-лабораторного комплекса, удалось пройти без излишних затрат труда и времени при помощи программных макетов, настроенных надлежащим образом, процесс автоматизированного формирования

цифрового двойника и автоматического поиска оптимальной конфигурации системы энергоснабжения. Был построен классический цифровой двойник базового типа (Baseline Twin) энергосистемы типового активного потребителя низкого напряжения. Исходя из полученного при этом опыта и теоретических исследований, была разработана и обоснована на практике архитектура цифрового двойника энергетической системы. Полученные результаты являются основополагающими для проектирования систем управления энергетической инфраструктурой будущего.

Список литературы

1. Madni A.M., Madni C.C., 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/htm>.
2. Ковалев С.П. Применение онтологий при разработке распределенных автоматизированных информационно-измерительных систем // Автотометрия. 2008. Т. 44. № 2. С. 41-49.
3. Andryushkevich S.K., Kovalyov S.P., Nefedov E. Composition and application of power system digital twins based on ontological modeling. In: Proc. 17th IEEE Intl. Conf. on Industrial Informatics INDIN'19. Helsinki-Espoo, Finland: IEEE, 2019. P. 1536-1542.
4. Erikstad S. Design patterns for digital twin solutions in marine systems design and operations. In: Proc. 17th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries COMPIT'18. Hamburg, Technische Universität Hamburg. 2018. P. 354-363.
5. Андриюшкевич С.К., Ковалев С.П. Динамическое связывание аспектов в крупномасштабных системах технологического управления // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16. № 6. С. 3-12.
6. Ковалев С.П. Методы теории категорий в модельно-ориентированной системной инженерии // Информатика и ее применения. 2017. Т. 11. Вып. 3. С. 42-50.
7. Spivak D., Kent R. Ologs: a categorical framework for knowledge representation // PloS one. 2012. Vol. 7. P. e24274.
8. Ньюмен С. Создание микросервисов. СПб: Питер, 2016. 304 с.
9. Ming M., Wang R., Zha Y., Zhang T. Multi-objective optimization of hybrid renewable energy system using an enhanced multi-objective evolutionary algorithm // Energies. 2017. Vol. 10. P. 674.
10. Hiroumi M. Simplified model of a small scale micro-grid. <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html>.

Андриюшкевич Сергей Константинович – канд. техн. наук, руководитель проектов ООО «ИТСГ Регион»,

Ковалёв Сергей Протасович – д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник

Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Нефедов Евгений Игоревич – инженер-конструктор Института арктических технологий

Московского Физико-Технического Института.

Контактный телефон (495)334-92-20.

E-mail: askbox@gmail.com kovalyov@sibnet.ru evgenynefedov88@gmail.com

Поступила в редакцию – 5.11.2019.

После доработки – 11.12.2019.

Принята в печать – 20.12.2019.