

Концепция использования онтологической модели в атомной энергетике для управления жизненным циклом сложным инженерным объектом на этапе строительства

В.А. Екимовская, И.А. Барсуков, А.А. Екименко, С.Л. Литвин, А.И.Соцкий, М.Г.Жабицкий

Аннотация—В данной статье рассматривается концепция использования онтологической модели и цифрового двойника для управления жизненным циклом сложного инженерного объекта (СИО) на этапе проектирования и строительства. Основное внимание уделено проблематике увеличения сроков строительства из-за отсутствия единого сквозного процесса управления. Рассмотрены этапы жизненного цикла СИО, включая проектирование, строительно-монтажные работы (СМР) и пуско-наладочные работы (ПНР). Описаны ключевые участники процесса, структура планирования и преобразование входных данных в выходные результаты. Результатами научно-исследовательской работы должна стать концепция онтологической модели, техническое задание на её разработку, на основе функциональных и нефункциональных требования к системе, а также готовая онтологическая модель с настроенными взаимосвязями.

Ключевые слова — Цифровой двойник, жизненный цикл, сложный инженерный объект, АЭС, онтологическая модель, управление проектом.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современное моделирование имеет тысячелетнюю историю развития. Зачатки моделирования как формы отражения действительности были заложены еще в глубокой древности. Моделирование как метод познания использовался человеком интуитивно, а первые модели описывали материальные объекты, окружающие человека в процессе его повседневной жизнедеятельности — к первым простейшим моделям можно отнести наскальные рисунки древнего человека [1,2].

В настоящее время, благодаря развитию и интенсивному внедрению информационных технологий во все сферы человеческой жизни, такой инструмент как моделирование активно применяется для принятия управленческих решений в сложных инженерных системах. Принятие решений — ключевая составляющая любой организационной или производственной деятельности человека, позволяет сокращать издержки и снижать риски функционирования сложных систем. Для адекватного обстановке решения требуется понимание закономерностей существования и функционирования управляемой системы, сложного инженерного объекта (СИО). Такое понимание в общем случае определяется наличием модели системы. На современном уровне развития науки и техники передовым уровнем модели являются цифровой двойник (ЦД) системы.

Однако, создание цифрового двойника для моделирования сложных систем — не единоразовое действие, а сложный процесс, реализуемый на многих уровнях обобщения и детализации. Фундаментом служат два основных элемента — понимание общих

закономерностей в расширенной области деятельности (знания в естественно-научных, инженерно-технических, общественных, экономических, юридических сферах) и общее системное представление о рассматриваемой системе. Последнее понятие в современной науке называется онтологией систем. Результатом применения этого подхода к конкретной области является построение онтологической модели системы. Онтологическая модель представляет собой структурированный набор основных системы определяющих сущностей и существенных связей между ними. Настоящая работа посвящена обсуждению методологии онтологического подхода в атомной энергетике для управления жизненным циклом сложных инженерных объектов (ЖЦ СИО) на этапе строительства.

II. ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА И УПРАВЛЕНИЯ ЖЦ СИО

При отсутствии необходимо числа связей между сущностями проекта происходят коллизии во время строительства, которые влекут за собой удлинение сроков, увеличение стоимости. Для учета этих взаимодействий в данной статье будет рассмотрен принцип онтологической модели [3]. Особую актуальность применения технологии приобретает при моделировании сложных инженерных объектов, таких как атомная электростанция (АЭС), которая требует своевременного принятия решений на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ). Программа строительства АЭС в России и за рубежом до 2045 года требует связи и интеграции процессов управления сооружением СИО в один сквозной для сокращения срока и снижения стоимости сооружения СИО. Сейчас на разных этапах сооружения находятся 35 энергоблоков в России и за рубежом, при этом каждая АЭС имеет свою уникальную конструктивную часть, в связи с её местоположением.

Идея построения комплексных информационных моделей на основе антологии, включая как общетеоретические, так и вполне прикладные аспекты изучается в настоящее время достаточно активно. Так, в работе [4] описан подход к моделированию цифрового двойника реактора, интегрирующему BIM-модель с онтологией и данными СМР, применяя OWL и RDF, включая реализацию фрактального онтологического инжиниринга для энергетических объектов. В работе [4] описаны принципы семантического моделирования и построения цифровых двойников энергетических систем с использованием онтологии, включая интеграцию с graph-серверами. Книга [6]

систематизировала накопленные к моменту ее публикации знания о цифровых двойниках и их лингвистической и онтологической составляющих, став базовым справочником для проектантов и ИТ-интеграторов. В интересах АО «Концерн Росэнергоатом» разрабатываются цифровые инструменты и концепции цифрового инжиниринга, включая создание цифровых двойников атомных энергоблоков и исследовательских реакторов [7]. Исследования [8] подробно описывают онтологический подход к построению цифровых двойников энергетических систем. В частности, используются OWL-модели, интегрированные с математическими и семантическими компонентами, а также реализуются прототипы on-line логических систем на основе triple-store хранилищ для анализа инженерных данных [8]. В работе [9] описывают проекты по онтологическому моделированию BIM-моделей зданий с инструментальной платформой Protégé и хранением RDF-графов. Хотя большинство работ, реализующих такой подход посвящено зданиям, их методологический опыт применим для анализа ЖЦ и структур ЦД проектных объектов. Работы по данной тематике ведутся практически во всех подразделениях ведущей технологической корпорации России – ГК Росатом и ассоциированных научных учреждений. Приведем несколько примеров. В работе [10] (НИЯУ МИФИ) описывается применение Text mining для создания информационного контейнера нормативной документации третьего уровня зрелости как части информационной модели сложного инженерного объекта (энергоблока АЭС). Проекты ИБРАЭ в сотрудничестве с ВНИИАЭС привели к созданию цифрового двойника Нововоронежской АЭС, включающего семантическую модель процессов энергоблока [11]. Научный подход ИБРАЭ основан на семантическом и онтологическом управлении знаниями и поддерживает идею использования формальных моделей для организации инженерной информации и анализа безопасности на протяжении всего жизненного цикла АЭС. АО «ВНИИАЭС» еще в 2020–2021 годах начало реализацию программно-технического комплекса «Цифровой двойник АСММ» (атомных станций малой мощности с реакторами РИТМ-200Н и «Шельф-М»). Модели включают мультифизические расчетные модули, базы данных и сервисы для формирования цифровой параллельной инфраструктуры, позволяющей прогнозировать поведение энергоблоков на всех этапах жизненного цикла — от проектирования до вывода из эксплуатации.

Инжиниринговый дивизион ГК Росатом отвечает за проектирование, сооружение и вводе в эксплуатацию АЭС в России и за рубежом, включая интеграцию информационных моделей и цифровые решения в бизнес-процессы и инженерную практику на данной стадии ЖЦ САО (АЭС). При этом реализуются масштабные проекты по цифровизации бизнес-процессов, включая создание стартовых для всего ЖЦ цифровых двойников изделий и энергоблоков. Пилотные инициативы, такие как 3D-моделирование

энергоблока Нововоронежской АЭС и система поддержки оператора (СИПО), демонстрируют практический переход к семантической архитектуре и логической интеграции знаний [12-13].

В отрасли атомной энергетики в целом, одной из немногих высокотехнологичных гражданских отраслей, где бесспорно научно-техническое лидерство и технологический суверенитет России, систематически обсуждается и развивается тематика цифровой трансформации отрасли, в том числе в части создания цифровых двойников сложных объектов и процессов, где семантика, онтологии и цифровые инфраструктуры являются ключевыми элементами будущего цифровой платформы отрасли [14-16].

Обсудим подробнее конкретные бизнес-процессы и инженерные практики начальных этапов жизненного цикла основных объектов гражданской атомной энергетики – АЭС. При анализе жизненного цикла построенных атомных электростанций можем видеть следующую тенденцию: при запланированных 76 месяцах строительства (от первого бетона до разрешения на загрузку ядерного топлива), среднее удлинение срока составляет 35% [17-19]. Для управления строительством используется календарно-сетевое планирование (КСП), при полной детализации график составляет более 1 миллиона строк, до 50 параметров на строку и наличие связей и зависимостей. После анализа текущих графиков КСП было замечено следующее: структура работ, состав оборудования и графики КСП схожи на 60% между собой, значит модель может быть унифицирована. Важно, что первые 4 года план существенно не пересматривается, а с 5-го года ежегодно накапливается n-количество дней отставания, при этом старт ряда работ раньше запланированного срока не приводит к окончанию всех работ в соответствии с планом. Основные сложности при пересчете графиков КСП:

- Постоянное отслеживание изменений и внесение достоверного факта;
- Периодический перерасчет графиков календарно-сетевого планирования, связанный с изменениями;
- Мониторинг влияния изменений на критический путь;
- Поиск оптимального маршрута критического пути;
- Оптимизации графика с учетом необходимости сохранения сроков наступления ключевого события;
- Мониторинг изменения стоимости;
- Управление рисками проекта;
- Использование опыта реализованных проектов - выученные уроки.

Создание информационной модели позволит с помощью метрик определить факторы, приводящие к риску отклонения и проинформировать владельца процесса о наступающем критическом событии. При этом параллельно с созданием единой модели необходимо разработать инструмент, позволяющий сравнивать эталонную ИМ с текущим состоянием сооружения, организовать централизованный сбор, гармонизацию и хранения данных. Выделить отдельный

КХД для создания ИМ и анализа состояния. После создания системы для её валидации необходимо провести пилотирование на одной из строящихся АЭС.

За основу была взята Курская атомная электростанция, блок № 1 - 2 [20-21], а именно:

- Проект организации строительства (ПОС) в рамках реализации первоочерёдных задач по сооружению на площадке Курской АЭС-2 двух энергоблоков нового поколения АЭС с ВВЭР-1200.
- Раздел 6 ПОС объекта капитального строительства.
- 6.3. Организация пусконаладочных работ и ввод объекта в эксплуатацию Эб. № 1-2 Курской АЭС-2 [9].

Данный выбор обусловлен доступностью информации, а также возможностью пилотирования системы на данном сооружении. Выбор зарубежной площадки может повлечь за собой долгие сроки согласования и сложность командирования сотрудников для пилотирования системы.

III. ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

На первом этапе для создания онтологической модели были определены основные сущности для их взаимосвязи: календарно-сетевой график, документы, которые рождаются на каждом этапе, которые необходимы для следующего шага, материально-техническая база (МТБ), участники этапов.

Для успешной реализации онтологической модели весь процесс был разделен на несколько этапов: административно-хозяйственная деятельность, лицензирование, проектные изыскательские работы, проектирование, контрактация, поставка материалов и оборудования, строительно-монтажные работы (СМР, пуск-наладочные работы (ПНР), ввод в эксплуатацию. В данной статье рассматривается два основных и самых наполненных событиями и сущностями процесса: СМР и ПНР (Рисунок 1).

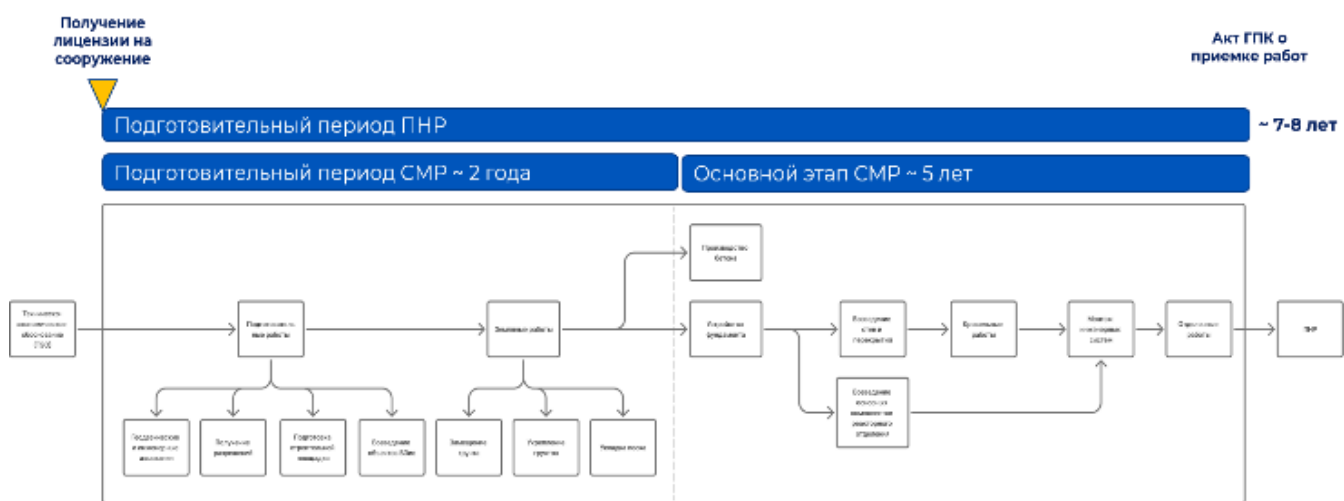


Рисунок 1. Общая схема ЖЦ СИО

Как видно по рисунку, важной особенностью СМР И ПНР является то, что они идут не последовательно, а внахлест, параллельно, что усложняет процесс управления ЖЦ СИО. При этом этапы начинаются с основного документа – получение лицензии на сооружение, а заканчиваются актом о приемке работ.

IV. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

А. Строительно-монтажные работы

На рисунке 1 схематично показаны виды СМР, которые выполняются на подготовительном и основном этапе. В первом приближении на подготовительном этапе выделено 14 работ, на основном этапе 12 работ. Во время выполнения подготовительного этапа выделяются следующие основные документы: проектное решение о выборе площадки под строительство АЭС, акт согласования выбранной площадки для размещения АЭС, постановление о предоставлении земельного участка для строительства АЭС, договор передачи площадки подрядчику, контракт на сооружение АЭС, документация предпроектных и исследовательских работ (ПИ), отчет по инженерным изысканиям для

стадии "П" (проектная стадия), лицензия на размещение атомной станции, ПООБ, ВАБ, проектная документация по объектам строительства (Реакторное здание и т.д.). Для основного этапа были выделены следующие документы: рабочая проектная документация подготовительного периода, акты освидетельствования скрытых работ, акты приемки конструкций и узлов после завершения бетонных и сварочных работ, акты геодезической привязки и исполнительной съемки, протоколы входного контроля материалов и оборудования, журналы производства работ и контроля качества, исполнительная документация по завершённым этапам СМР. Следующим этапом построения онтологической модели является создание взаимосвязей документов, этапов и необходимой материально-технической базы.

В. Пуско-наладочные работы

Управление ПНР осуществляется через декомпозированную систему планирования, включающую:

1. Директивный график ввода энергоблока в эксплуатацию.
2. Этапные и тематические графики.

3. Локальные графики по системам и оборудованию.

4. Недельные и суточные задания.

ПНР начинаются с момента получения лицензии на

сооружение, параллельно СМР. Принято разделять ПНР на 5 этапов (Рисунок 2).



Рисунок 2. Этапы/подэтапы пуско-наладочных работ

Входными документами для ПНР были выделены 25 документов, основными выходными документами стали 12 наименований, в том числе Акт о приемке блока в эксплуатацию и акт ГПК о приемке в промышленную эксплуатацию.

Основными участниками пуско-наладочных работ являются: застройщик, генеральный проектировщик, разработчики проекта РУ, научные руководители,

разработчики, поставщики оборудования, субподрядные организации и другие. Для координации работ создаются коллегиальные органы, такие как: приемочная комиссия, группа руководства пуском, рабочая комиссия и рабочие подкомиссии. Структура взаимосвязи между участниками и коллегиальными органами представлена на рисунке 3.

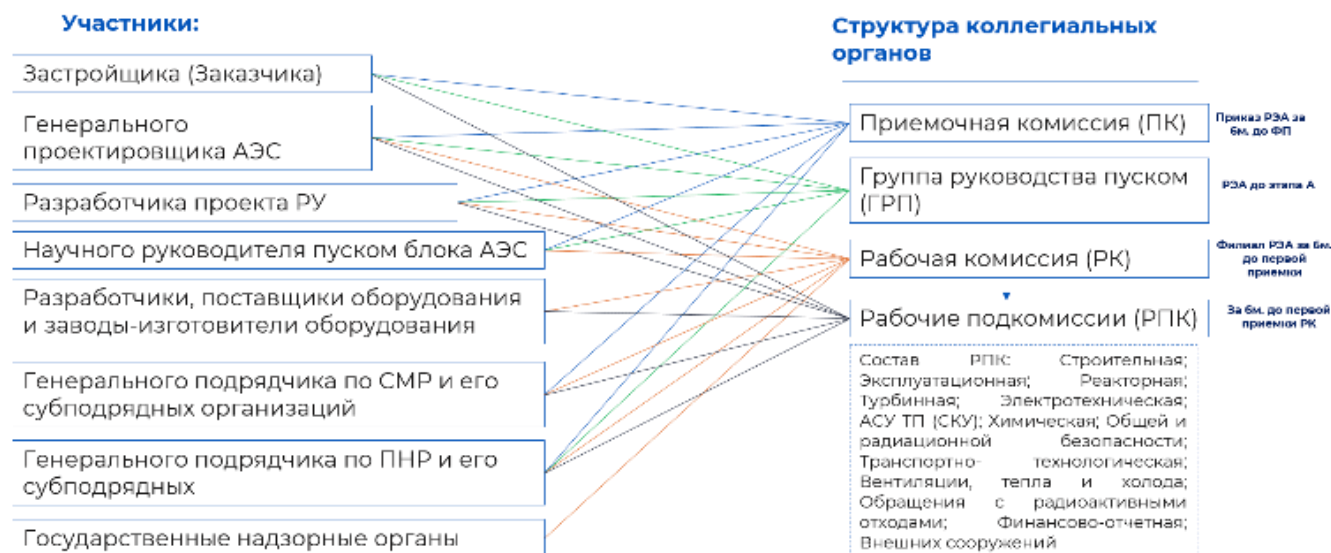


Рисунок 3. Структура участников пуско-наладочных работ

Для создания онтологической модели необходимо понимание роли коллегиальных органов, поскольку они участвуют в принятии решений и управлении в различных организациях - образовательных учреждений, компаний, государственных структур. Знание их функций, структуры и принципов работы

помогает ориентироваться в организационной среде, понимать, как принимаются решения, и как можно влиять на этот процесс в дальнейшем.

V. МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРАКТИКА

Предлагаемая концепция использования онтологической модели и цифрового двойника для управления жизненным циклом сложного инженерного объекта на этапе строительства находит отражение и в международной практике. Подходы к реализации таких моделей в разных странах имеют как общие черты, так и различия, определяемые нормативной базой, уровнем технологического развития и приоритетами в области управления жизненным циклом АЭС.

В Соединённых Штатах Америки подход к цифровым двойникам опирается на строгие нормативные требования. Комиссия по ядерному регулированию (NRC) разрабатывает стандарты верификации цифровых двойников, особенно в части систем управления и защиты (I&C). Использование онтологий (на базе OWL) интегрировано в процессы формальной проверки архитектуры систем с целью соблюдения принципов избыточности, независимости защит и глубинной защиты (defense-in-depth). Цифровые двойники являются частью более широкой парадигмы MBSE (Model-Based Systems Engineering), что схоже с предложенной в данной работе идеей интеграции процессов управления на всех этапах ЖЦ.

В Южной Корее основное внимание уделяется семантическому описанию эксплуатационной документации и процедур, связанных с пуско-наладочными работами. Здесь онтологические модели (например, в системе KMNuR) служат инструментом управления знаниями и стандартизации инструкций. Применение цифровых двойников ограничено поддержкой операционных решений и не охватывает весь жизненный цикл так глубоко, как предполагается в представленной концепции.

В странах Европейского союза вопросы цифровизации АЭС входят в приоритетные направления исследований в рамках программ Horizon Europe. Подход ориентирован на взаимодействие человека и цифровой модели, что позволяет эффективно поддерживать принятие решений. Онтологии применяются для обеспечения семантической совместимости между участниками ЖЦ, что коррелирует с задачами централизованного сбора, хранения и анализа данных, обозначенными в данной статье. При этом особое внимание уделяется соответствию стандартам WENRA и ENSREG.

Китай развивает централизованные платформы управления жизненным циклом АЭС. Цифровой двойник связывается с блокчейн-технологиями, MBSE и инструментами мониторинга реального времени. Онтологические модели используются для категоризации и прослеживания информации на всех этапах ЖЦ. Это схоже с предлагаемым подходом, предполагающим унификацию КСП, построение ИМ и создание единого сквозного инструмента управления строительством и ПНР.

В Индии цифровые технологии внедряются преимущественно через международные проекты (например, EPR совместно с Францией). Формально структурированные подходы к онтологиям и цифровым

двойникам находятся на стадии формирования. Индийская практика демонстрирует высокую заинтересованность в использовании европейских и китайских наработок, что указывает на потенциал для гармонизации подходов.

Предложенный российский подход, ориентированный на создание единой онтологической модели в увязке с КСП, документами, МТБ и участниками, соответствует общемировым тенденциям. Его развитие и практическая реализация требуют формализации, верификации и согласования с международными стандартами, что особенно важно в условиях глобального экспорта российских технологий в сфере атомной энергетики.

Международные стандарты, применяемые при разработке и применении онтологических моделей и цифровых двойников, обеспечивают нормативную совместимость и верифицируемость решений. Наиболее широко используются следующие стандарты и регламенты:

- NUREG (США) — в том числе NUREG-0800, NUREG/CR-7006, NUREG/CR-6116 [22-24], регулирующие верификацию, оценку рисков и архитектуру систем Instrumentation and control systems [25] для атомной отрасли;

- WENRA [26] и ENSREG [27] (ЕС) — направлены на согласование требований безопасности цифровых систем в атомной отрасли;

- CAEA (Китай) — внутренние стандарты Китая, ориентированные на полную цифровизацию проектирования и сопровождения АЭС [31-32].

- Стандарты Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [28] — служат универсальной нормативной базой. Выделим среди них применительно к рассматриваемой нами тематике такие как: Managing Nuclear Knowledge IAEA TECDOC-1651 [29] и Digital I&C Systems IAEA NG-T-6.6 [30]. Документ IAEA TECDOC-1651 'Managing Nuclear Knowledge: Strategies and Human Resource Development' подчёркивает важность интеграции знаний и взаимосвязей между дисциплинами, проектами и стадиями жизненного цикла. Применение онтологий рассматривается как ключевой элемент построения так называемых ядерных знаний (nuclear knowledge) и обеспечения преемственности в сложных технических системах. Также, в отчёте IAEA NG-T-6.6 'Digital Instrumentation and Control Systems for New and Advanced Nuclear Power Plants' разъясняется необходимость использования единых моделей данных, механизмов логического связывания информации и формального описания компонентов АЭС. Это полностью соответствует онтологическому подходу, описанному в данной статье, включая необходимость использования формальных языков (например, OWL) и создания цифровых двойников на этапе проектирования и сооружения. В других публикациях и руководствах отмечается необходимость стандартизации знаний, связанных с жизненным циклом объектов атомной энергетики и необходимость формализации процессов принятия решений с использованием цифровых моделей и систем управления знаниями. Позиция МАГАТЭ подтверждает целесообразность и актуальность онтологических моделей как основы для цифровизации отрасли и

долгосрочного управления знаниями в рамках ЖЦ сложных инженерных объектов. Анализ упомянутых подходов может быть сведен в Таблицу 1.

Таблица 1. Сравнительная таблица международных подходов к использованию онтологий и цифровых двойников

Страна / регион	Онтологический подход	Цифровой двойник	Особенности применения	Соответствие российскому подходу
США	OWL, формальная архитектура I&C, стандарты NUREG	MBSE, защита по принципу defense-in-depth	Фокус на безопасность и верификацию	Высокая совместимость, требует адаптации стандартов
Южная Корея	KMNuR, семантика эксплуатационной документации	Ограниченная поддержка ПНР	Упор на эксплуатационные процессы	Частично соответствует
ЕС	RDF/OWL, WENRA, ENSREG	Платформы Horizon Europe	Человеко-центрированный подход, интероперабельность	Совпадает по логике взаимодействия систем
Китай	Категоризация, онтология на всех этапах ЖЦ	DT + блокчейн + MBSE	Полная цифровая платформа, сильный контроль качества	Аналогичный масштаб и цели
Индия	Ориентированность на внешние практики (EDF)	В рамках международных EPR-проектов	Формирующаяся нормативная база	Потенциал к совместимости при экспорте

Иной необходимый блок знаний о подходах к разработке и применению онтологических методов. Для построения цифровых двойников, в том числе в атомной отрасли, являются профильными международные стандарты, такие как Top-level ontologies (ISO/IEC 21838-2:2021 [33], OWL 2 Web Ontology Language (W3C) [34].

Первичными исходными данными для построения онтологических моделей для российских проектов в сфере атомной энергетики могут являться:

1. Нормативно-правовая документация: законы, приказы, стандарты (в том числе ГОСТ, международные ISO, IAEA и др.).
2. Проектная документация: BIM-модели, графики КСП, технологические схемы, спецификации, чертежи, расчёты и ведомости.
3. Договорная документация: контракты, протоколы, акты приёмки, документы об ответственности сторон, поставочные документы.
4. Эксплуатационная документация: журналы работ, отчёты по качеству, архивы технического обслуживания, данные мониторинга.
5. Внешняя статистика и наработки: отчёты и данные из смежных высокотехнологичных отраслей (авиация, нефтегаз, машиностроение).

VI. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ОНТОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Практическая реализация онтологических моделей требует обоснованного выбора инструментальных средств, охватывающих язык формализации, платформу разработки, механизм хранения и интерпретации данных.

В качестве языка представления онтологий наиболее широко используются OWL (Web Ontology Language) [35-36], RDF (Resource Description Framework) [37 – 38], а также UML-нотация с поддержкой профиля OntoUML [39-40]. Выбор зависит от цели модели: OWL обеспечивает формальную верификацию и вывод новых

знаний через инструмент Ontology Reasoners [41], RDF — удобен для семантической интероперабельности и обмена, UML-подходы ориентированы на визуальную и структурную совместимость с инженерной документацией.

Для редактирования и валидации онтологий наиболее распространённой системой является Protégé [42] (разрабатывается при поддержке Stanford University). Она поддерживает OWL и RDF, расширяется плагинами, интегрируется с reasoner'ами (HermiT [43], Pellet [44], Fact++ [45]). Альтернативами являются TopBraid Composer [46] (для RDF/SHACL/OWL), WebProtégé [47] (облачный аналог) и GraphDB Workbench [48].

Хранение онтологических моделей может реализовываться с использованием triple-store баз данных [49] (например, Apache Jena Fuseki [50], Stardog [51], GraphDB), либо graph DBMS [52] (Neo4j с онтологической надстройкой [53] или Amazon Neptune [54]). Выбор зависит от требований к масштабируемости, скорости запросов и уровня поддержки SPARQL или Cypher.

Для промышленных задач в энергетике также используются специализированные онтологические платформы, поддерживающие стандарты IEC и CIM (Common Information Model). Например, для атомной отрасли актуально использование OWL-моделей в совокупности с CIM-профилями, разработанными в рамках проекта CIM for Energy, а также интеграция с инженерными PLM/PDM-системами.

Таким образом, комплексный подход к выбору инструментов обеспечивает связность онтологической модели с проектной, нормативной и эксплуатационной информацией на всех этапах жизненного цикла объекта. В российской практике атомной энергетики использование инструментальных средств онтологического моделирования постепенно переходит от академических исследований к промышленной апробации [55, 56]. Используются OWL- и RDF-модели,

интегрированные с классификаторами и терминологическими словарями в области проектирования и пуско-наладочных работ. На уровне академического и прикладного моделирования активно используется Protégé с плагинами для OWL и SPARQL-запросов, что позволяет формализовать связи между сущностями строительного проекта. В пилотных проектах рассматривается внедрение triple-store баз, таких как Jena Fuseki и GraphDB, как средства для хранения и логического анализа сквозных моделей. В промышленной среде акцент сделан на интеграции цифровых моделей с платформами календарно-сетевое планирования и PLM-системами. В этом контексте отраслевой интерес представляют решения, поддерживающие CIM-совместимые структуры, обеспечивающие унификацию инженерных данных.

Таким образом, отрасль постепенно выстраивает связку: формализованные онтологии (OWL/CIM) → среда управления знаниями (Protégé/GraphDB) → прикладные интеграции (BIM, КСП, документооборот), что создаёт предпосылки для перехода от проектной документации к управляемым цифровым двойникам на всём протяжении жизненного цикла объектов атомной энергетики.

VII. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ СЛОЖНОГО ИНЖЕНЕРНОГО ОБЪЕКТА

В рамках формирования цифрового управления жизненным циклом атомной электростанции на этапе строительства и пуско-наладочных работ особую значимость приобретает применение онтологических моделей. Настоящий раздел посвящён методическому описанию подхода к созданию такой онтологической модели, акцентируя внимание на её формализованной структуре и возможности применения в реальных условиях.

Исходной точкой в построении онтологии служит определение целей моделирования, контекста применения и целевой аудитории. В рассматриваемом случае речь идёт о построении модели, охватывающей этапы строительно-монтажных и пуско-наладочных работ атомной электростанции. Такая модель должна обеспечить формализованное представление взаимосвязей между документами, графиками, участниками и ресурсами, поддерживая интероперабельность и прослеживаемость.

Формирование онтологической модели начинается с выделения и категоризации сущностей, представляющих собой фундаментальные элементы описываемой предметной области. В контексте жизненного цикла сложного инженерного объекта (СИО), например атомной электростанции, под сущностями понимаются: виды работ, документы, роли участников, технические системы, ресурсы, регламенты, события, а также логические связи между ними.

Выделение сущностей осуществляется на основе анализа проектной, нормативной, организационно-распорядительной и эксплуатационной документации. Используются такие методы, как:

- контент-анализ документов (например, ПОС, ПНР-графиков, актов, протоколов),

- экспертное интервьюирование участников процессов,
- использование текстовой разметки и онтологических словарей, при необходимости — с привлечением методов семантической обработки текстов (text mining).

Выделенные сущности проходят категоризацию, то есть отнесение к определённым типам (классам), отражающим их роль и уровень абстракции в модели. Обычно выделяют следующие базовые категории Документ / Процесс / Событие / Роль (участник) / Ресурс / Объект / Решение (акт управления).

В качестве примера можно привести следующую схему (Рисунок 4):

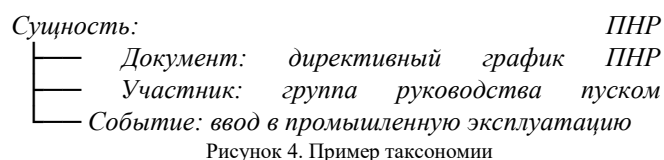
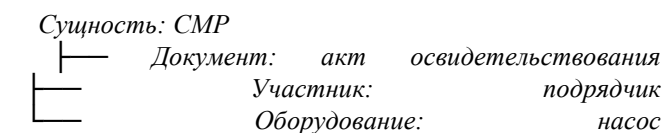


Рисунок 4. Пример таксономии

Для каждой из сущностей описываются связи и свойства, выражаемые через object-properties и data-properties. Например, акт освидетельствования связан с определённым этапом работ, подписан конкретным участником и привязан к системе. Такие связи формализуются с использованием языка OWL и логических ограничений. Для проверки корректности модели используются reasoner'ы, такие как HermiT и Pellet, а для визуализации — WebVOWL. В табличной форме ниже представлена инструментальная база, планируемая к применению в рамках проекта:

Таблица 2. Инструментальная база проекта

Компонент	Инструмент	Преимущества
Онтология	Protégé + OWL	Расширяемость, логическая проверка, reasoner'ы
Хранение	GraphDB	Высокая производительность, поддержка SPARQL
Визуализация	WebVOWL	Наглядное отображение графов, интеграция с OWL
Инференция	HermiT, Pellet	Автоматический вывод знаний, логическая совместимость
Обмен данных	RDF, OWL/XML, TTL	Интероперабельность, поддержка W3C-стандартов
Запросы	SPARQL	Гибкий язык выборки по онтологии и триплетам

Следующий этап исследований будет посвящён применению разработанного подхода на конкретном

проекте строительства Курской АЭС-2 (таблица 3, рисунок 5). В рамках этой работы планируется структурный анализ проектной документации, графиков, документооборота и организационной структуры. На основе выявленных сущностей будет построена прикладная онтологическая модель для одной

из систем энергоблока. Модель будет протестирована с помощью запросов SPARQL, средств логического вывода и визуализации. Полученные результаты лягут в основу следующей публикации, ориентированной на описание прикладной реализации.

Таблица 3. Этапность реализации прикладного моделирования

Наименование подэтапа	Содержание работ	Методики и инструменты	Исходные данные	Ожидаемые результаты
1. Сбор и структурирование исходной информации	Анализ проектной документации, КСП, актов, протоколов, BIM-моделей. Выделение сущностей.	Контент-анализ, классификация, глоссарий; ПО: Excel, Protégé, NLP-инструменты	ПОС, ПНР-графики, документация Курской АЭС-2	Набор сущностей и определений для онтологической модели
2. Формирование онтологической структуры (таксономии)	Построение иерархии классов и связей между сущностями	Protégé, OWL-структуры, RDF-словарь	Глоссарий, выделенные сущности	Онтологическая основа модели (дерево классов и свойств)
3. Моделирование связей и ограничений	Формализация отношений, ограничений, логических правил	Object/Data properties в OWL, правила reasoner-ов	Таксономия, карта взаимодействий	Онтология со связями и логическими связями, готовая к reasoning
4. Разработка пилотной подмодели	Моделирование одного узла/системы (например, ДЭС) в виде фрагмента онтологии	Protégé + SPARQL + WebVOWL	Проектная документация по выбранной системе	Проверенная и визуализированная подмодель с рабочими запросами
5. Валидация и тестирование	Проверка онтологии с помощью reasoner, построение запросов и интерпретация результатов	Pellet, HermiT, GraphDB, SPARQL	Подмодель, тестовые запросы, логи	Подтверждение консистентности и логической полноты модели
6. Подготовка к масштабированию и пилотной интеграции	Подготовка документации, паспорт онтологии, разработка предложений по масштабированию	Редактор документов, шаблоны паспортов, нотации UML/OWL	Результаты моделирования обратная связь от пользователей	Пакет материалов для перехода к внедрению и расширению модели

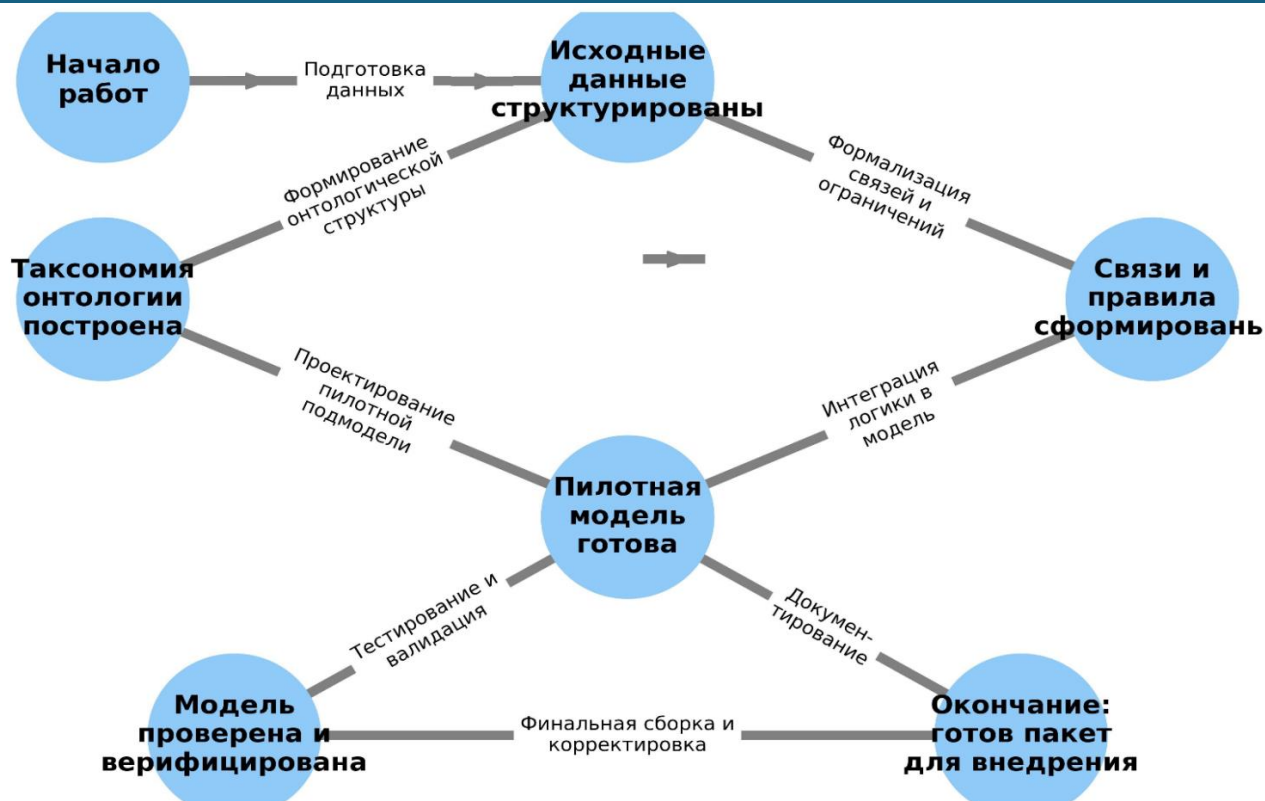


Рисунок 5 Типовой сетевой график реализации методики

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была произведена первичная декомпозиция сущностей, участвующих в процессе проектирования, строительства и ПНР. Были выделены основные

компоненты, которые станут базовыми единицами информационной модели. Затем проведена идентификация сущностей, рассмотрены примеры элементов, их границы, даны конкретные названия. В дальнейшем планируется идентифицировать и дать

уникальные имена каждому элементу онтологической модели. Для создания полноценной системы и возможности прогнозирования будущего состояния необходимо выполнить следующее: создать классификацию всех элементов для их иерархии и учета взаимосвязей, описать свойства каждого класса и элемента. Так как онтологическая модель имеет мало информативности без практического смысла. Основной этап – создание структурированной системы взаимосвязей между каждым элементом, требует формализации (выбора языка и нотации).

В статье рассмотрена концепция использования онтологической модели и цифрового двойника для управления жизненным циклом сложного инженерного объекта на этапе строительства. Основное внимание уделено проблемам увеличения сроков строительства из-за отсутствия единого сквозного процесса управления. Предложенная онтологическая модель позволяет интегрировать процессы управления сооружением АЭС, сократить сроки и снизить стоимость строительства. Были проанализированы подходы к реализации онтологических моделей, предусмотренные национальным нормативным регулированием ведущих стран, проектирующих сооружающих объекты гражданской атомной энергетики в мире. Выполнено сопоставление подходов национальных инструментов с позицией ведущей международной организации – МАГАТЭ и с проработками ведущих научных организаций российской атомная отрасли.

Рассмотрены варианты современного цифрового инструментария создания онтологических моделей. Разработан пошаговый план и сетевой график реализации онтологической модели конкретного масштабного объект гражданской атомной энергетики – Курской АЭС-2.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Нечаевский А.В. История развития компьютерного имитационного моделирования, Системный анализ в науке и образовании. 2013. № 2. С. 1-15.
- [2] Касаткин М.Ю., Коробко В.В. Моделирование как метод научного и естественнонаучного познания / М.Ю. Касаткин, В.В. Коробко. Саратов: ГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2017. – 126 с.
- [3] Alexander J. H. Knowledge Level Engineering Ontological Analysis / J. H. Alexander, M. J. Freiling, S. Shulman, J. Staley, S. Rehfuess, S. Messick, AAAI. 1986. стр. 963-968.
- [4] Жабицкий М.Г., Ожерельев С.А., Тихомиров Г.В. Концепция комплексного цифрового двойника сложного инженерного объекта на примере исследовательского реактора НИЯУ МИФИ, International Journal of Open Information Technologies, 2021, том 9, № 8, стр. 43-51
- [5] Массель Л.В. и А.Г. Массель Семантическое моделирование при построении цифровых двойников энергетических объектов и систем, Онтология проектирования, 2021, том 13, № 1, стр. 44-54
- [6] Книга «Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт», редактор А.Боровков, Москва 2020, издана при участии ГК Росатом, 401 стр.
- [7] Во ВНИИАЭС приступили к практической разработке первого цифрового двойника АЭС малой мощности, Атомная энергия Available: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/10/05/118102>
- [8] Л.В.Массель, Т.Н.Ворожцова Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики.// Онтология проектирования 2020 Том 10 Номер: 3 (37), стр. 327-337
- [9] О.Ю. Марьясин, Разработка онтологий для цифрового двойника зданий, Онтология проектирования 2019 Том 9 Номер: 4 (34), стр. 480-495
- [10] Жабицкий М.Г., Мельников В.Е., Джаппаров Р.Р. Применение text mining при формировании информационного контейнера нормативной документации третьего уровня зрелости информационной модели сложного инженерного объекта на примере энергоблока АЭС, Применение технологий виртуальной реальности и смежных информационных систем в междисциплинарных задачах FIT-M-2020 Сборник тезисов международной научной конференции. Издательство "Знание-М" (Москва), 2020
- [11] Научный семинар по цифровым двойникам прошел во ВНИИАЭС, Сайт АО «ВНИИАЭС», раздел «Новости», 2023 Available:https://vniiaes.ru/institute-description/novosti2/index.php?sphrase_id=2646, https://vniiaes.ru/upload/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5_%D0%B4%D0%B2%D0%BE%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B8_%D0%BF.%D1%80_%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82.pdf
- [12] На Нововоронежской АЭС обсудили применение технологий искусственного интеллекта в атомной энергетике., Коммерсантъ. 2024, Available:https://www.kommersant.ru/doc/6594567?utm_source=chatgpt.com
- [13] Новости о применении цифровых двойников в атомной энергетике. Available:https://www.atomic-energy.ru/digital-twins/news?page=6&utm_source=chatgpt.com
- [14] Разработка методических основ создания цифрового двойника теплогидравлического стенда атомной энергетической установки, Сайт Центра развития технологий Росатома Available:<https://rosatom-dev.mephi.ru/digital-twin/>
- [15] Интеллектуальный штурм: на АЭС внедряют цифровых дублеров оперативного персонала. Страна Росатом. Available:https://strana-rosatom.ru/2024/04/26/intellektualnyj-shturm-na-aes-vnedrya/?utm_source=chatgpt.com
- [16] Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Available:<https://mntk.rosenergoatom.ru/>
- [17] Коньков В.В., Широков В.И., Жабицкий М.Г. Анализ возможности прогнозирования на исторических данных срывов сроков строительства с использованием методов машинного обучения // Современные проблемы физики и технологий, Сборник тезисов докладов XI международной молодежной научной школы-конференции. Москва, 2024. Издательство: НИЯУ МИФИ, 2024г. Стр. 218-220
- [18] Коньков В.В., Широков В.И., Жабицкий М.Г. Прогнозирование срывов сроков строительства с использованием машинного обучения на основе исторических данных о фактической продолжительности завершённых проектов, International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12. № 8. Стр. 35-47.
- [19] Приказ Госкорпорации "Росатом" от 08.08.2022 N 1/1026-П «Об утверждении типового графика сооружения и финансирования двухблочной АЭС»
- [20] Сооружение энергоблоков в России, Сайт Концерна Росэнергоатом / Станции и проекты / Сооружение энергоблоков в России / Available:https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sooruzhenie-energloblokov-v-rossii/
- [21] ВВЭР: сегодня и завтра., Вестник атомпрома. 2024 № 5 (июнь 2024), Available:https://atomvestnik.ru/wp-content/uploads/2024/07/%D0%92%D0%90_05_2024_spread.pdf
- [22] Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition (NUREG-0800, Formerly issued as NUREG-75/087), Available:<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr0800/>
- [23] Review Guidelines for Field-Programmable Gate Arrays in Nuclear Power Plant Safety Systems (NUREG/CR-7006, ORNL/TM-2009/20). NUREG/CR-7006. Modeling and Simulation for Advanced Reactor Design., Available:<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr7006/index.html>
- [24] United states nuclear regulatory commission. Response to nrc inspection report 030-30118/2010-001 and notice of violation, Available:<https://www.nrc.gov/docs/ML1016/ML101610024.pdf>
- [25] Technical Meeting on the Software Reliability of Digital Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plant Safety. IAEA Headquarters, Vienna, Austria and virtual participation via Microsoft Teams, Available:

- https://www.iaea.org/sites/default/files/22/08/22-01198e_information_sheet.pdf
- [26] Western European Nuclear Regulators Association, Available: <https://www.wenra.eu/publications>
- [27] European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG), Available: <https://www.ensreg.eu/publications>
- [28] IAEA Safety Standards Series., Available: <https://www.iaea.org/resources/safety-standards>
- [29] Radiation Protection and NORM Residue Management in the Titanium Dioxide and Related Industries. No. 76. International Atomic Energy Agency (IAEA). IAEA-TECDOC-1651. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1651_web.pdf
- [30] Information Technology for Nuclear Power Plant Configuration Management. International Atomic Energy Agency (IAEA). IAEA-TECDOC-1651. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1651_web.pdf
- [31] China Nuclear Energy Association (CNEA). News., Available: <https://en.china-nea.cn/>
- [32] China Atomic Energy Authority., Available: https://en.wikipedia.org/wiki/China_Atomic_Energy_Authority
- [33] ISO/IEC 21838-2:2021. Information technology — Top-level ontologies (TLO). Part 2: Basic Formal Ontology (BFO), Available: <https://www.iso.org/standard/74572.html>
- [34] OWL 2 Web Ontology Language Document Overview (Second Edition) W3C Recommendation 11 December 2012., Available: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/>
- [35] OWL Web Ontology Language Reference W3C Recommendation 10 February 2004., Available: <https://www.w3.org/TR/owl-ref/>
- [36] OWL – Web Ontology Language. Gouveia, A. and Cardoso, J. OWL: Web Ontology Language. In Encyclopedia of Information Science and Technology, Information Science Reference, Pennsylvania, USA, 2007., Available: <https://jorge-cardoso.github.io/rd/Papers/BC-2007-016-ISR-OWL-Web-ontology-language.pdf>
- [37] Resource Description Framework - RDF (модель данных). Большая российская энциклопедия., Available: <https://bigenc.ru/c/rdf-model-dannykh-c6e3a2>
- [38] The Resource Description Framework (RDF). Enterprise knowledge., Available: <https://enterprise-knowledge.com/the-resource-description-framework-rdf/>
- [39] Tutorial: Conceptual simulation modeling with Onto-UML. Research gate., Available: https://www.researchgate.net/publication/261117848_Tutorial_Conceptual_simulation_modeling_with_Onto-UML
- [40] OntoUML specification Documentation., Available: https://ontouml.readthedocs.io/_/downloads/en/init-ontouml/pdf/
- [41] Ontology Reasoner – Uncovering the Answers easily. AI info., Available: <https://ai-info.org/ontology-reasoner/>
- [42] A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. Protégé., Available: <https://protege.stanford.edu/>
- [43] Birte Glimm, Ian Horrocks, Boris Motik, Giorgos Stoilos, Zhe Wang HermiT. An OWL 2 Reasoner., Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10817-014-9305-1>
- [44] Pellet: An OWL DL Reasoner. Evren sirin and bijan parsia mindswap research group university of maryland, college park, md., Available: <https://scispace.com/pdf/pellet-an-owl-dl-reasoner-oqcb14v1v.pdf>
- [45] Robert David Stevens, Margaret Stevens, Nicolas Matentzoglou, Simon Jupp Manchester Family History Advanced OWL Tutorial, Available: <http://owl.cs.manchester.ac.uk/>
- [46] Joint research by members of the Information Management Group, Available: <http://owl.cs.manchester.ac.uk/tools/fact/>
- [47] TopBraid Composer. Getting Started., Available: <https://topbraidcomposer.org/html/>
- [48] Webprotege., Available: <https://webprotege.stanford.edu/>
- [49] Working with Workbench. GraphDB., Available: <https://graphdb.ontotext.com/documentation/11.0/working-with-workbench.html>
- [50] Triplestores 101: Storing Data for Efficient Inferencing. DataVesity., Available: <https://www.dataversity.net/triplestores-101-storing-data-efficient-inferencing/>
- [51] Apache Jena Fuseki., Available: <https://jena.apache.org/documentation/fuseki2/>
- [52] StarDog. Creating Triplestore., Available: <https://community.stardog.com/t/creating-triplestore/4802>
- [53] Introduction to Graph Database on NoSQL. GeeksforGeeks, Available: <https://www.geeksforgeeks.org/dbms/introduction-to-graph-database-on-nosql/>
- [54] Drakopoulos G., Kanavos A., Tsois D., Mylonas P., Sioutas S. Towards A Framework For Tensor Ontologies Over Neo4j: Representations And Operations., Available: https://www.researchgate.net/publication/317903868_Towards_A_Framework_For_Tensor_Ontologies_Over_Neo4j_Representations_And_Operations
- [55] С.И. Боридько, С.А. Клятецкий, «Предпосылки создания единой автоматизированной системы управления предприятием (АЭС) на всех стадиях жизненного цикла: от строительства до вывода из эксплуатации». International Journal of Open Information Technologies 2025 vol. 13, no. 6
- [56] Zhabitskii M.G., Melnikov V.E., Boyko O.V. Complex engineering object digital twins – power engineering smart transformation basic concept, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. T. 1035. № 1. Стр. 012050.

Статья получена 10 августа 2025 г.

Екимовская Валерия Алексеевна – аспирант НИЯУ МИФИ, ассистент ВИШ МИФИ, VAEkimovskaya@merphi.ru

Барсуков Илья Александрович – студент магистратуры ВИШ НИЯУ МИФИ, barsukovia@list.ru

Екименко Анастасия Андреевна – студент магистратуры ВИШ НИЯУ МИФИ, ekimenko.a.a@yandex.ru

Литвин Сергей Леонидович – студент магистратуры ВИШ НИЯУ МИФИ, Antisfen1@yandex.ru

Соцкий Андрей Иванович – студент магистратуры ВИШ НИЯУ МИФИ, annord@yandex.ru

Жабицкий Михаил Георгиевич, заместитель директора ВИШ НИЯУ МИФИ, jabitsky@mail.ru

Concept of the use of ontological model in nuclear power to manage the life cycle of a complex engineering object during the construction phase

V.A. Ekimovskaya, I.A. Barsukov, A.A. Ekimenko, S.L. Litvin, A.I. Sotsky, M.G.Zhabitsky

Abstract — This article considers the concept of using an ontological model and a digital double to manage the life cycle of a complex engineering object (SIS) at the design and construction stage. Emphasis is placed on the problem of increasing construction lead times due to the lack of a single end-to-end management process. The life cycle stages of SIS, including design, construction and installation work (CTP) and commissioning (PDP), have been considered. Key players in the process, planning structure and transformation of input data into output results are described. The results of research work should be the concept of ontological model, technical task for its development on the basis of functional and non-functional requirements to the system, as well as a ready ontological model with customized relationships.

Keywords — Digital double, life cycle, complex engineering object, NPP, ontological model, project management.

REFERENCES

- [1] Nechaevsky A.V. History of the development of computer simulation modeling, System analysis in science and education. 2013. № 2. Pp. 1-15.
- [2] Kasatkin M.Yu., Korobko V.V. Modelirovanie kak metod nauchnogo i estestvennauchnogo nauchnogo poznaniya [Modeling as a method of scientific and natural science knowledge]. Saratov: GU named after N.G. Chernyshevsky, 2017. – 126 p.
- [3] Alexander J. H. Knowledge Level Engineering Ontological Analysis / J. H. Alexander, M. J. Freiling, S. Shulman, J. Staley, S. Rehfuß, S. Messick, AAAI. 1986. стр. 963-968.
- [4] Zhabitsky M.G., Ozherelyev S.A., Tikhomirov G.V. The concept of a complex digital twin of a complex engineering object on the example of the research reactor of the National Research Nuclear University MEPhI, International Journal of Open Information Technologies, 2021, vol. 9, No 8, pp. 43-51
- [5] Massel L.V. and A.G. Massel Semantic modeling in the construction of digital twins of energy objects and systems, Ontologies of Design, 2021, vol. 13, No 1, pp. 44-54
- [6] The book "Digital Twin. Analysis, Trends, World Experience", edited by A. Borovkov, Moscow 2020, published with the participation of Rosatom State Corporation, 401 pages.
- [7] VNIIAES has begun the practical development of the first digital twin of low-power nuclear power plants, Atomnaya energiya Available: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/10/05/118102>
- [8] L.V.Massel, T.N.Vorozhtsova Ontological Approach to the Construction of Digital Twins of Energy Objects and Systems.// Ontology of Design 2020 Volume 10 Issue: 3 (37), pp. 327-337
- [9] Maryasin, Development of ontologies for the digital twin of buildings, Design Ontology 2019 Volume 9 Issue: 4 (34), pp. 480-495
- [10] Zhabitsky M.G., Melnikov V.E., Dzhapparov R.R. Application of text mining in the formation of an information container of regulatory documentation of the third level of maturity in the information model of a complex engineering object on the example of a nuclear power unit, Application of virtual reality technologies and related information systems in interdisciplinary problems FIT-M-2020 Collection of abstracts of the international scientific conference. Znanie-M Publishing House (Moscow), 2020
- [11] Научный семинар по цифровым двойникам прошел во ВНИИАЭС, Сайт АО «ВНИИАЭС», раздел «Новости», 2023 Available: https://vniiaes.ru/institute-description/novosti2/index.php?sphrase_id=2646 , https://vniiaes.ru/upload/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5_%D0%B4%D0%B2%D0%BE%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B8_%D0%BF.%D1%80_%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82.pdf
- [12] The Novovoronezh NPP discussed the use of artificial intelligence technologies in nuclear energy., Kommersant. 2024, Available: https://www.kommersant.ru/doc/6594567?utm_source=chatgpt.com
- [13] News about the use of digital twins in nuclear energy. Available: https://www.atomic-energy.ru/digital-twins/news?page=6&utm_source=chatgpt.com
- [14] Development of methodological foundations for the creation of a digital twin of a thermohydraulic stand of a nuclear power plant, Website of the Rosatom Technology Development Center <https://rosatom-dev.mephi.ru/digital-twin/>
- [15] Intellectual assault: digital backups of operating personnel will be introduced at nuclear power plants. Country Rosatom. Available: https://strana-rosatom.ru/2024/04/26/intellektualnyj-shturm-na-aes-vnedrya/?utm_source=chatgpt.com
- [16] International Scientific and Technical Conference "Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Energy", Available: <https://mntk.rosenergoatom.ru/>
- [17] Konkov V.V., Shirokov V.I., Zhabitsky M.G. Analysis of the possibility of forecasting on historical data of disruptions in construction terms using machine learning methods. Moscow, 2024. Publisher: NRNU MEPhI, 2024. 218-220
- [18] Konkov V.V., Shirokov V.I., Zhabitsky M.G. Forecasting construction deadlines using machine learning based on historical data on the actual duration of completed projects. 2024. T. 12. № 8. Page. 35-47.
- [19] Order of Rosatom State Corporation No. 1/1026-P dated 08.08.2022 "On Approval of the Standard Schedule for the Construction and Financing of a Two-Unit NPP"
- [20] Construction of power units in Russia., Rosenergoatom Concern website / Plants and projects / Construction of power units in Russia / Available: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sooruzhenie-energoblokov-v-rossii/
- [21] VVER: Today and Tomorrow. Vestnik atomproma. 2024 No 5 (June 2024), Available: https://atomvestnik.ru/wp-content/uploads/2024/07/%D0%92%D0%90_05_2024_spread.pdf
- [22] Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition (NUREG-0800, Formerly issued as NUREG-75/087), Available: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr0800/>
- [23] Review Guidelines for Field-Programmable Gate Arrays in Nuclear Power Plant Safety Systems (NUREG/CR-7006, ORNL/TM-2009/20). NUREG/CR-7006. Modeling and Simulation for Advanced Reactor Design., Available: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr7006/index.html>
- [24] United states nuclear regulatory commission. Response to nrc inspection report 030-30118/2010-001 and notice of violation, Available: <https://www.nrc.gov/docs/ML1016/ML101610024.pdf>
- [25] Technical Meeting on the Software Reliability of Digital Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plant Safety. IAEA Headquarters, Vienna, Austria and virtual participation via Microsoft Teams, Available: https://www.iaea.org/sites/default/files/22/08/22-01198e_information_sheet.pdf
- [26] Western European Nuclear Regulators Association, Available: <https://www.wenra.eu/publications>
- [27] European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG), Available: <https://www.ensreg.eu/publications>
- [28] IAEA Safety Standards Series., Available: <https://www.iaea.org/resources/safety-standards>
- [29] Information Technology for Nuclear Power Plant Configuration Management. International Atomic Energy Agency (IAEA). IAEA-

- TECDOC-1651. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1651_web.pdf
- [30] Radiation Protection and NORM Residue Management in the Titanium Dioxide and Related Industries. No. 76. Available: <https://www.iaea.org/publications/8884>
- [31] China Nuclear Energy Association (CNEA). News., Available: <https://en.china-nea.cn/>
- [32] China Atomic Energy Authority., Available: https://en.wikipedia.org/wiki/China_Atomic_Energy_Authority
- [33] ISO/IEC 21838-2:2021. Information technology — Top-level ontologies (TLO). Part 2: Basic Formal Ontology (BFO), Available: <https://www.iso.org/standard/74572.html>
- [34] OWL 2 Web Ontology Language Document Overview (Second Edition) W3C Recommendation 11 December 2012., Available: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/>
- [35] OWL Web Ontology Language Reference W3C Recommendation 10 February 2004., Available: <https://www.w3.org/TR/owl-ref/>
- [36] OWL – Web Ontology Language. Gouveia, A. and Cardoso, J. OWL: Web Ontology Language. In Encyclopedia of Information Science and Technology, Information Science Reference, Pennsylvania, USA, 2007., Available: <https://jorge-cardoso.github.io/rd/Papers/BC-2007-016-ISR-OWL-Web-ontology-language.pdf>
- [37] Resource Description Framework - RDF (Data Model). The Great Russian Encyclopedia., Available: <https://bigenc.ru/c/rdf-model-dannykh-c6e3a2>
- [38] The Resource Description Framework (RDF). Enterprise knowledge., Available: <https://enterprise-knowledge.com/the-resource-description-framework-rdf/>
- [39] Tutorial: Conceptual simulation modeling with Onto-UML. Research gate., Available: https://www.researchgate.net/publication/261117848_Tutorial_Conceptual_simulation_modeling_with_Onto-UML
- [40] OntoUML specification Documentation., Available: https://ontouml.readthedocs.io/_/downloads/en/init-ontouml/pdf/
- [41] Ontology Reasoner – Uncovering the Answers easily. AI info., Available: <https://ai-info.org/ontology-reasoner/>
- [42] A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. Protégé, Available: <https://protege.stanford.edu/>
- [43] Birte Glimm, Ian Horrocks, Boris Motik, Giorgos Stoilos, Zhe Wang HermiT. An OWL 2 Reasoner, Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10817-014-9305-1>
- [44] Pellet: An OWL DL Reasoner. Evren sirin and bijan parsia mindswap research group university of maryland, college park, md, Available: <https://scispace.com/pdf/pellet-an-owl-dl-reasoner-ooqcb14vlv.pdf>
- [45] Robert David Stevens, Margaret Stevens, Nicolas Matentzoglou, Simon Jupp Manchester Family History Advanced OWL Tutorial, Available: <http://owl.cs.manchester.ac.uk/>
- [46] Joint research by members of the Information Management Group, Available: <http://owl.cs.manchester.ac.uk/tools/fact/>
- [47] TopBraid Composer. Getting Started, Available: <https://topbraidcomposer.org/html/>
- [48] Webprotege, Available: <https://webprotege.stanford.edu/>
- [49] Working with Workbench. GraphDB, Available: <https://graphdb.ontotext.com/documentation/11.0/working-with-workbench.html>
- [50] Triplestores 101: Storing Data for Efficient Inferencing. DataVersity, Available: <https://www.dataversity.net/triplestores-101-storing-data-efficient-inferencing/>
- [51] Apache Jena. Apache Jena Fuseki, Available: <https://jena.apache.org/documentation/fuseki2/>
- [52] StarDog. Creating Triplestore., Available: <https://community.stardog.com/t/creating-triplestore/4802>
- [53] Introduction to Graph Database on NoSQL. GeeksforGeeks, Available: <https://www.geeksforgeeks.org/dbms/introduction-to-graph-database-on-nosql/>
- [54] Drakopoulos G., Kanavos A., Tsolis D., Mylonas P., Sioutas S.. Towards A Framework For Tensor Ontologies Over Neo4j: Representations And Operations., Available: https://www.researchgate.net/publication/317903868_Towards_A_Framework_For_Tensor_Ontologies_Over_Neo4j_Representations_And_Operations
- [55] S.I. Boridko, S.A. Klyatetsky, "Prerequisites for the creation of a unified automated enterprise management system (NPP) at all stages of the life cycle: from construction to decommissioning". International Journal of Open Information Technologies 2025 vol. 13, no. 6
- [56] Zhabitskii M.G., Melnikov V.E., Boyko O.V. Complex engineering object digital twins – power engineering smart transformation basic concept, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. T. 1035. № 1. Сtp. 012050