

УДК 004.82

РАЗРАБОТКА ОНТОЛОГИЙ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЗДАНИЙ

О.Ю. Марьясин

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия
maryasin2003@mail.ru

Аннотация

Рассматривается разработка онтологических моделей для цифрового двойника зданий. Предлагаемая в статье архитектура цифрового двойника здания включает целый комплекс моделей, среди которых одну из главных ролей играют онтологии. Комплекс онтологий цифрового двойника включает: онтологию информационной модели здания, онтологию энергомодели, онтологию инженерных систем здания, онтологию компьютерных моделей здания, онтологию автоматизированной системы управления зданием и другие. В результате работы был создан набор независимых базовых онтологий, пригодных для повторного использования. Приведены примеры описания классов базовых онтологий и отношений между ними. Модульный принцип построения значительно облегчает создание онтологий цифрового двойника, имеющих пересекающиеся множества понятий и отношений из их предметной области. Используя набор базовых онтологий, можно создать онтологии, необходимые для функционирования цифрового двойника здания. Приводится пример построения онтологии автоматизированной системы управления зданием. Новым является детальная проработка онтологий по сравнению с известными онтологиями, заключающаяся в добавлении новых необходимых классов, подклассов и отношений. Это значительно расширяет возможности описания предметной области. Применение онтологий значительно облегчает обмен данными между встроенными моделями и служебными программами цифрового двойника, а также между цифровым двойником и людьми или внешними программами.

Ключевые слова: информационная модель здания, энергомодель, цифровой двойник, семантическая паутина, онтология, Protégé.

Цитирование: Марьясин, О.Ю. Разработка онтологий для цифрового двойника зданий / О.Ю. Марьясин // Онтология проектирования. – 2019. – Т.9, №4(34). – С.480-495. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-480-495.

Введение

Проект «Умный город», включённый в программу «Цифровая экономика Российской Федерации», предполагает применение современных IT-решений в части формирования комфортной городской среды, жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), градостроительства, безопасности, управления транспортными и пешеходными потоками. Инновационные технологии «Умного города» способны обеспечить принципиальное повышение качества жизни в городах, что особенно важно для небольших городов. Новые технологии позволяют делать города удобными, привлекательными для жизни за счёт цифровой трансформации [1].

«Умный город» включает «Умное ЖКХ», которое, в свою очередь, состоит из «Интеллектуальных зданий» и «Умных домов». «Интеллектуальное здание» может быть определено как здание и его инфраструктура, предоставляющие жителям среду для обитания, которая является гибкой, эффективной, удобной и безопасной благодаря использованию интегрированных в здание технологических систем, средств коммуникации и контроля. Интеллектуальный строительный институт (*The Intelligent Building Institute*, США) определил «Интеллектуальное здание» как энергетически и экономически эффективную среду, основанную на

оптимизации элементов здания - конструкций, инженерных систем, систем обслуживания и управления - и на обеспечении взаимосвязи между этими элементами [2].

1 Описание предметной области

Для чёткого понимания рассматриваемой предметной области (ПрО) необходимо отметить отличия между системами «Умный дом», «Интеллектуальное здание», системами автоматизации зданий (*Building Automation System – BAS*), автоматизированными системами управления зданиями (*Building Management System – BMS*) и системами управления энергопотреблением (*Building Energy Management System – BEMS*). Между этими системами есть много общего. Термины *BAS* и *BMS* можно считать эквивалентными. *BEMS* системы подобны *BMS*, но больше ориентированы на энергосбережение и управление энергопотреблением. Термин «Умный дом» в отличие от термина «Интеллектуальное здание» чаще используется применительно к системам автоматизации в жилом секторе.

В настоящее время при построении «Интеллектуального здания» и управлении его инженерным оборудованием используется ряд перспективных цифровых технологий. Среди них: цифровое строительство (*Digital Construction*), «Интернет вещей» (*Internet of Things – IoT*), облачные технологии (*Cloud Services*). Цифровизация строительства предполагает автоматизацию всех стадий и процедур на всём жизненном цикле (ЖЦ) объекта. Основой цифрового строительства стало развитие технологии информационного моделирования зданий (*Building Information Model – BIM*). *BIM* – это подход к проектированию, возведению, оснащению, обеспечению эксплуатации и ремонту здания, который предполагает сбор и комплексную обработку в процессе проектирования всей архитектурно-конструкторской, технологической, экономической и иной информации о здании со всеми её взаимосвязями и зависимостями, когда здание и всё, что имеет к нему отношение, рассматриваются как единый объект. Информационная модель – это ценный источник информации на протяжении всего ЖЦ здания: от предварительной концепции, проекта, строительства и монтажа инженерных систем здания до управления и технического обслуживания объектов [3].

Следующий шаг в цифровом строительстве – создание цифровых двойников зданий (*Digital Twin*). Цифровым двойником называют виртуальную модель, которая на микро- и макроуровне либо описывает реально существующий объект (выступая как дубль готового конкретного изделия), либо служит прототипом будущего объекта. При этом любая информация, которая может быть получена при тестировании физического объекта, должна быть получена и на базе тестирования его цифрового двойника. В концепции цифрового двойника виртуальная модель созданного материального объекта используется в связке с физическим на протяжении всего ЖЦ: на этапе тестирования, доработки, эксплуатации и утилизации. Физический объект использует датчики, которые собирают данные о состоянии объекта в реальном времени, после чего эти сведения отправляются цифровому двойнику. На основе полученных данных уточняется цифровая модель, которая, в свою очередь, даёт рекомендации по оптимизации режима эксплуатации и обслуживания реального объекта [4].

Проблемы сохранения окружающей среды и снижения коммунальных платежей требуют выполнения мер по энергосбережению и повышению энергетической эффективности при проектировании зданий. В то же время необходимо гарантировать комфортную и здоровую среду в помещениях. Всё это создаёт благоприятные условия для более широкого использования моделирования энергопотребления зданий (*BEM – Building Energy Modeling*). Энергомоделирование в России, как и во многих других странах, пока является добровольным делом, если только не нужно сертифицировать здание на соответствие «зелёным» стандартам, таким как *Green Zoom* [5]. Однако при проектировании систем отопления, вентиляции и кон-

диционирования (*HVAC – Heating, Ventilation, & Air Conditioning*) приходится выполнять расчёты, связанные с теплообменом, обеспечением качества воздуха в помещениях и энерго-сбережением.

Сложность строительной инфраструктуры, связанная с множеством различных типов зданий, высокие требования к исполнению и эксплуатации инженерных сетей зданий приводят к тому, что при их проектировании необходимо обеспечить междисциплинарное взаимодействие между различными системами здания для выполнения комплексных расчётов и моделирования. Данные о конструкции и материалах здания из *BIM* должны использоваться для проведения энергомоделирования в *BEM*, а построенные там модели использоваться при проектировании *HVAC* систем. Данные о моделях и *HVAC* оборудовании используются при синтезе системы управления зданием, потом вместе с данными о системе управления при проектировании информационной сети здания и других систем. При этом, большинство операций по передаче данных осуществляются вручную при отсутствии общепринятых форматов передачи информации между многими системами.

Доступ к данным важен не только на этапе проектирования, но и на других этапах ЖЦ здания, таких как строительство, логистика, эксплуатация и реконструкция. При этом для повышения эффективности и удобства работы с информацией необходимо обеспечить, чтобы нужные данные были доступны постоянно и откуда угодно. Для этого необходимо организовать круглосуточный доступ к информации через Интернет.

Технологии семантической паутины (*Semantic Web*), связанных данных (*Linked Data*) или связанных открытых данных (*Linked Open Data – LOD*) [6] позволяют решить указанные проблемы и являются одним из эффективных способов обеспечения интероперабельности между различными системами. При этом базовую роль в стеке технологий семантической паутины играют онтологии. Использование онтологий облегчает совместное использование информации между различными системами, между людьми и программами или между программными агентами, позволяет выполнить отделение знаний в Про от оперативных знаний, контролировать целостность и непротиворечивость данных. Онтологии, в отличие от простого обмена данными с помощью форматов *XML* и *JSON*, могут определять не только синтаксис, но и семантику передаваемых данных. Для кодирования онтологий применяются языки *RDF* и *OWL*.

2 Архитектура цифрового двойника здания

В настоящее время концепция цифрового двойника здания ещё только прорабатывается. Автор предлагает свой взгляд на эту концепцию, в соответствии с которым архитектура цифрового двойника здания имеет вид, показанный на рисунке 1. Данная архитектура основана на разработанной в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук архитектуре цифровых двойников энергетических объектов [7].

Цифровой двойник здания должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- включать детальную информацию о конструкции здания, материалах, размерах и т.д. на уровне *CAD*-документации и *BIM*-модели;
- охватывать все основные инженерные подсистемы здания;
- иметь общий словарь терминов для использования людьми и программными агентами;
- иметь связь с *BEM* системами или иметь реализацию функций *BEM*;
- иметь развитые математические возможности, векторно-матричные операции, решение систем дифференциальных уравнений, возможность свободного программирования, создания новых объектов и компонентов, возможность дискретно-событийного, агентного и имитационного моделирования;

- иметь возможность реализации в «облаке»;
- иметь поддержку открытых интерфейсов и протоколов связи с *BMS*, системами мониторинга и *IoT*;
- иметь поддержку *Web*-сервисов;
- иметь графический интерфейс пользователя, *Web*-интерфейс;
- включать развитые средства визуализации, в том числе трёхмерной;
- включать функции параметрической оптимизации, функции анализа данных с использованием статистических и кибернетических методов.

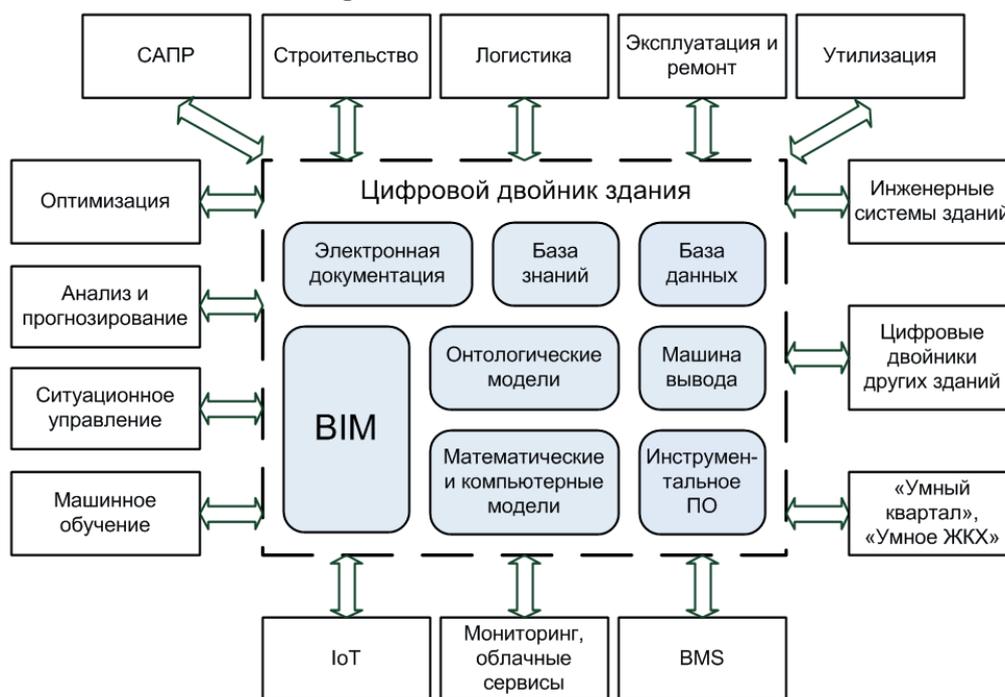


Рисунок 1 – Архитектура цифрового двойника здания

Решения с использованием цифровых двойников строятся на комплексе технологий. Комплекс моделей цифрового двойника зданий включает:

- *CAD*- и *BIM*-модели, которые содержат информацию о конструкции здания, информацию о материалах, размерах и прочих параметрах;
- математические и компьютерные модели, включающие энергомодель здания, модели инженерных систем и систем управления, имитационную модель функционирования здания;
- онтологические модели, содержащие информацию об основных объектах здания и его инженерных систем, базу знаний (БЗ) и машину вывода;
- базу данных (БД) и инструментальное программное обеспечение (ПО).

CAD- и *BIM*-модели составляют ядро цифрового двойника здания. Математические и компьютерные модели позволяют проводить анализ и оптимизацию параметров здания или его энергопотребления на стадиях проектирования и эксплуатации. Онтологии помогают организовать взаимодействие между компонентами цифрового двойника и обмен информацией между цифровым двойником и внешними системами с помощью технологий семантической паутины и связанных данных. Например, различные потребители информации, компьютерные модели, люди или внешние сервисы могут получать данные из онтологий, в том числе, через сеть Интернет с помощью *SPARQL* запросов. БЗ является отдельным компонентом цифрового двойника. БЗ содержит набор фактов и продукционных правил. Она предназна-

на для реализации экспертных систем производственного типа, которые помогают осуществлять принятие решений и реализовать ситуационное управление [8]. БД используются для хранения массивов оперативных данных и данных, связанных с предыдущими периодами работы цифрового двойника. Инструментальные средства применяются для решения задач сопровождения цифрового двойника, а также вместе с БД используются для связи с внешними системами, такими как *BMS*, системы мониторинга и *IoT*.

Следует отметить степень готовности различных компонентов и технологий цифрового двойника к настоящему моменту времени. *CAD*- и *BIM*-модели разрабатываются и передаются в цифровой двойник архитекторами и проектировщиками. Различные математические и компьютерные модели цифрового двойника должны быть тесно связаны между собой. Подходы к созданию таких модельных комплексов ещё только формируются. Например, можно отметить интегрированный программный комплекс [9] для моделирования функционирования здания, включающий все перечисленные виды моделей. Такие компоненты цифрового двойника как онтологии и БЗ ещё только начинают создаваться и исследоваться. Пример онтологии для цифрового двойника здания представлен в данной статье. БД и инструментальное ПО зависят от реализации других компонентов цифрового двойника и используемой программной платформы. Создание их это дело ближайшего будущего.

Источниками оперативных данных для цифрового двойника здания служат *BMS*, различные системы: мониторинга, энергоучёта, видеонаблюдения, «Умный дом», «Интернет вещей» и др. В совокупности эти данные позволяют оптимизировать и прогнозировать состояние здания в будущем. Инструментальное ПО позволяет организовать передачу данных между отдельными моделями, между моделями и БД цифрового двойника, между цифровым двойником и внешними системами и приложениями. Комплекс онтологических моделей цифрового двойника включает онтологии: *BIM*-модели, энергомодели, инженерных систем здания, компьютерных моделей здания, *BMS*, *IoT* и др.

3 Технологии интеграции данных в цифровом строительстве

В настоящее время разработан ряд единых форматов передачи данных между различными системами в цифровом строительстве. Так для связи с *BIM* системами международным альянсом *buildingSMART* разработан формат *IFC (Industry Foundation Classes)* [10]. Поддержка формата *IFC* стала практически стандартной функцией строительных *CAD* и *BIM* систем. *IFC* поддерживают такие популярные пакеты как *AutoCAD*, *AutoCAD Architecture*, *ArchiCAD*, *Revit* и многие др. Для формата *IFC* в последние годы было предложено несколько вариантов онтологий, из которых *buildingSMART* была рекомендована для применения онтология *ifcOWL* [11]. Онтология *ifcOWL* была разработана так, чтобы обеспечить максимальную совместимость с исходной *IFC* схемой. Появился также свободно-доступный инструмент [12] для конвертации модели *IFC* в граф *RDF Abox*, структурированный в соответствии с *ifcOWL*. Онтология *ifcOWL* и конвертер *IFC* в *RDF* позволили применять технологии семантической паутины, такие как стандартизированные запросы *SPARQL* [13] и методы логического вывода, к моделям *IFC*.

Формат *gbXML (Green Building XML)* [14], по сравнению с форматом *IFC*, более удобен для обмена данными между строительными *CAD* и *BIM* системами, с одной стороны, и *BEM* системами, с другой, так как содержит только те данные, которые необходимы для *BEM* систем. Формат *gbXML* поддерживается меньшим числом строительных *CAD* и *BIM* систем, зато поддерживается большим числом *BEM* систем, среди которых *Trace 700*, *DesignBuilder*, *HVAC Solution*, *OpenStudio* и др.

На сегодняшний день наиболее популярной из *BEM* систем является свободно-доступная программа *EnergyPlus* [15]. Применение этой системы стало общепринятой практикой при проведении энергомоделирования зданий.

В [16] предлагается путь для обмена данными между моделями *IFC*, *gbXML* и *EnergyPlus* через промежуточную модель *SimModel*, являющуюся внутренней моделью программы *Simergy*. Там же предлагается способ конвертации файлов *SimModel* в соответствующие *OWL* онтологии. Существует открытый инструмент для преобразования информации из выходных файлов *EnergyPlus* в *RDF* граф [17].

4 Обзор онтологий ПрО

Разработка онтологий для конкретной ПрО является сложным и трудоёмким процессом. Поэтому целесообразно использование существующих онтологий для той же или близкой ПрО, если они частично покрывают потребности разработчика. В настоящее время разработано много онтологий для систем «Умный дом», *BMS* и связанных с ними ПрО.

Европейский институт телекоммуникационных стандартов создал онтологию *Smart Appliances Reference (SAREF)* [18]. Цель *SAREF* – охватить фундаментальные концепции в области интеллектуальных устройств. Онтология включает три основных раздела: об устройствах и их функциях, потреблении/производстве энергии и здании. Базовый класс *Device* онтологии содержит список устройств, например, выключатель света или датчик температуры. С каждым устройством связан определённый набор функций, например, включить/выключить, открыть/закрыть, измерить и т.д. Каждая функция имеет связанные команды, такие как переключение или получение данных измерения. Однако набор доступных устройств, функций и команд очень ограничен. Онтология *SAREF4EE* расширяет *SAREF* для обеспечения совместимости со стандартами *EEBus* и *Energy@Home* [19].

Онтология *Brick* также была разработана на основе *SAREF* [20]. Она охватывает такие типовые подсистемы *BMS*, как система *HVAC* и система освещения, пространственную и энергетическую инфраструктуру здания, а также отношения между этими объектами. Возможные отношения ограничены типами отношений для моделирования пространственных отношений, отношений композиции/агрегации и отношений ввода-вывода.

Онтология *BOnSAI* ориентирована на услуги и веб-сервисы в среде «Умного дома» [21]. Разработанные основные понятия являются либо очень абстрактными, либо специфичными для веб-сервисов. В целом, набор доступных в онтологии типов устройств, функций, местоположений и параметров среды слишком ограничен для коммерческих систем автоматизации зданий.

Для систем «Умный дом» с акцентом на энергосбережение и *BEMS* можно выделить онтологии *DogOnt* [22] и *ThinkHome* [23]. В центре внимания онтологии *DogOnt* находятся системы «Умный дом» и вопросы моделирования энергопотребления устройств. *DogOnt* основана на классификации *DomoML*, которая позволяет описать домашнюю обстановку (стены, мебель), функциональность домашних устройств и их взаимосвязи. В *DogOnt* устройства разделяются на управляемые и неуправляемые. Управляемые устройства имеют состояние и функциональность, которая складывается из блоков, содержащих непрерывные и дискретные функции управления освещением, температурой и другими параметрами.

Онтология *ThinkHome* описывает энергосберегающие системы «Умный дом». Она содержит понятия для описания комфорта, актора (пользователя), процесса, энергии, ресурса (устройства), внешних воздействий (погоды) и структуры здания. Классификация некоторых объектов в *ThinkHome* отличается по сравнению с другими подобными онтологиями.

В области базовых технологий контроля и мониторинга следует отметить онтологии *SSN* (*Semantic Sensor Network*) [24], *M3* [25], *OntoSensor* [26]. Онтология *SSN* предложена консорциумом *W3C* для описания ПрО, связанной со сбором данных с помощью датчиков и с процессом наблюдения. Она основана на шаблоне проектирования Стимул – Датчик – Наблюдение и совместима со стандартами *SensorML* и *O&M* (*Observations and Measurements*) консорциума *OGC* (*Open Geospatial Consortium*). Онтология *SSN* описывает датчики как физические объекты, которые наблюдают и преобразуют входные стимулы в другое представление, где под стимулами понимаются изменения состояния измеряемой среды, а наблюдения служат для интерпретации входных стимулов и фиксации таких параметров как время и место. Поскольку онтология *SSN* предоставляет только основные понятия, её необходимо расширять терминами, специфичными для конкретной ПрО. Онтология *M3* является развитием онтологии *SSN* для поддержки описания датчиков, наблюдений и их единиц измерения. Онтология *OntoSensor* расширяет концепции, представленные стандартом *SensorML* для идентификации категорий датчиков, поведения, взаимосвязей, функций и метаданных, касающихся характеристик датчиков, их производительности и надёжности.

«Интернет вещей» тесно связан с рассматриваемой ПрО. Поэтому онтологии «Интернета вещей» также представляют интерес для анализа, в частности онтологии *IoT-lite*, *Open-IoT*, *IoT-O*, *Fiesta-IoT* [24]. *IoT-lite* является облегчённой реализацией *SSN* и включает информацию о датчиках и их местонахождении. Онтология *OpenIoT* также основана на *SSN* и дополняет базовые понятия понятиями, необходимыми для приложений *IoT*. Онтология *IoT-O* является одной из первых попыток к объединению онтологий в области *IoT*. Она повторно использует понятия из онтологий *SSN* и других, дополняя их новыми. Онтология *Fiesta-IoT* является ещё одной попыткой унифицировать существующие онтологии для области *IoT*. Эта онтология представляет собой комбинацию существующих онтологий *IoT* с небольшими обновлениями для преодоления наиболее распространенных проблем, связанных с базовыми онтологиями.

5 Разработка онтологии цифрового двойника зданий

5.1 Требования к онтологиям

К онтологиям цифрового двойника здания предъявляются следующие основные требования:

- включать основные понятия и отношения рассматриваемой ПрО;
- обеспечивать интероперабельность и поддержку взаимодействий между компонентами цифрового двойника;
- быть модульными;
- использоваться в качестве основы при создании и сопровождении БД и БЗ цифрового двойника;
- быть ориентированными на современные методы управления, включая оптимальные, интеллектуальные и мультиагентные системы;
- быть ориентированными на современные программно-аппаратные комплексы для автоматизации зданий на базе различных проводных и беспроводных сетей;
- поддерживать системы «Интернет вещей», технологии работы с Web- и облачными сервисами.

Ни одна из рассмотренных ранее онтологий не удовлетворяет указанным требованиям.

При разработке онтологий можно опираться на метод проектирования *4WIH* (*What/When/Were/Who/How*), в соответствии с которым необходимо ответить на пять вопро-

сов Что/Когда/Где/Кто и Как [27], а также на методологию [28], согласно которой разработка онтологии делится на три основных этапа:

- 1) выявление ключевых понятий и отношений ПрО, определение и описание понятий онтологии и отношений между ними;
- 2) кодирование онтологии с использованием формальных языков, например *OWL*;
- 3) интеграция существующих онтологий.

5.2 Базовые онтологии

Набор базовых онтологий цифрового двойника здания в настоящее время включает:

- онтологию *ifcOWL*;
- онтологию здания, включающую основную информацию о конструкции, внутренней и внешней среде здания;
- онтологию здания *EnergyPlus*, включающую дополнительные классы, относящиеся к конструкции и материалам здания;
- онтологию *HVAC EnergyPlus*, включающую дополнительные классы *EnergyPlus*, относящиеся к *HVAC* оборудованию;
- онтологию, включающую дополнительные классы энергомодели *EnergyPlus*;
- онтологию инженерных систем здания, содержащую информацию об инженерном оборудовании здания и технических устройствах;
- онтологию моделей, предназначенную для поддержки компьютерных моделей цифрового двойника;
- онтологию измерений, описывающую измеряемые параметры и процесс измерения;
- онтологию данных, включающую различные источники и форматы данных, а также онтологию *EXPRESS* (<https://w3id.org/express>);
- онтологию времени (<http://www.w3.org/2006/time#2016>);
- онтологию, включающую классы для обмена данными с системой *EnergyPlus*;
- онтологию ресурсов, включающую информацию об основных энергоресурсах, их поставщиках и потребителях;
- онтологии мультиагентных систем (*MAS*) и систем, основанных на правилах, предназначенные для поддержки интеллектуальных систем управления;
- онтологию, предназначенную для поддержки сетей передачи данных на базе различных проводных и беспроводных протоколов;
- онтологию сервисов;
- онтологию пользователей, содержащую информацию о пользователях, их семьях, их домашних питомцах, их предпочтениях, профилях и т.д.;
- онтологию задач и повседневных домашних дел;
- онтологию бытовой техники, мебели и предметов интерьера.

Из упомянутых онтологий только онтология *ifcOWL*, онтология времени и онтология *EXPRESS* являются стандартными онтологиями, остальные онтологии разработаны автором.

Онтология *ifcOWL* в виду её сложности и большого размера во многих случаях непосредственно не используется для формирования онтологий, а необходимые данные из неё транслируются в онтологию здания и онтологию здания *EnergyPlus*.

Часть онтологий проработаны подробно, другие включают только основные понятия. Число базовых онтологий может быть изменено.

5.3 Классы базовых онтологий

Класс *Environment* онтологии здания представляет собой среду здания. Он включает классы: *IndoorEnvironment*, представляющий внутреннюю среду здания, *OutdoorEnvironment* представляющий внешнюю среду, *BuildingEnvironment*, включающий элементы конструкции здания (*BuildingElement*) и его внутреннее пространство (*BuildingSpace*), *EnvironmentalConditions*, включающий основные параметры внутренней среды здания, такие как температура, влажность, освещенность и концентрация CO₂. Онтограф для класса *Environment* показан на рисунке 2. Класс *BuildingEnvironment* эквивалентен классу *Building*. Класс *BuildingElement* содержит классы *Construction*, *Door*, *Floor*, *Material*, *Roof*, *Surface*, *Wall*, *Window* и др, выровненные с одноименными классами *EnergyPlus*. Класс *BuildingSpace* эквивалентен классу *BuildingLocation*. Он содержит классы *Area*, *Basement*, *Room*, *Stage*, *Zone* и др. При этом классы *Room* и *Zone* выровнены с соответствующими классами *EnergyPlus*.

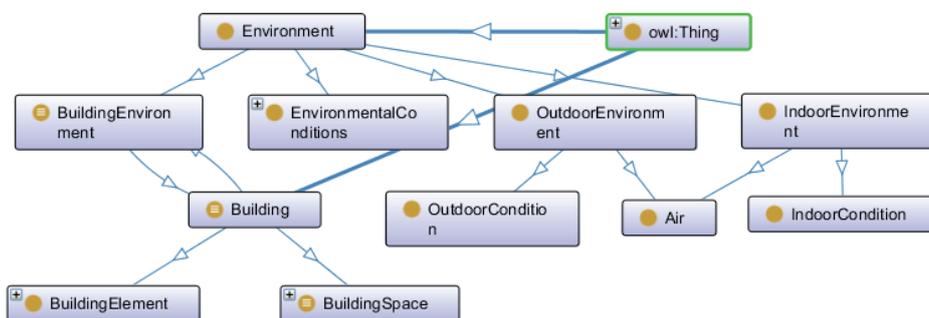


Рисунок 2 – Онтограф для класса *Environment*

Класс *Location* онтологии здания предназначен для описания местоположения. Он включает подклассы *BuildingLocation*, эквивалентный классу *BuildingSpace*, и *Outside*, эквивалентный классу *OutdoorEnvironment*. Класс *BuildingLocation* включает множество зон здания, таких как этажи, комнаты, коридоры, пристройки, террасы, балконы и др., а также различные поверхности – полы, потолки, стены и др. Класс комнаты в свою очередь включает различные виды комнат, такие как столовые, кухни, спальни, ванные, гостиные, кабинеты, кладовки и др.

Класс *Equipment* онтологии инженерного оборудования включает классы инженерных систем здания: *HVAC_System* для системы отопления, вентиляции и кондиционирования, *Electrical_System* для системы электроснабжения, *Lighting_System* для системы освещения, *Water_System* – системы водоснабжения, *Gas_System* – системы газоснабжения, *Security_System* – системы безопасности, *Control_System* – системы управления зданием, *IT_System* – информационной системы здания, а также класс *EquipmentParameters* для параметров инженерного оборудования. Онтограф для класса *Equipment* показан на рисунке 3.

Каждый класс инженерных систем включает классы основного инженерного оборудования соответствующих систем. Наиболее проработанным классом онтологии инженерного оборудования является класс *HVAC_System*, поскольку к базовым классам этого класса *Boiler*, *Heat_Exchanger*, *Heater*, *Pipe*, *Pump*, *Radiator*, *Chiller*, *Coil*, *Fan* добавлены классы инженерного оборудования системы *EnergyPlus*, что существенно облегчает выполнение обмена данными при энергомоделировании.

Класс *MeasurementProperty* онтологии измерений представляет основные измеряемые физические свойства, используемые различными системами контроля, мониторинга и инженерным оборудованием. Он включает такие параметры как температура, давление, расход, энтальпия, скорость, ток, напряжение, частота и др.

tralAgent, HumanAgent, ProviderAgent, IndoorAgent, OutdoorAgent. Такая структура класса *Agent* соответствует принятой в [30] классификации агентов *MAS* управления зданием.

Классы *Fact, Slot, MultiSlot, LHS, RHS* вместе с общими классами *Function, Class, Object, Method* и др. используются для поддержки интеллектуальных систем, основанных на правилах. Они применяются для установления логической связи между онтологией и экспертной системой продукционного типа. В дальнейшем планируется использовать данные классы для генерации фактов и определения структуры правил БЗ экспертной системы.

Классы *Bus, DataPoint, DPTField, FunctionPoint* совместно с классами *Address, Data, Function, NetworkProtocol* и др. применяются для поддержки систем автоматизации на базе современных коммуникационных протоколов типа *KNX*. Шина *KNX* сейчас широко используется в качестве основного сетевого протокола в *BMS*. Классы этой группы, а также множество других классов онтологии, таких как *Sensor, Point, Device, NetworkDevice, MobileDevice, Network, WiredNetwork, WirelessNetwork, Service, CloudStorage, Software* и др. могут использоваться для связи цифрового двойника с *BMS*, системами мониторинга и *IoT*.

5.4 Пример реализации онтологии в Protégé

Модульный принцип построения значительно облегчает создание онтологий цифрового двойника, имеющих пересекающиеся множества понятий и отношений в ПрО. Требуемая онтология может быть построена путём объединения и выравнивания базовых онтологий. Используя набор базовых онтологий, можно создать онтологию *BMS*, онтологию *BEMS*, онтологию компьютерных моделей здания, онтологию *IoT* и др.

Например, онтология *BMS* включает большинство базовых онтологий за исключением онтологии *ifcOWL* и онтологий, относящихся к системе *EnergyPlus*. Фрагмент иерархии классов онтологии *BMS* в редакторе *Protégé* показан на рисунке 5. Структура классов онтологии включает следующие основные классы: *Agent, Appliances, Building, Data, Device, Environment, Equipment, Event, Location, MeasurementProperty, Message, Point, Resource, State, TechnicalSystem, User* и др.

Для классов и их индивидуальностей в онтологии определено множество свойств (отношений). Часть их них представлена на рисунке 6.

Например, объекты класса *Sensor* связаны отношением *hasMeasurement* с объектами класса *MeasurementProperty*. Это отношение устанавливает связь между датчиком и измеряемым параметром. Свойство *hasMeasurement* имеет обратное свойство *isMeasuredBy*, связывающее объекты класса *MeasurementProperty* с объектами класса *Sensor*. В онтологии имеется много подобных инверсий свойств. Часть свойств унаследована от базовых онтологий. Другая часть устанавливает отношения между объектами из разных базовых онтологий. Примером таких отношений может служить упомянутое отношение *hasMeasurement*, устанавливающее связь между объектом датчик из онтологии инженерных систем здания с объектом класса *MeasurementProperty* онтологии измерений. В качестве другого примера можно привести отношение *hasLocation*, которое устанавливает связь между объектом класса *Equipment* онтологии инженерных систем с объектом класса *Location* онтологии здания.

Можно отметить сходства и различия полученной онтологии *BMS* с существующими онтологиями, описанными в разделе 4. Сходство с *SAREF* заключается в наличии одинаковых классов *Command, Device, Function, Property, Service, State, Task*. Однако реализация классов *Device, Function, Service, Task* иная, классы *Command* и *State* существенно расширены и дополнены, а классу *Property* *SAREF* соответствует класс *MeasurementProperty* онтологии. Структура классов *Equipment, Location, MeasurementProperty* представленной онтологии частично совпадает со структурой аналогичных классов онтологии *Brick*, однако общая организация онтологии и реализация класса *Point* иные.

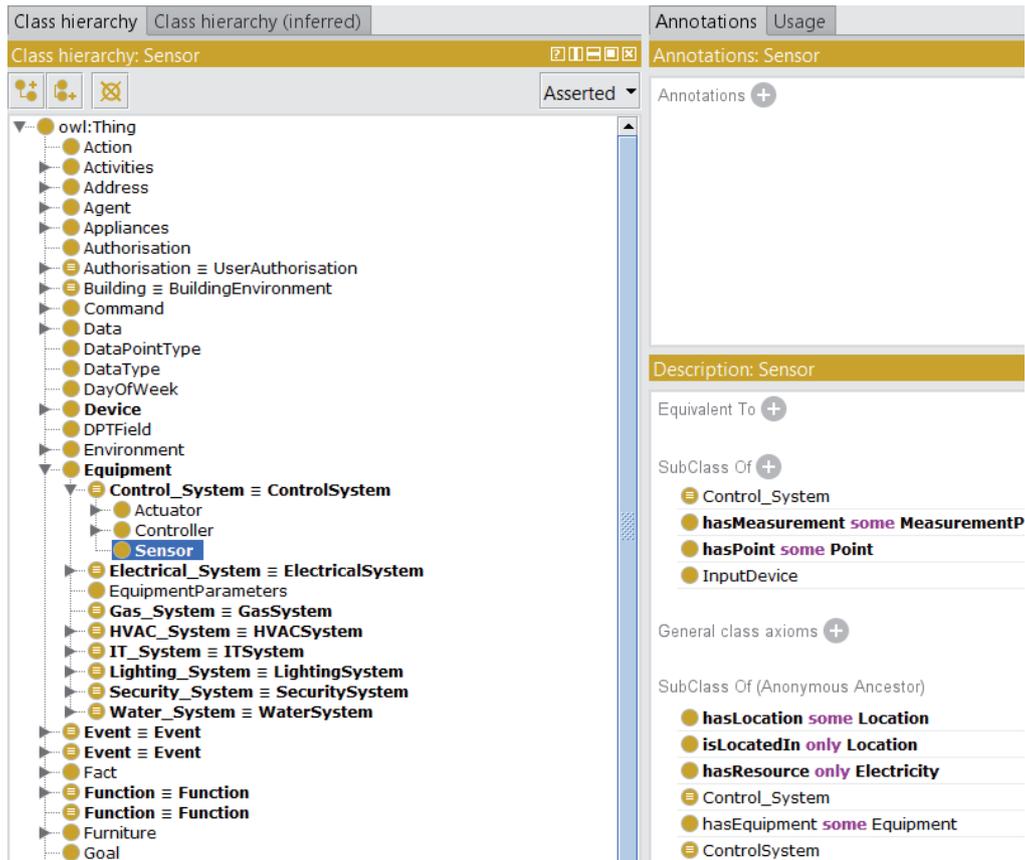


Рисунок 5 – Фрагмент иерархии классов в Protégé

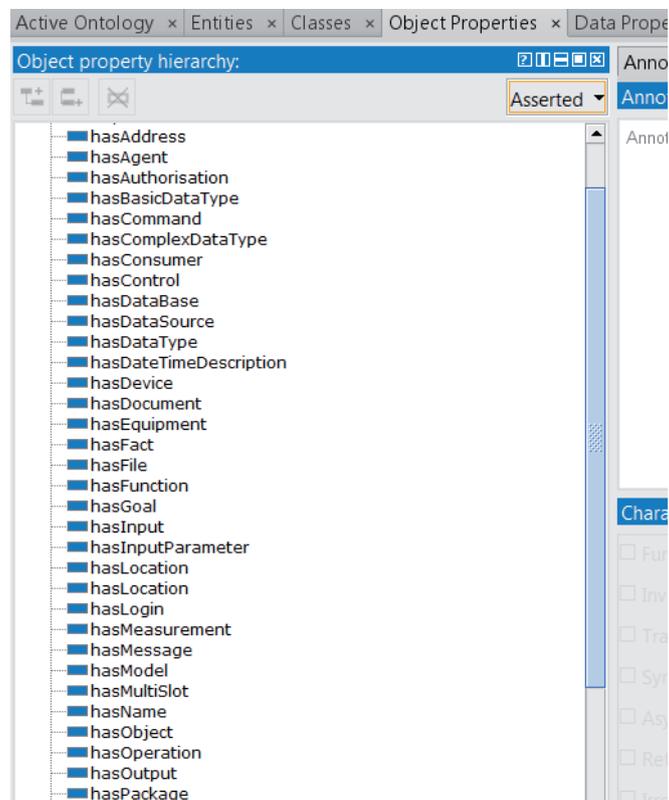


Рисунок 6 – Отношения онтологии

С онтологией *BOnSAI* разработанную онтологию сближает наличие большого числа общих классов *Action, Environment, Hardware, Location* и др. Однако большинство из них в *BOnSAI* лишь обозначены. С онтологией *DogOnt* также имеются общие классы *Command, Device, Environment* и др. При этом структура классов *Environment, State, StateValue, TechnicalSystem* частично похожа. Общими классами с онтологией *ThinkHome* являются классы *BuildingEnvironment, Room, Command, State, StateValue*. Их структура частично совпадает со структурой аналогичных классов разработанной онтологии. Из онтологий *IoT*, основанных на *SSN*, по степени проработанности и охвату ПрО справедливо сравнение только с онтологией *IoT-O*. Эта онтология также является модульной и включает в себя набор онтологий, среди которых есть и *DogOnt*. При наличии большого числа общих классов различия между *IoT-O* и разработанной онтологией достаточно очевидны.

Заключение

Рассмотрена разработка онтологических моделей для цифрового двойника здания. Создан набор независимых онтологий, пригодных для повторного использования. На основе базовых онтологий можно создать онтологию *BMS*, онтологию *BEMS*, онтологию компьютерных моделей здания, онтологию *IoT* и другие онтологии, необходимые для функционирования цифрового двойника здания.

К достоинствам созданных онтологий можно отнести детальную проработку таких классов как *Environment, Equipment, Event, Location, Resource, User* и др. Структура этих классов существенно изменена по сравнению с онтологиями, описанными в разделе 4, путём добавления новых необходимых подклассов и отношений. Для поддержки интеллектуальных систем управления на базе экспертных систем производственного типа и *MAS* были добавлены классы *Fact, Rule, Slot, MultiSlot, Agent, Event, Goal, Message, Service, Task* и др. Для поддержки систем автоматизации на базе современных коммуникационных протоколов типа *KNX* и систем «Интернет вещей» были добавлены классы *Address, Bus, CloudStorage, Data, DataPoint, DPTField, Function, FunctionPoint, Network, NetworkProtocol* и др. Это значительно повышает возможности описания ПрО и применения онтологий.

Использование онтологий позволяет организовать эффективный механизм обмена информации между встроенными моделями и инструментальными программами цифрового двойника, между цифровым двойником и людьми или внешними программами. Онтологии, в отличие от простого обмена данными с помощью форматов *XML* и *JSON*, могут определять не только синтаксис, но и семантику передаваемых данных. Различные потребители информации, компьютерные модели, люди или внешние сервисы могут получать данные из онтологий, в том числе, через сеть Интернет с помощью *SPARQL* запросов. Онтологии также являются удобным базисом для разработки БЗ и структуры БД цифрового двойника зданий.

Список источников

- [1] **Табунщиков, Ю.А.** Цифровизация экономики – тенденция глобального масштаба / Ю.А. Табунщиков - М.: Энергосбережение, 2018, № 7. - С.4–10.
- [2] **Ролсон, О.К.** Интеллектуальные здания: масштабируемые структурированные сети, Интернет вещей и энергоэффективность / О'Нил Кинг Ролсон. - М.: Энергосбережение, 2018, № 7. - С.22–24.
- [3] **Капустин, П.В.** Онтологические вопросы в кастомизированном архитектурном онлайн проектировании персонализированных жилых домов / П.В. Капустин, Д.М. Канин, И.Л. Чураков // Онтология проектирования, 2015, № 3, С.256-277. - DOI:10.18287/2223-9537-2015-5-3-256-277.
- [4] **Прохоров, А.** Цифровые двойники. Концепция развивается. - http://data.cnews.ru/articles/2018-04-18_tsifrovye_dvojniki_kontseptsiya_razvivaetsya.
- [5] Green Zoom. - <https://www.greenzoom.ru/>.

-
- [6] Semantic Web-W3C. - <https://www.w3.org/standards/semanticweb/>.
- [7] **Ковалев, С.П.** Проблемы цифрового проектирования энергетических систем. Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2018): тезисы докл. 18-ой междунар. конфер. - М.: ИПУ РАН, 2018. - С.16.
- [8] **Поспелов, Д.А.** Ситуационное управление: теория и практика. - М.: Наука, 1986. - 288 с.
- [9] **Марьясин, О.Ю.** Программный комплекс для моделирования инженерных систем зданий. Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2018). - М.: ИПУ РАН, 2018. - С. 24-27.
- [10] IFC-Industry Foundation Classes. - http://www.ifcwiki.org/index.php?title=IFC_Wiki.
- [11] **Pauwels, P.** EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology / P. Pauwels, W. Terkaj // Automation in Construction, № 63, 2016. - P.100-133.
- [12] IFCtoRDF-Desktop. - <https://github.com/jyrkioraskari/IFCtoRDF-Desktop>.
- [13] SPARQL Query Language for RDF. - <https://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>.
- [14] Green Building XML. - <http://www.gbxml.org/index.html>.
- [15] EnergyPlus. - <https://energyplus.net/>.
- [16] **Pauwels, P.** Representing SimModel in the Web Ontology Language / P. Pauwels, E. Corry, J. O'Donnell // Proc. International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Proceedings, 2014.
- [17] GitHub-IMI-KIT/eplus-lod: Provides EnergyPlus I/O interoperability via semantic web technologies. - <https://github.com/IMI-KIT/eplus-lod>.
- [18] **Daniele, L., den Hartog, F., Roes, J.** Study on Semantic Assets for Smart Appliances Interoperability, 2015.
- [19] **Daniele, L.** Interoperability for Smart Appliances in the IoT World / L. Daniele, M. Solanki, F. den Hartog, J. Roes // International Semantic Web Conference, Springer, 2016. - P.21-29.
- [20] **Balaji, B.** Brick: Towards a unified metadata schema for buildings / Balaji B., Bhattacharya A., Fierro G., Gao J., Gluck J., Hong D., Johansen A., Koh J., Ploennigs J., Agarwal Y., Berges M., Culler D., Gupta R., Kjærsgaard M.B., Srivastava M., Whitehouse K. // Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Built Environments. New York, USA: ACM, 2016. - P.41-50.
- [21] **Stavropoulos, T.G.** Bonsai: A smart building ontology for ambient intelligence / T.G. Stavropoulos, D. Vrakas, D. Vlachava, N. Bassiliades // Proceedings of the 2Nd International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics. New York: ACM, 2012. - P.263-274.
- [22] **Butzin, B.** A survey on information modeling and ontologies in building automation / B. Butzin, F. Golasowski, D. Timmermann // 43 Annual Conference of the IEEE, 2017. - P.1-7.
- [23] **Kofler, M. J.** A semantic representation of energy-related information in future smart homes / M. J. Kofler, C. Reinisch, W. Kastner // Energy and Buildings, vol. 47, 2012. - P.169-179.
- [24] **Bajaj, G.** A study of existing Ontologies in the IoT-domain / G. Bajaj, R. Agarwal, P. Singh, N. Georgantas, V. Issarny // arXiv preprint, arXiv:1707.00112, 2017. - P.1-24.
- [25] **Gyrard, A.** Machine-to-Machine Data with Semantic Web Technologies for Cross-Domain Applications / A. Gyrard, C. Bonnet, K. Boudaoud // IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT), IEEE, 2014, pp.559-564.
- [26] **Xue, L.** An Ontology based Scheme for Sensor Description in Context Awareness System / L. Xue, Y. Liu, P. Zeng, H. Yu, Z. Shi // Information and Automation, 2015 IEEE International Conference on, IEEE, 2015. - P.817-820.
- [27] **Zhang, D.** 4W1H in Mobile Crowd Sensing / D. Zhang, L. Wang, H. Xiong, B. Guo // IEEE Communications Magazine, 52 (8), 2014. - P.42-48.
- [28] **Uschold, M.** Towards methodology for building ontologies / M. Uschold, M. King // Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing, Canada, 1995. - P.1-15.
- [29] **Yang R, Wang L.** Development of multi-agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors. Energy and Buildings, 2013, P.1-7.
- [30] **Марьясин, О.Ю.** Проектирование мультиагентной системы управления зданием с использованием онтологий / О.Ю. Марьясин // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 8, №3(29). – С.387-399.
-

DESIGN OF ONTOLOGIES FOR THE DIGITAL TWIN OF BUILDINGS

O.Yu. Maryasin

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia
maryasin2003@mail.ru

Abstract

The article describes the design of ontological models for the digital twin of buildings. The architecture of the digital twin of buildings proposed in the article includes a whole complex of models, among which ontologies play one of the main roles. The set of digital twin ontologies includes: ontology of the building information model, ontology of the energy model, ontology of building engineering systems, ontology of building computer models, ontology of the building management system and others. As a result of the work, a whole set of independent basic ontologies was created, suitable for reuse. The paper describes the classes of basic ontologies and their inter-class relations. The modular construction principle greatly facilitates the creation of digital twin ontologies that have intersecting sets of concepts and relationships from their subject area. Using a set of basic ontologies, it is possible to create the ontologies necessary for the functioning of the digital twin of buildings. The article provides an example of design of ontology of an automated building management system. The paper's novelty is in the detailed description of ontologies compared to well-known ontologies, having new necessary classes, subclasses, and relationships added. This greatly expands the scope of the description of the subject area. Ontologies significantly facilitate data exchange between the embedded models and the service programs of the digital twin, as well as between the digital twin and users or external software.

Key words: building information model, energy model, digital twin, semantic web, ontology, Protégé.

Citation: Maryasin O.Yu. Design of ontologies for the digital twin of buildings [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4): 480-495. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-480-495.

References

- [1] **Tabunshchikov Yu.A.** Digitalization of the economy is a global trend [In Russian]. *Energy saving publ.* 2018; 7: 4–10.
- [2] **Rawlson OK.** Smart Buildings: Scalable Structured Networks, Internet of Things, and Energy Efficiency [In Russian]. *Energy saving publ.* 2018; 7: 22–24.
- [3] **Kapustin PV, Kanin DM, Churakov IL.** The ontological questions of personalize homes customized architectural online designing [In Russian]. *Ontology of Designing*. – 2015; 5(3): 256-277. - DOI:10.18287/2223-9537-2015-5-3-256-277.
- [4] **Prokhorov A.** Digital Twins. An Evolving Concept [In Russian]. - http://data.cnews.ru/articles/2018-04-18_tsifrovye_dvojniki_kontseptsiya_razvivaetsya.
- [5] GREEN ZOOM. - <https://www.greenzoom.ru/>.
- [6] Semantic Web-W3C. - <https://www.w3.org/standards/semanticweb/>.
- [7] **Kovalev SP.** Problems of digital design of energy systems [In Russian]. *Systems for designing, technological preparation of production and life cycle management of an industrial product (CAD/CAM/PDM - 2018): Proc. of the 18th Int. Conf. Moscow: ICS RAS Publ., 2018. - P.16.*
- [8] **Pospelov DA.** Situational control: theory and practice [In Russian]. Moscow, Nauka Publ., 1986. - 288 p.
- [9] **Maryasin OYu.** The software package for the simulation of engineering systems of buildings [In Russian]. *Systems for designing, technological preparation of production and life cycle management of an industrial product (CAD/CAM/PDM - 2018): Proc. of the 18th Int. Conf. Moscow: ICS RAS Publ., 2018. - P.24-27.*
- [10] IFC-Industry Foundation Classes. - http://www.ifcwiki.org/index.php?title=IFC_Wiki.
- [11] **Pauwels P, Terkaj W.** EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology // *Automation in Construction*, 2016; 63.
- [12] IFCtoRDF-Desktop. - <https://github.com/jyrkioraskari/IFCtoRDF-Desktop>.
- [13] SPARQL Query Language for RDF. - <https://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>.
- [14] Green Building XML. - <http://www.gbxml.org/index.html>.
- [15] EnergyPlus. - <https://energyplus.net/>.

- [16] **Pauwels P, Corry E, O'Donnell J.** Representing SimModel in the Web Ontology Language // Proc. International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Proceedings, 2014.
- [17] GitHub-IMI-KIT/eplus-lod: Provides EnergyPlus I/O interoperability via semantic web technologies. - <https://github.com/IMI-KIT/eplus-lod>.
- [18] **Daniele L, den Hartog F, Roes J.** Study on Semantic Assets for Smart Appliances Interoperability, 2015.
- [19] **Daniele L, Solanki M, den Hartog F, Roes J.** Interoperability for Smart Appliances in the IoT World // in: International Semantic Web Conference, Springer, 2016, pp. 21-29.
- [20] **Balaji B, Bhattacharya A, Fierro G, Gao J, Gluck J, Hong D, Johansen A, Koh J, Ploennigs J, Agarwal Y, Berges M, Culler D, Gupta R, Kjærsgaard MB, Srivastava M, Whitehouse K.** Brick: Towards a unified metadata schema for buildings // In Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Built Environments. New York, USA: ACM, 2016, pp. 41–50.
- [21] **Stavropoulos TG, Vrakas D, Vlachava D, Bassiliades N.** Bonsai: A smart building ontology for ambient intelligence // In Proceedings of the 2Nd International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics. New York: ACM, 2012, pp. 263-274.
- [22] **Butzin B, Golatowski F, Timmermann D.** A survey on information modeling and ontologies in building automation, 43 Annual Conference of the IEEE, 2017.
- [23] **Kofler MJ, Reinisch C, Kastner W.** A semantic representation of energy-related information in future smart homes // Energy and Buildings, 2012; 47: 169 -179.
- [24] **Bajaj G, Agarwal R, Singh P, Georgantas N, Issarny V.** A study of existing Ontologies in the IoT-domain // arXiv preprint, arXiv:1707.00112, 2017.
- [25] **Gyrard A, Bonnet C, Boudaoud K.** Machine-to-Machine Data with Semantic Web Technologies for Cross-Domain Applications // IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT), IEEE, 2014, pp. 559-564.
- [26] **Xue L, Liu Y, Zeng P, Yu H, Shi Z.** An Ontology based Scheme for Sensor Description in Context Awareness System // Information and Automation, 2015 IEEE International Conference on, IEEE, 2015, pp. 817-820.
- [27] **Zhang D, Wang L, Xiong H, Guo B.** 4W1H in Mobile Crowd Sensing // IEEE Communications Magazine, 2014; 52(8): 42-48.
- [28] **Uschold M, King M.** Towards methodology for building ontologies // Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing, Canada, 1995.
- [29] **Yang R, Wang L.** Development of multi-agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors. Energy and Buildings, 2013. - P.1–7.
- [30] **Maryasin OYu.** Design of multi-agent building management system with ontologies [In Russian]. *Ontology of designing.* 2018; 8(3): 387-399.

Сведения об авторе



Марьясин Олег Юрьевич, 1964 г. рождения. Окончил Ярославский политехнический институт в 1986 г., к.т.н. (1992). Доцент кафедры «Кибернетика» Ярославского государственного технического университета. Член Российской ассоциации инженеров по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике (АВОК). В списке научных трудов более 50 работ в области автоматизации технических систем, автоматизации инженерных систем зданий, компьютерного моделирования и оптимизации сложных систем.

Oleg Yurevich Maryasin (b. 1964) graduated from the Yaroslavl Polytechnic Institute (Yaroslavl-city) in 1986, PhD (1992). He is Associate Professor at Yaroslavl State Technical University (Department of Cybernetics). He is a member of Russian Association of engineers for heating, ventilation, air-conditioning, heat supply and building thermal physics (ABOK). He is the

co-author of more than 50 publications in the field of automation of technical systems, automation of building engineering systems, complex systems simulation and optimization.