

Разработка системы, основанной на знаниях, для проектирования инновационных процессов создания продукции сетевых предприятий

Ю.Ф. Тельнов^a 

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

В.А. Казаков^a 

E-mail: Kazakov.VA@rea.ru

В.М. Трембач^b 

E-mail: trembach@yandex.ru

^a Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова
Адрес: 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36

^b Московский авиационный институт
Адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Аннотация

Актуальность разработки систем, основанных на знаниях, используемых для поддержки инновационных процессов создания продуктов и услуг, связана с объективной необходимостью сокращения жизненного цикла продукции под воздействием применения современных цифровых технологий в рамках развивающихся сетевых предприятий. Известные результаты исследований в области модельно-ориентированного проектирования продуктов, процессов, систем и предприятий в полной мере не обеспечивают семантическую интероперабельность при взаимодействии участников инновационного процесса. Целью работы является построение архитектуры системы, основанной на знаниях, реализующей семантическую интероперабельность участников сетевого предприятия на различных этапах жизненного цикла продукции. Работа опирается на применение модельно-ориентированного подхода к построению цифрового потока (нити) на всех этапах жизненного цикла продукции, онтологического подхода к семантическому моделированию распределенной базы знаний и многоагентного подхода к организации взаимодействия заинтересованных участников инновационного процесса. В работе предложена функциональная архитектура системы, основанной на знаниях, включающая модули планирования инновационного процесса, формирования ценностных характеристик продукции и функциональных требований, проектирования конструкции продукта и цепочки создания ценности. Также разработана

многоуровневая система онтологий инновационного процесса и описано ее применение в работе функциональных модулей, осуществляющих доступ к сопряженным базам знаний. Разработка систем, основанных на знаниях, на основе полученных результатов позволит находить наилучшие проектные решения по конфигурации продукции и соответствующих цепочек создания ценности вследствие возможной итерационности инновационного процесса и повышения семантической интероперабельности участников сетевого предприятия.

Ключевые слова: инновационный процесс; цифровой поток (нить); модельно-ориентированный подход; система, основанная на знаниях; онтология инновационного процесса; участники сетевого предприятия; цепочка создания ценности; многоагентное взаимодействие; семантическая интероперабельность.

Цитирование: Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Трёмбач В.М. Разработка системы, основанной на знаниях, для проектирования инновационных процессов создания продукции сетевых предприятий // Бизнес-информатика. 2020. Т. 14. № 3. С. 35–53. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.3.35.53

Введение

И нновационные процессы создания новой продукции отличаются высокой степенью неопределенности и динамичности изменения требований к продукции, особенно на начальных этапах жизненного цикла, связанных с определением концепции продукта и последующего проектирования. Вместе с тем тенденция общего сокращения жизненного цикла продукции в условиях широкого применения цифровых технологий, в частности технологии «цифровых» двойников» и виртуализации взаимодействия участников инновационного процесса сетевого предприятия, определяет потребность в разработке новых методов моделирования информационного пространства на всех стадиях жизненного цикла.

Основная проблема существующих методов моделирования информационного пространства в виде проектных репозиторий [1] заключается в слабой семантической связанности используемых информационных ресурсов, отражающих различные стороны инновационного процесса создания продукции. Следствием возникающих семантических проблем становится высокая трудоемкость получения согласованных проектных решений, формируемых разнородными участниками сетевого предприятия. Это делает актуальной разработку системы, основанной на знаниях, которая позволяла бы обеспечивать интегрированное, непротиворечивое и динамическое использование знаний на протяжении всего инновационного процесса — от возникновения замысла продукта до реального его воплощения в промышленно-изготавливаемое изделие.

Решение проблемы интегрированного представления знаний о продукте и связанных бизнес-процессах в настоящее время базируется на модельно-ориентированном подходе к построению систем и предприятий [2, 3], реализации концепции цифровых двойников [4], а также на концепции динамического поддержания моделей продуктов на всех этапах жизненного цикла — концепции цифровой нити [5, 6]. Семантическая целостность и непротиворечивость используемых информационных источников (семантическая интероперабельность) исследуется в работах, связанных с построением онтологий предприятий [7, 8]. Вместе с тем комплексная увязка перечисленных концепций в рамках создания единой системы, основанной на знаниях, далека от теоретического решения и практической реализации, особенно в части создания механизмов перехода между моделями на разных стадиях жизненного цикла продукции и взаимодействия заинтересованных участников (стейкхолдеров) инновационного процесса.

В связи с вышеизложенным в работе ставится цель определить архитектуру системы, основанной на знаниях, базирующейся на многоуровневой системе онтологий инновационного процесса, которая позволила бы обеспечить семантическую согласованность моделей продуктов и процессов на различных стадиях жизненного цикла, обеспечивающее эффективное динамическое взаимодействие реальных и потенциальных участников сетевого предприятия с помощью многоагентных технологий.

1. Методологические основы создания систем, основанных на знаниях, для проектирования инновационных процессов

Проектирование инновационных процессов создания продуктов сетевого предприятия, как правило, имеет нелинейный итерационный характер, предполагающий длительное время поиска и апробирования концептуальных идей, ресурсов для их реализации, согласования с предполагаемыми участниками сетевого предприятия планов по производству и выводу на рынок продукции и услуг. Такой динамический характер процессов проектирования продуктов обуславливает необходимость применения различных методов моделирования продукции и услуг, а также связанных с ними процессов на всех этапах жизненного цикла.

Теоретически процесс создания продуктов на основе моделирования систем нашел свое отражение в подходе OMG Model Driven System Design (MDS) [2]. Согласно этому подходу, любое изделие может иметь сложную структуру соподчиненных компонентов, к которой, с одной стороны, должны предъявляться четко определенные на каждый момент времени требования, а с другой стороны, эти компоненты должны представляться набором моделей с целью выработки наиболее приемлемых решений, соответствующих сформулированным требованиям. Принятие проектных решений зависит от множества факторов и, прежде всего, от наличия ресурсов, способностей и рисков их осуществления. Оценка способностей и рисков может характеризоваться неполнотой и недостоверностью информации, а также изменчивостью состояния ресурсов во времени под воздействием различных внешних условий. Данные обстоятельства обуславливают необходимость сохранения различных вариантов проектных решений в проектной репозитории и непрерывного обновления информации о состоянии работы над проектом.

В этой связи заслуживает внимание организация хранения информации в интеллектуальных проектных репозиториях, интегрирующих множество источников информации о проекте с помощью онтологического инструментария [1]. При этом формируется единое информационное пространство участников процесса создания продуктов, принадлежащих различным категориям. Вместе с тем, текстовая форма, лежащая в основе документальной организации проектной информации, имеет целый

ряд ограничений, связанных с изолированностью документов друг от друга. В этом случае модельное представление проектной информации обеспечивает большую связность анализируемых объектов и их параметров, а также возможность применения разнообразного инструментария количественной и качественной оценки проектных решений.

Развитием концепции динамического ведения информации о состоянии проектных решений по разрабатываемому продукту на различных стадиях жизненного цикла продуктов является концепция «применения интегрированных хранилищ информации, включающих, кроме сбора и анализа первичных данных, средства объектного представления предметной области в виде коллекций цифровых двойников (Digital Twins Collection, DTC) с описанием структуры, состава объектов, их свойств, а также известных отношений (связей) между ними. Перспективные технологии организации интегрированных хранилищ информации должны включать также методы их систематизированного описания (конструирования) и логико-аналитической обработки» [4].

Как правило, цифровой двойник представляет собой программно-аппаратный комплекс, отображающий состояние компонентов реального изделия (оборудования) во времени. Цифровой двойник получает информацию от своего физического аналога, например, с помощью интернета вещей (Internet of Things, IoT) и осуществляет при необходимости управляющие воздействия по приведению физического объекта в необходимое состояние. При этом цифровой двойник может выполнять аналитические и прогнозные функции, анализируя большие объемы данных и функционируя, по сути, как программный агент, наделенный интеллектуальной способностью моделирования ситуаций. В принципе, цифровые двойники могут объединяться в многоагентные системы для моделирования более сложных технологических процессов.

Цифровые двойники в основном используются на стадии эксплуатации продуктов, накапливая большие объемы данных о структуре изделия или производственного технологического процесса. Эти данные также могут использоваться для совершенствования или перепроектирования структуры продуктов. Результат проектирования продуктов может сразу находить отражение в информационной структуре цифрового двойника. Вместе с тем, концепция цифровых двойников малоприменяема

для осуществления собственно процессов проектирования продуктов. Это объясняется тем, что для проектирования требуется не только информация о функционировании существующих изделий, но также и внешняя информация о научно-технических разработках, поведении конкурентов, поставщиков, производителей и потребителей продукции.

В этом плане большой интерес представляет развитие концепции цифровой нити (digital thread), которая рассматривает создание, внедрение и эксплуатацию продуктов на всех этапах жизненного цикла [5], моделируя, по сути, не отдельные изделия и процессы, а взаимосвязанные процессы предприятия и их взаимодействия с внешними участниками производственной деятельности. В результате образуются предприятия, основанные на моделях (Model Based Enterprise) [3], что в наибольшей степени удовлетворяет требованиям создания гибких и динамически образуемых сетевых предприятий [9].

Проект Digital Thread for Smart Manufacturing Systems включает методы и протоколы, расширяющие и дополняющие сквозной поток информации, проходящий через процессы проектирования, производства и поддержки продуктов, позволяющий интегрировать интеллектуальные производственные системы. В результате сокращается жизненный цикл доведения продукта до стадии производства, при экономии затрат [6]. В проекте большое внимание уделяется установлению взаимосвязи модели продукта и модели производственного процесса, которая дает возможность вносить коррективы в проектные решения посредством обратной связи от реализации производственного процесса к конструкции изделия. При этом используются основные принципы системной инженерии в части управления требованиями, их верификации и валидации в четко формализованном виде. Вместе с тем проблемы передачи однозначной семантики требований и обратной информации об их исполнении в полной мере не решены. В связи с этим особый интерес представляет развитие информационного фреймворка качества (Quality Information Framework, QIF) для формализации требований к обмену информацией с точки зрения измерения качества¹.

Для привлечения к процессу проектирования продукции внешних заинтересованных лиц и учета конкурентной среды требуется расширение модели

продукции и производственных процессов на множество всех бизнес-процессов предприятия, реализуя, по сути, подход к инжинирингу предприятия. В этом плане применение концепции Model-Based Enterprise (MBE) предполагает внедрение достижений в области стандартов, методик проведения испытаний и метрологии, которые позволяют производителям интегрировать модели систем, услуг, продуктов, процессов и логистики в рамках всего производственного предприятия [10]. При этом большое значение придается обеспечению соответствия потребительских качеств возможностям их процессной реализации, а также наилучшей интероперабельности децентрализованных распределенных подсистем с целью формирования различных вариантов конфигураций продукции под конкретные спецификации требований.

Концепция MBE предполагает реализацию следующих проектных принципов [10]:

- ◆ интеграция различных видов статических и динамических моделей интеллектуальных производственных систем и аналитических систем на основе междисциплинарного обмена между ними системной и проектной информацией;
- ◆ преобразование предприятий в сервисно-ориентированные производственные системы, позволяющие гибко выстраивать процессы деятельности на динамической основе с использованием современных цифровых технологий – IoT, AI, Big Data и т.д.;
- ◆ спецификация сложной структуры продуктов с использованием моделей, методов и средств, позволяющих реализовывать концепцию полностью интегрированных производственных систем, адаптивных в режиме реального времени к изменяющимся требованиям и условиям внутри предприятия и во внешней среде;
- ◆ визуализация данных жизненного цикла продукта, необходимая для наглядного представления и восприятия информации о продукте участниками инновационных и производственных процессов;
- ◆ определение производственных возможностей, позволяющих оценить способность выполнения сформулированных требований к продукту на основе моделирования использования предоставляемых ресурсов на всех этапах жизненного цикла;

¹ Quality information framework: <https://qifstandards.org/>

♦ синтез и контекстуализация информации из традиционно несовместимых источников для обоснования принимаемых решений в оперативном управлении процессами создания продуктов на разных этапах жизненного цикла;

♦ извлечение и применение знаний для выполнения операций на основе гибридных интеллектуальных систем с целью анализа неструктурированной информации для обеспечения принятия решений и непрерывного совершенствования производственных систем.

Реализация перечисленных принципов во многом определяется способностью гибридных интеллектуальных систем, основанных на знаниях, осуществлять семантическое отображение концептуальной модели продукции и связанных процессов в многоуровневой онтологии инновационного процесса. В этой связи известна работа [11] по интеграции моделей создаваемой продукции в рамках реализации цифровой нити на основе онтологического подхода. В основном работа посвящена технологическим аспектам представления различных моделей в едином формате, обеспечивающий их семантический анализ. Для этого проводится преобразование SysML-моделей некоторого продукта в JSON-документы и их последующая конвертация в RDF-граф с использованием SysML-онтологии. При этом может осуществляться автоматическое формирование словаря модели и его сопоставление с имеющимися предметными онтологиями.

При необходимости в ходе последовательной обработки RDF-триплетов выявленные новые термины добавляются в существующую предметную онтологию. Затем в результате целого ряда преобразований и маппинга на предметные онтологии, выровненные с использованием референсной онтологии BFO, формируется уточненный RDF-граф, который затем используется в процессе принятия инновационных решений. Вместе с тем аспекты, связанные с многоагентной реализацией взаимодействия участников инновационного процесса на основе многоуровневой системы онтологий и соответствующей когнитивной интерпретацией результатов взаимодействия, в статье [11] не раскрываются.

В предлагаемом исследовании упор делается на разработку функциональной архитектуры системы, основанной на знаниях, поддерживающей итерационное динамическое принятие решений по конфигурации новой продукции и связанных процессов с участием всех заинтересованных сторон (stakeholders) в рамках сетевого предприятия. Основной акцент делается на начальные этапы создания продукции, включающие формирование требований и проектирование конструкции изделия и цепочки создания ценности, как системы связанных производственных и логистических процессов. При этом в качестве системообразующего компонента предлагается многоуровневая система онтологий инновационного процесса, обеспечивающая семантическую интероперабельность знаний о продукции и связанных процессах.



Рис. 1. Этапы проектирования инновационного процесса создания продукции

2. Постановка задачи разработки системы, основанной на знаниях, для проектирования инновационных процессов создания продукции

Процесс проектирования продукции и услуг в соответствии с классическими положениями системной инженерии включает следующие этапы [2] (рис. 1):

Формирование концепции продукта включает определение ценностных для потребителя характеристик (бизнес-требований) и их оценку с позиции маркетинговой привлекательности. В дальнейшем концепция продукта конкретизируется с точки зрения возможности технической реализации в виде набора функциональных и нефункциональных требований.

Проектирование конструкции продукта представляет собой определение структуры изделия с учетом анализа существующих достижений в области производства продукции и услуг, а также перспективных технологий, которые могут использоваться для создания продукта. Результатом данного этапа является компонентная структура изделия и определение перечня технологий для производства его компонентов.

Детальное проектирование процессов создания продукта предполагает выбор участников сетевого предприятия, которые будут поставлять или производить те или иные компоненты продукции в соответствии с заданными требованиями и техническим проектом. Таким образом, на этом этапе формируется цепочка создания ценности, определяющая распределение работ между участниками сетевого предприятия. На данном этапе большой объем работ связан с согласованием возможностей поставщиков и производителей создавать те или иные компоненты продукции в соответствии с проектными решениями и требованиями.

В силу возможных несоответствий ресурсных и иных способностей выбираемых предприятий проектным решениям и требованиям в процессе проектирования продуктов допустимы итерационные возвраты назад для пересмотра проектных решений и даже изменений в концепции продукта. Данное обстоятельство вызывает необходимость динамического ведения различных версий проекта в целях выбора наиболее эффективного варианта решений с учетом всех возможных ограничений (одновременного поддержания множества цифровых нитей).

Для обоснования проектных решений в существующих работах предлагается использовать инструментарий моделирования, который выбирается в зависимости от характера решаемой задачи. Например, для решения маркетинговых задач обоснования выбора потребительских качеств продукции это могут быть статистические модели оценки рынка, а для оценки производительности проектируемого изделия – имитационные модели. Для интеграции различных типов моделей предлагается использовать систему проектных репозиториев, объединенных единой системой идентификации объектов, связывающие все относящиеся к продукту артефакты на всех стадия жизненного цикла. В работе [12] предлагается архитектура такой системы управления жизненным циклом продукции (System Lifecycle Handler, SLH), которая представлена на рисунке 2.

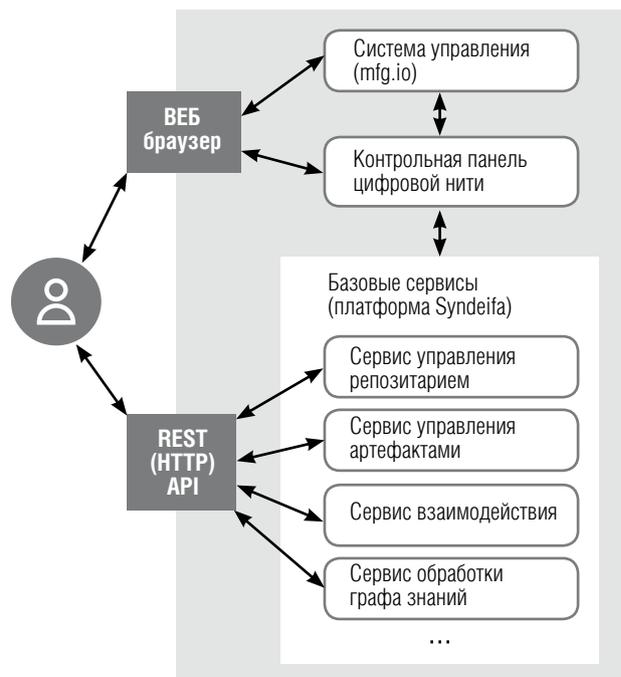


Рис. 2. Концептуальная архитектура системы управления жизненным циклом продукции [12]

Основным элементом этой системы является система управления, которая позволяет осуществлять глобальную идентификацию для любого артефакта в цифровом потоке, связанном с проектом изделия, а также осуществлять поиск связанных артефактов с использованием системы дескрипторов метаданных таких, как (а) имя артефакта, (б) тип артефакта и схема, (в) автор артефакта, (г) местоположение артефакта и (д) другие атрибуты. С помощью веб-

панели (дэшборда) цифрового потока предоставляется возможность просматривать, запрашивать и визуализировать цифровой поток или любой из его подграфов на любой стадии жизненного цикла. Система сервисов обеспечивает следующие возможности:

- ◆ подключение к корпоративным хранилищам данных (репозиториям), таким как системы PLM, системы сигнализации, системы управления требованиями, базы данных и средства моделирования среды;
- ◆ поиск отдельных артефактов;
- ◆ связывание артефактов из различных репозиторий и осуществление преобразования из одной формы в другую;
- ◆ синхронизация изменений в различных репозиториях;
- ◆ графическое отображение состояния артефактов с помощью различных средств визуализации.

Таким образом, представленная архитектура системы SLH в основном реализует функции интегрированной системы управления знаниями, позволяющей поддерживать непротиворечивую информацию о ходе процесса создания и последующей эксплуатации изделия. В отличие от описанной системы управления жизненным циклом изде-

лия, предлагается разработать систему, основанную на знаниях (СОЗ), которая позволяла бы наряду с отмеченными компонентами осуществлять:

- ◆ настройку механизмов решения задачи построения инновационных процессов на особенности предметной области;
- ◆ интеграцию источников знаний об изделиях и связанных процессов на основе единой концептуальной модели предметной области;
- ◆ оценивание перспективности применения конструктивных свойств и требований к изделиям, применяемых компонентов и технологий;
- ◆ проектирование цепочек создания ценности с отбором участников инновационного процесса, обладающих наилучшими возможностями;
- ◆ согласование параметров изготавливаемых продуктов со всеми заинтересованными участниками инновационного процесса.

В соответствии с этими требованиями предлагается архитектура СОЗ проектирования инновационных процессов создания продуктов (рисунк 3). В ней центральным компонентом является онтология инновационного процесса, более глубоко отражающая семантическую концептуальную модель предметной области, на основе которой реализуются все перечисленные выше требования.

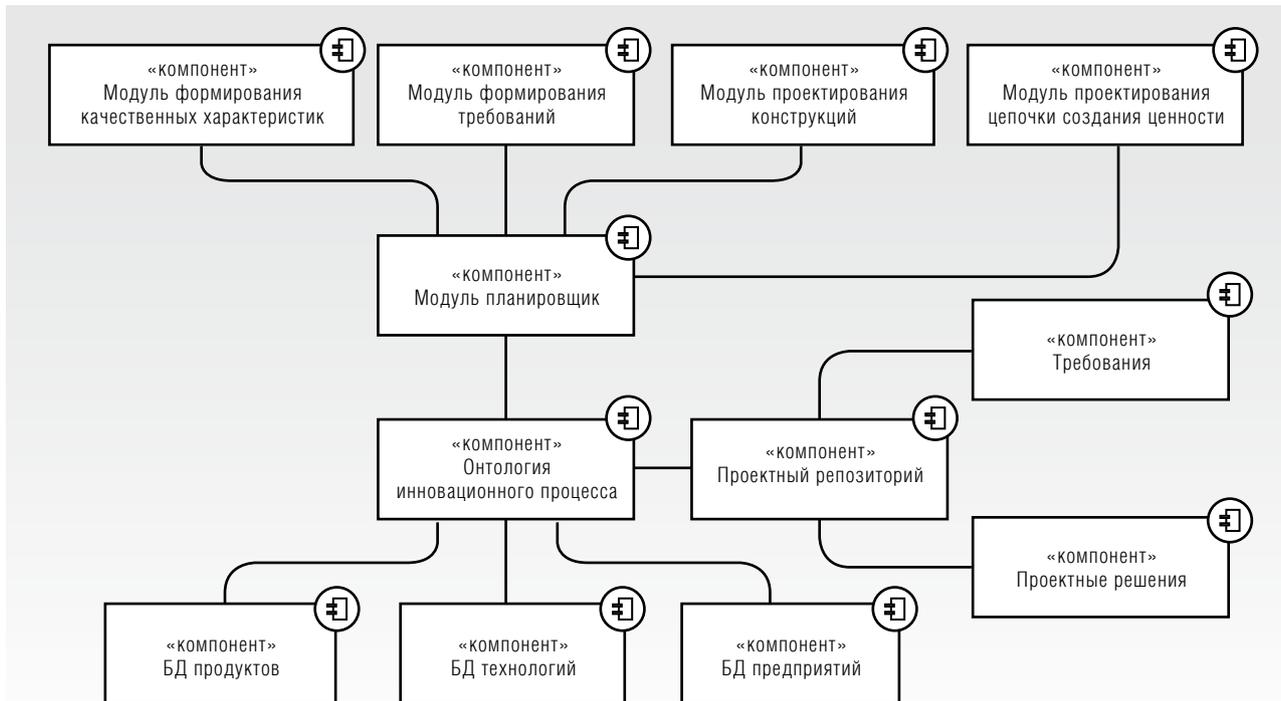


Рис. 3. Архитектура СОЗ проектирования инновационных процессов создания продукции

Основные функциональные компоненты соответствуют этапам инновационного процесса создания продуктов. В каждом из них присутствуют модули отбора по соответствующим базам данных релевантных артефактов, их ранжирования по степени важности и оценивания с позиции ресурсных возможностей реализации. Проектные решения сохраняются в репозитории по различным версиям проекта с позиции возможности динамического построения и оценки различных вариантов инновационных процессов и выбора наилучшего варианта в каждый момент времени.

Далее рассмотрим особенности реализации функциональных модулей СОЗ проектирования инновационных процессов создания продуктов с позиции формирования проектных решений на основе использования онтологий и баз данных артефактов. Механизмы ранжирования проектных решений на основе применения методов QFD и FMEA рассматривались ранее в работе [9], а оценки соответствия ресурсных возможностей ценностным характеристикам и функциональным требованиям на основе применения методов нечеткой логики – в статье [13].

3. Структура базы знаний СОЗ проектирования инновационных процессов создания продукции

В архитектуре СОЗ особое место занимает система онтологий [14], описывающая структуру инновационного процесса создания продукции на сетевом предприятии и требования к его организации, характерные для различных предметных областей.

Такая система обеспечивает интеграцию баз данных сетевого предприятия в единую распределенную базу знаний.

Предлагается следующий состав онтологий, который обеспечит совместное использование СОЗ всеми участниками инновационного процесса сетевого предприятия (рисунк 4).

В частности, в состав системы онтологий входят следующие элементы:

- ◆ **метаонтология** или язык описания, с помощью которого описываются все прочие онтологии;
- ◆ **референсная онтология верхнего уровня**, которая содержит ключевые понятия, например, *Объект, Событие, Пространство, Индивидуальное качество, Временные рамки*, и задает подход к описанию онтологий предметных областей. Эта онтология служит для выравнивания и совместного использования различных онтологий нижних уровней;
- ◆ **референсная онтология среднего уровня**, связанная с областью настоящего исследования – организацией деятельности и выпуском продукции сетевых предприятий;
- ◆ разделяемые участниками цепочки создания ценности **онтологии предметной области**, связанные с производством некоторого вида продукции, которые могут использоваться предприятиями соответствующих отраслей и включаться в их базу знаний (отсылают к референсной онтологии и содержат классификации продуктов, компонент, типовые требования и процессы и т.п.);

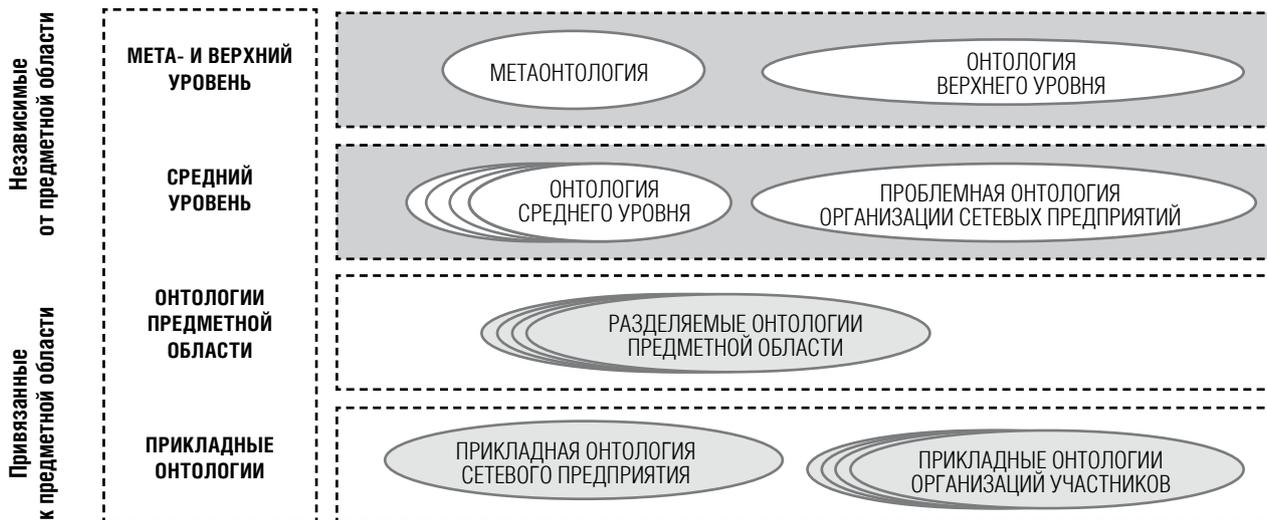


Рис. 4. Многоуровневая система онтологий СОЗ

♦ **прикладная онтология сетевого предприятия**, расширенная от онтологий верхних и средних уровней, которая является частью базы знаний сетевого предприятия и включает модели производимых продуктов и оказываемых услуг, производственных цепочек и взаимодействия организации;

♦ **прикладные онтологии участников цепочки создания ценности**, расширенные от онтологий верхних и средних уровней, которые являются частью баз знаний соответствующих организаций и используются для описания используемых методов и практик, сведений о деятельности, производимой продукции и контрактах организации.

Разнородные данные, представленные организациями, могут быть интегрированы и конвертированы в стандартизованный формат описания (в виде RDF-графа) и выровнены в соответствии с используемыми онтологиями. Выравнивание является обязательным условием для выполнения запросов (на языке SPARQL или любом другом стандартизованном языке) к объединенной базе знаний для контроля целостности и реализации функций основных модулей.

Процесс онтологического выравнивания предполагает установление соответствий между используемыми понятиями, входящими в прикладные онтологии, и с точки зрения компьютерных наук обусловлен необходимостью интеграции гетерогенных баз данных, разработанных независимо друг от друга и использующих собственные словари. Для облегчения этого процесса используются референсные онтологии (верхнего уровня, среднего уровня и предметные).

Язык, используемый для формализации онтологий, определяет **метаонтологию**. В рамках проекта Semantic Web или для обеспечения семантической интероперабельности сложных систем, взаимодействующих через сеть интернет, в качестве такого языка часто используется OWL – язык, разработанный консорциумом World Wide Web [15]. Также применяются языки, основанные на логике первого порядка, используемые для обмена знаниями в компьютерных системах [16, 17].

В случае использования базы знаний, представленной в виде RDF-графа, метаонтология OWL может описываться на основе базовой схемы RDF [18] и включать встроенные классы и свойства, которые в совокупности составляют основу синтаксиса RDF/XML OWL 2.

Децентрализация сетевого предприятия и необходимость совместного использования баз знаний различных организаций предполагает выравнивание и интеграцию прикладных онтологий. Для этих целей применяются **референсные онтологии верхних уровней** и **референсные онтологии предметных областей** [19].

Среди известных **референсных онтологий верхнего уровня** можно выделить онтологию BFO, которую использует свыше 100 проектов [20], проекты GFO [21], DOLCE [22], SUMO². Среди **референсных предметных онтологий** интерес для организации инновационного процесса сетевого предприятия представляют продуктовые онтологии, например, eClassOWL, GoodRelations и производные [23], таксономия Google³, которые используются для описания более 30 тысяч типов продукции, узлов и компонент, а также таксономии процессов и активностей [24].

Для организации взаимодействия и подбора участников сетевого предприятия в едином информационном пространстве предлагается использование референсной онтологии инновационного процесса, ключевые понятия которой представлены в статье [9].

Пример системы связанных онтологий CO3 проектирования инновационных процессов представлен на *рисунке 5*. Полученный набор связанных данных и онтологий представляет собой распределенную базу знаний CO3. Она может использоваться для обеспечения взаимодействия организаций, входящих в структуру сетевого предприятия, на различных уровнях – как для описания качественных характеристик, так и при проектировании производственной системы, организации цепочки создания ценности, инновационного процесса.

4. Организация взаимодействия участников цепочки создания ценности сетевого предприятия

Использование распределенной базы знаний в процессе проектирования цепочки создания ценности и структуры сетевого предприятия осуществляется в рамках пяти основных модулей:

- ♦ модуль планирования (координатор);
- ♦ модуль формирования качественных характеристик продукта;
- ♦ модуль формирования требований к продукту;

² Suggested Upper Merged Ontology (SUMO): <http://www.ontologyportal.org/>

³ Google Product Taxonomy: <https://www.google.com/basepages/producttype/taxonomy.en-US.txt>

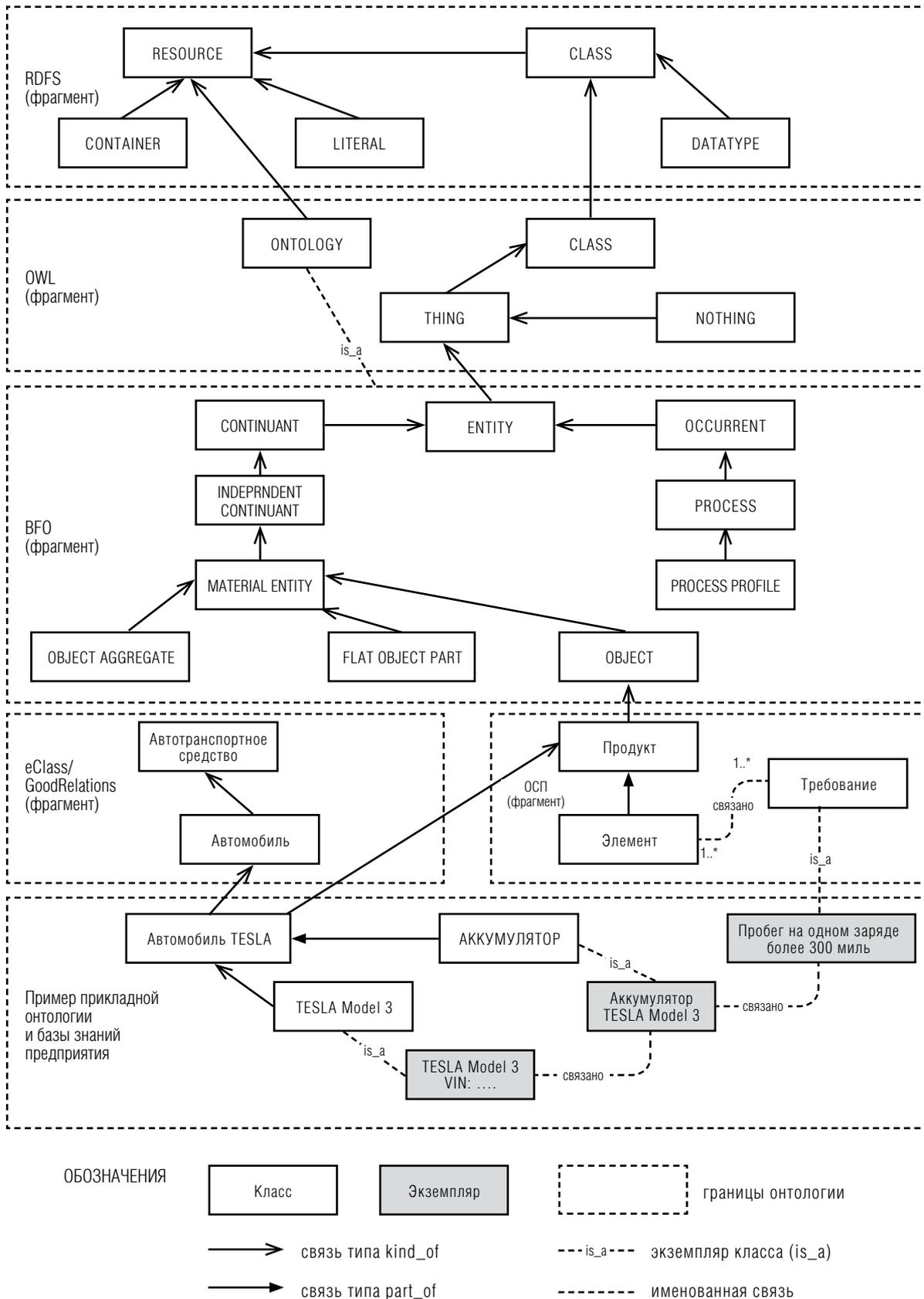


Рис. 5. Пример системы связанных онтологий CO2 проектирования инновационных процессов

- ◆ модуль проектирования конструкции продукта;
- ◆ модуль проектирования цепочки создания ценности.

Модуль планирования получает сведения о виде проектируемого *Продукта*, определяет порядок и осуществляет вызов соответствующих модулей, производит анализ полученных результатов и инициирует уточнение недостающих сведений. Для обоснования выбора качественных характеристик и требований к *Продукту*, а также вариантов конструкции продукции и цепочек создания ценности используется подход на основе сочетания методов QFD и нечеткой логики [9, 25].

Модуль формирования качественных характеристик продукта используется на этапе формирования концепции *Продукта* для выявления и формализации *Качественных характеристик* (рисунок 6), через которые определяется ценность *Продукта* для потребителя.

В референсной онтологии определены общие понятия *Продукт* и *Характеристика*, а также определены виды характеристик в соответствии с методом Кано [26]. В разделяемых онтологиях добавляются

виды *Продуктов*, характерные для некоторой предметной области. В базе знаний организации хранятся описания типовых характеристик разного вида для различных типов продуктов. Эти знания накапливаются в ходе исследований потребительских предпочтений и могут использоваться при определении характеристик нового продукта, так что:

- ◆ выбирается тип *Продукта*, соответствующий заданному;
- ◆ формируется набор характеристик *Продукта* разных типов из базы знаний, свойственный данному типу *Продукта*;
- ◆ все *Обязательные характеристики* будут связаны с новым *Продуктом*;
- ◆ оцениваются и включаются в набор *Ожидаемые* и *Привлекательные характеристики*;
- ◆ минимизируется наличие *Невлияющих*, *Противоречивых* и *Отвращающих характеристик*.

Полученные характеристики возвращаются в **модуль планирования**, отбираются и передаются далее для формирования набора требований.

Для каждой обязательной или ожидаемой характеристики должно быть сформулировано как ми-

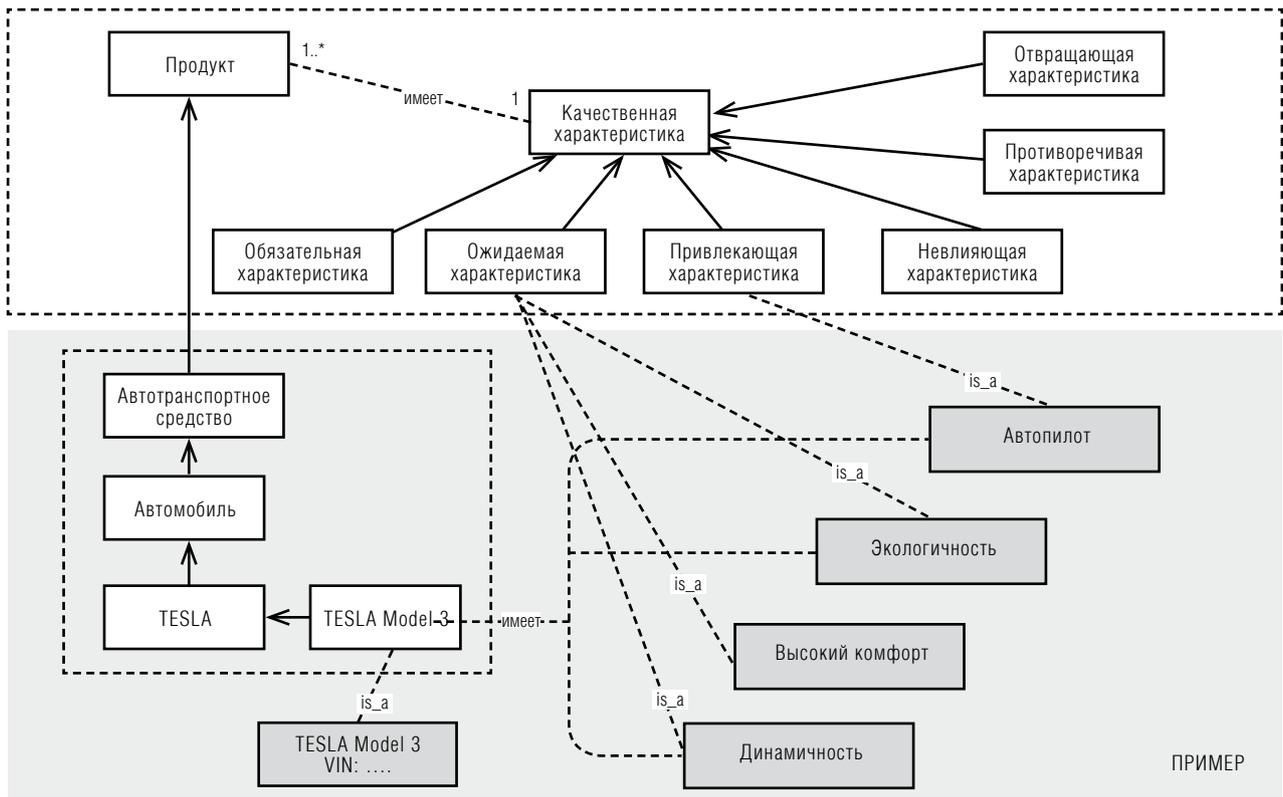


Рис. 6. Фрагмент референсной онтологии: пример описания качественных характеристик продукта

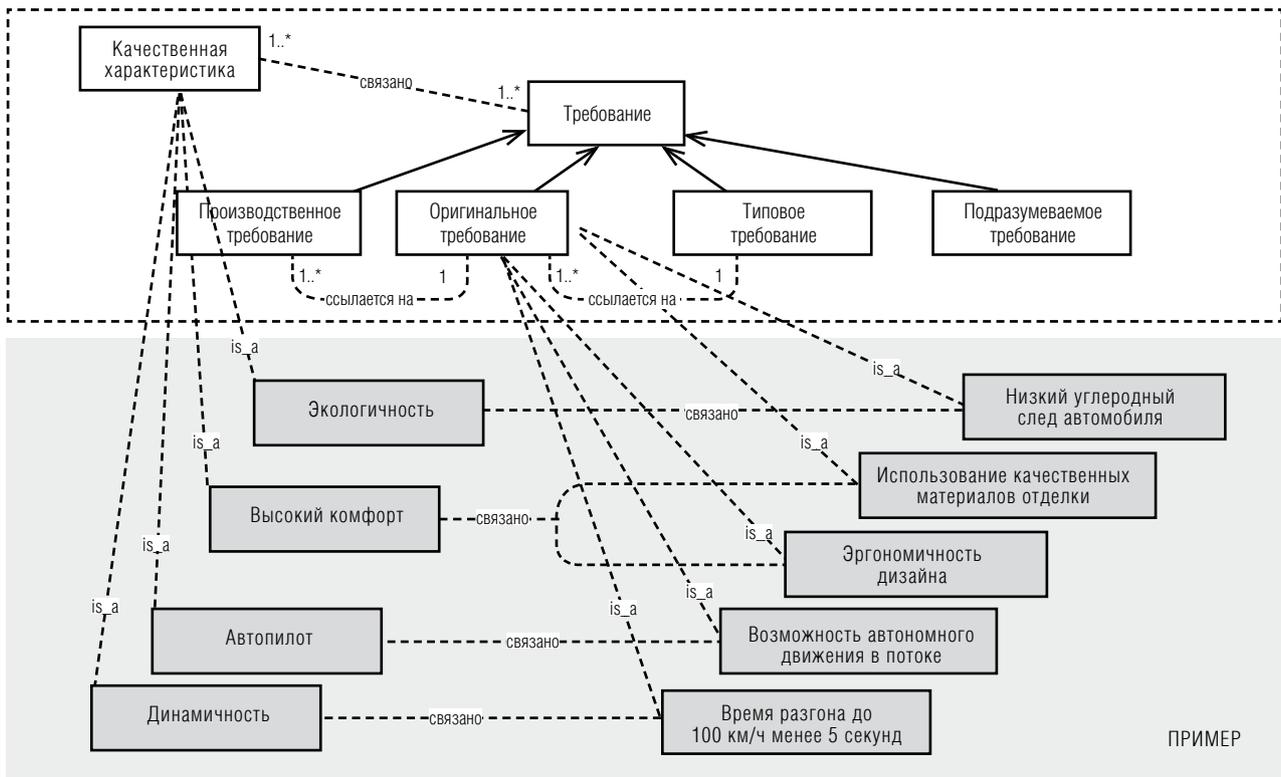


Рис. 7. Фрагмент референсной онтологии: пример описания требований к продукту

нимум одно связанное требование. Формализация требований производится с использованием **модуля формирования требований к продукту**. В рамках этого модуля качественные Характеристики конкретизируются в части функциональных и нефункциональных *Требований к Продукту*, обеспечивающих реализацию этих *Характеристик* [27] (рисунок 7).

Онтология среднего уровня, включает описание понятия *Требование* и его связей с другими понятиями (например, *Характеристика*, *Функция*, *Элемент продукта*). В базах знаний организаций могут храниться *Типовые требования*, характерные для определенных категорий *Продуктов*.

При формировании новых *Требований к Продукту* определяются *Оригинальные требования*. На основе *Типовых требований* обычно создается *Оригинальное требование*, которое ссылается на *Типовое(ые) требования* (например, «учитывать требования ГОСТ Р ИСО 12003»). Некоторые *Подразумеваемые требования* могут выделяться на основе предыдущего опыта из базы знаний организации.

Для проведения дальнейшего анализа необходимо максимально уточнить формулировки требований, в том числе за счет разделения комплексных

Оригинальных требований и выделения из их состава *Производных требований*.

Полученный набор требований возвращается в **модуль планирования**. Для определения характеристик требований применяется нечеткое оценивание. Приоритет характеристики при этом зависит от ее вида: для обязательных, ожидаемых и привлекающих характеристик он равен единице, для отвращающих – нулю, а для невливающих и противоречивых характеристик применяется нечеткая шкала коэффициента уверенности [0; 1].

В результате оценки полученного набора требований **модуль планирования** вызывает следующий модуль или обращается для уточнения к предыдущему.

В рамках **модуля проектирования конструкции продукта** проходит формализация компонентного состава, выделяются конструктивные *Элементы продукта* и его *Функции*.

Требование может быть связано с некоторым *Элементом* или *Функцией продукта* явно или косвенно, через выбор способа производства, технологии, используемых источников информации/знаний, нормативов и инструментов. Таким образом конструкция определяется через *Требования* (рисунок 8).

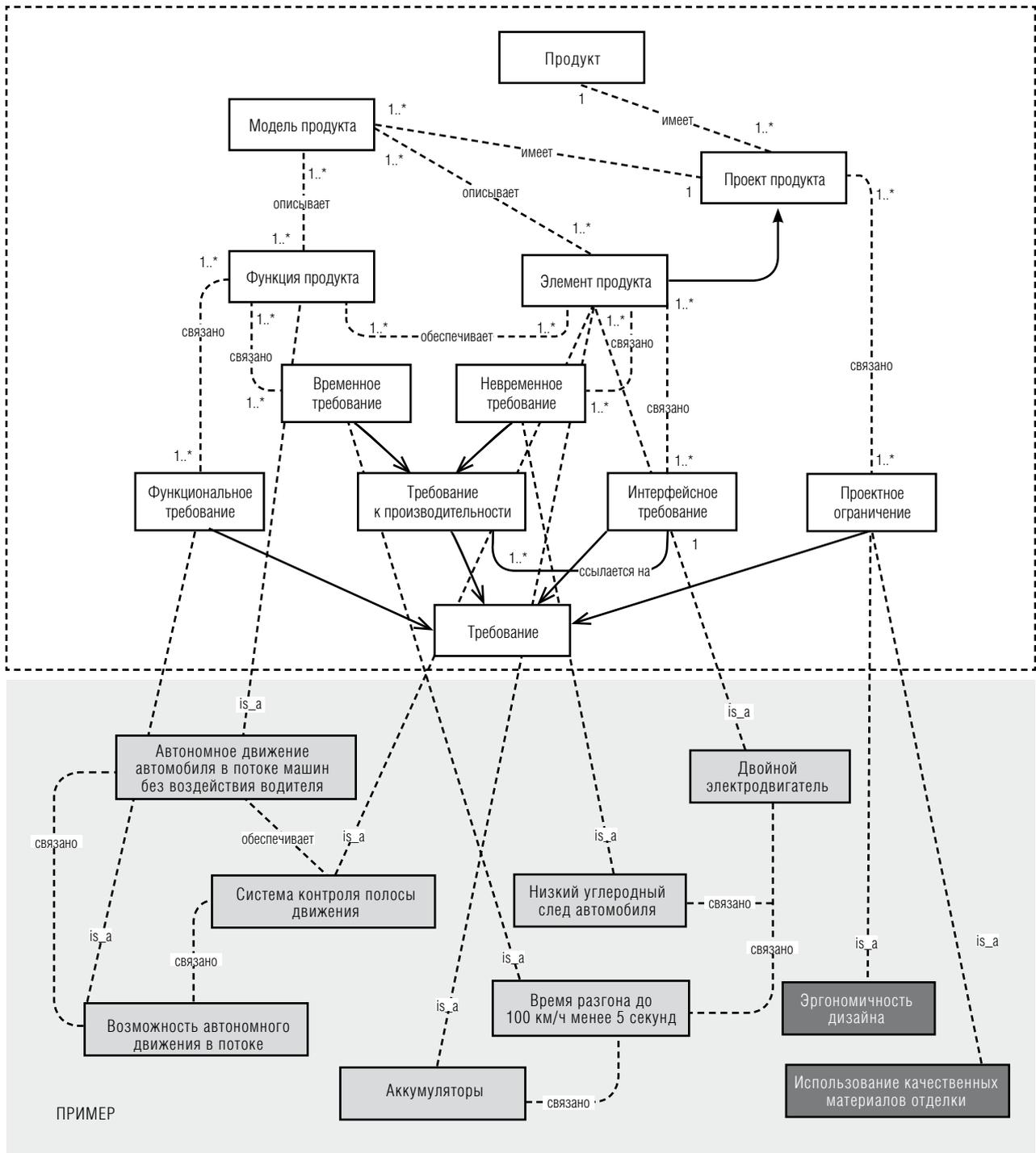


Рис. 8. Фрагмент референсной онтологии: пример описания проекта продукта

Конструктивные *Элементы* могут включаться в структуру *Продукта* для обеспечения некоторых функций, обязательных интерфейсных требований или в результате наследования от типового *Проекта продукта*, имеющего разворачивающуюся структуру продукта (PBS), которая ссылается

на продуктовые онтологии, имеющиеся в базе знаний.

На основе типовых решений формируются вариант (версия) продукта или *Проект продукта*, в котором объединяются множество видов конструктивных *Элементов* и выполняемых продуктом *Функций*.

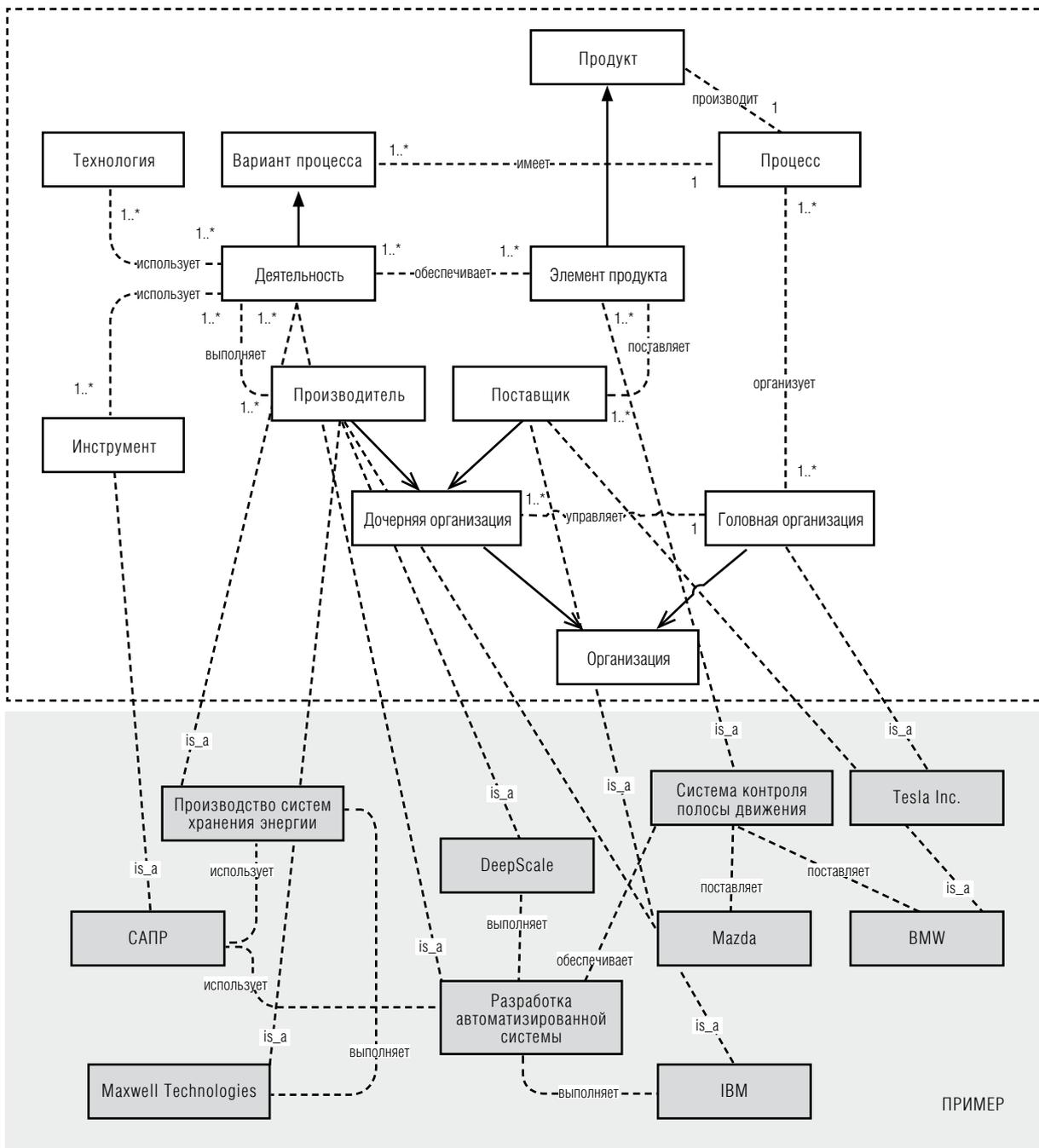


Рис. 9. Фрагмент референсной онтологии верхнего уровня: пример описания участников цепочки создания ценности

Каждый *Проект* отражается на структурных *Моделях* (состав конструктивных элементов, узлов или деталей, структурные и натурные) и функциональных *Моделях* (сценарии работы продукта, имитационные модели), с помощью которых подтверждается соответствие исходным *Требованиям*.

Выбор *Проекта* продукта (версии проекта) осуществляется **модулем планирования** на основе

применения сочетания методов QFD и нечеткой логики. Оценка суммарной важности *Элементов*, входящих в *Проект* продукта, позволяет ранжировать варианты. Однако определяющим фактором является наличие возможности приобретения выбранных типов конструктивных элементов и/или оценка способности их производства в соответствии с имеющимися *Моделями*.

Для оценки такой возможности **модуль планирования вызывает модуль проектирования цепочки создания ценности**, с помощью которого в том числе проводится анализ рынка и подбор участников инновационного *Процесса*, имеющего несколько *Вариантов*. Для выбора *Варианта* процесса производства *Продукта* необходимо организовать взаимодействие между различными *Предприятиями*, основываясь на их компетенциях, формализованных и опубликованных в открытых источниках (рисунок 9). *Процесс* согласования требований и возможностей предприятий осуществляется с использованием многоагентной технологии [28].

В реестре *Предприятий* осуществляется поиск *Поставщиков* конструктивных элементов или сырья, представленных в некотором варианте *Проекта* продукта. Для каждого *Поставщика* оценивается возможность поставки некоторой категории *Элементов*. В качестве исходных требований *Поставщику* направляется описание *Элемента*, формализованное через ссылки на продуктовую онтологию и существующие структурные и функциональные *Модели*, описывающие *Элемент* и его назначение, а также проектные *Требования*.

Отсутствие конструктивных *Элементов* у *Поставщиков*, связанных с обязательными *Требованиями*, может привести к одному из следующих организационных сценариев, инициируемых **модулем планирования**:

- ◆ завершение работ, обусловленное отсутствием необходимых для создания продукции *Элементов* продукта;
- ◆ пересмотр концепции *Продукта* с целью уточнения характеристик и требований;
- ◆ выбор другого варианта *Проекта* продукта согласно рангу;
- ◆ выбор варианта производства *Элемента* на заказ с применением необходимых технологий и инструментов.

Для того чтобы выявить *Предприятия*, способные произвести на заказ *Элементы* согласно *Проекту* продукта, формируются *Варианты* процесса. Эти предприятия могут выполнять работы по производству *Элементов*, а также работы по проектированию, сборке, обработке, наладке, обслуживанию и поставке продукции. Состав и связи видов *Деятельности* содержатся в предметной онтологии. Для каждого такого вида *Деятельности* определяются возможные *Инструменты* и *Технологии*, обеспечивающие производство конструктивных *Эле-*

ментов с заданными *Проектными ограничениями* и соответствующих установленным *Требованиям*.

Оценка *Вариантов* процесса осуществляется **модулем планирования** аналогично оценке *Проектов* продукта на основе методов QFD и нечеткой логики. Оценка суммарной важности всех видов *Деятельности* по методу QFD позволяет ранжировать *Варианты цепочки процесса* и выполнить отбор *Производителей* с учетом требований к их компетенции (способности выполнять *Деятельность*, владение *Инструментами* и *Технологиями*). Алгоритм оценки отклонений *Требований* от возможностей *Предприятия*, основанный на нечеткой логике, рассмотрен в статье [13], при этом определяется возможность выполнения *Деятельности* собственными силами или ее передача на аутсорсинг.

Поиск *Производителей* осуществляется методом сравнения описания вида *Деятельности* и соответствующих *Инструментов* и *Технологий* с фактами, представленными в базах данных предприятий. Если среди представленных *Предприятий* нет полностью соответствующих заданным условиям, то осуществляется переход к другим *Вариантам* процесса согласно ранее определенному рангу.

Вариант процесса с перечнем *Деятельностей*, которые необходимо выполнить для формирования итогового *Проекта продукта*, сохраняется **модулем планирования** в базе знаний сетевого предприятия и используется на стадии производства для координации работ, а также при разработке новых видов продукции.

Заключение

В результате проведенного исследования методов проектирования инновационных процессов создания продукции сетевого предприятия и их реализации в системах, основанных на знаниях, можно сделать следующие выводы:

- ◆ в рамках инновационного процесса наиболее предпочтительным является подход к построению предприятий на основе моделей (Model Based Enterprise, МВЕ), наилучшим образом реализующий концепцию «цифровой нити»;
- ◆ для организации «цифровой нити» в рамках предлагаемой системы, основанной на знаниях, для проектирования инновационных процессов создания продукции необходимо использовать распределенную базу знаний и многоуровневую систему онтологий, в которой отображаются как

типовые структуры продуктов и цепочек создания ценности, так и накопленный опыт производства и способности предприятий;

♦ для организации функционирования СОЗ в структуре системы должны быть выделены модули формирования качественных характеристик продукта, формирования требований к продукту, проектирования конструкции продукта и цепочек создания ценностей (процесса его производства), а также планирующего модуля;

♦ в рамках проектирования структуры инновационного процесса сетевого предприятия целесообразно применять комбинацию различных методов (QFD и нечеткой логики), обеспечивающих наилучший выбор конструкции продукта, цепочек создания ценности и состава предприятий – участников цепочки создания ценности.

Новизна предложенной архитектуры системы, основанной на знаниях, для проектирования инновационного процесса заключается в возможной итерационности этого процесса, позволяющей находить наилучшие проектные решения как для

конструкции продукта, так и для цепочки создания ценности. Кроме того, в результате реализации данной архитектуры улучшится семантическая интероперабельность участников инновационного процесса, а, следовательно, и качество создаваемой инновационной продукции.

В рамках дальнейшего развития предложенных методов и подходов к разработке СОЗ организации инновационного процесса создания продукции целесообразно развитие алгоритмов отдельных модулей системы, методов и средств интеграции онтологий, включенных в распределенную базу знаний, методов многоагентного взаимодействия участников сетевого предприятия, позволяющих динамически адаптировать структуру инновационного процесса сетевого предприятия к требованиям, изменяющимся на всех этапах жизненного цикла продукта. ■

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты №№ 19-07-01137а, 18-07-01053а, 18-07-00918а.

Литература

1. Наместников А.М. Интеллектуальные проектные репозитории. Ульяновск: УлГТУ, 2009.
2. Foundational concepts for model driven system design. White paper / L. Baker [et al]. INCOSE Model Driven System Design Interest Group, International Council on Systems Engineering, 2000.
3. Frechette S.P. Model based enterprise for manufacturing. Manufacturing Systems Integration Division, Engineering Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 2010.
4. Минаев В.А., Мазин А.В., Здирук К.Б., Куликов Л.С. Цифровые двойники объектов в решении задач управления // Радиопромышленность. 2019. Т. 29. № 3. С. 68–78. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-68-78
5. Global Horizons. Final Report: United States Air Force Global Science and Technology Vision – AF/ST TR 13-01. 21 June 2013 [Электронный ресурс]: https://www.airforcemag.com/PDF/DocumentFile/Documents/2013/GlobalHorizons_062313.pdf (дата обращения 01.03.2020).
6. Digital thread for smart manufacturing / NIST, 2020 [Электронный ресурс] <https://www.nist.gov/programs-projects/digital-thread-smart-manufacturing> (дата обращения 20.06.2020).
7. Uschold M., King M., Moralee S., Zorgios Y. The enterprise ontology // The Knowledge Engineer Review. 1998. Vol. 13. No 1. P. 31–89. DOI: 10.1017/S0269888998001088.
8. Dietz J.L.G. Enterprise ontology: Theory and methodology. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. DOI: 10.1007/3-540-33149-2.
9. Построение структуры сетевого предприятия для создания инновационных продуктов / Ю.Ф. Тельнов и [др.] // Открытое образование. 2019. Т. 23. № 6. С. 59–73. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-6-59-73.
10. Model-based enterprise program / NIST, 2020 [Электронный ресурс] <https://www.nist.gov/programs-projects/model-based-enterprise-program> (дата обращения 20.06.2020).
11. Toward an interoperability and integration framework to enable digital thread / M. Bone [et al.] // Systems. 2018. Vol. 46. No 6. [Электронный ресурс]: <https://www.mdpi.com/2079-8954/6/4/46> (дата обращения 01.03.2020). DOI: 10.3390/systems6040046.
12. Bajaj M., Hedberg T. System lifecycle handler – Spinning a digital thread for manufacturing // 28th Annual INCOSE International Symposium. Washington, DC, 7–12 July 2018. P. 1626–1650. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2018.00573.x.
13. Калачихин П.А., Тельнов Ю.Ф. Формирование цепочек создания ценностей в сетевых структурах взаимодействия на основе интеллектуальных технологий // Сб. трудов XVI Национальной научной конференции по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ 2018), г. Москва, 24–27 сентября 2018 г. В 2-х томах. Т. 1. С. 106–115.
14. Rudnicki R., Smith B., Malyuta T., Mandrick W. Best practices of ontology development. White paper. 25 October 2016 [Электронный ресурс]: https://www.nist.gov/system/files/documents/2019/05/30/nist-ai-rfi-cubrc_inc_002.pdf (дата обращения 01.03.2020).

15. OWL 2 Web Ontology Language document overview (Second edition) / W3C, 2012 [Электронный ресурс]: <http://www.w3.org/TR/owl2-overview/> (дата обращения 01.03.2020).
16. Pease A. Standard Upper Ontology Knowledge Interchange Format (SUO-KIF). 2009 [Электронный ресурс]: <https://github.com/ontologyportal/sigmakee/blob/master/suo-kif.pdf> (дата обращения 01.03.2020).
17. ISO/IEC 24707:2018. Information technology – Common Logic (CL) – A framework for a family of logic-based languages / ISO, 2018 [Электронный ресурс]: <https://www.iso.org/standard/66249.html> (дата обращения 01.03.2020).
18. The RDF Schema vocabulary (RDFS) / W3C, 2014 [Электронный ресурс]: <https://www.w3.org/TR/rdf-schema/> (дата обращения 01.03.2020).
19. A framework for using reference ontologies as a foundation for the semantic web / J.F. Brinkley [et al.] // AMIA Annual Symposium Proceedings. 2006. P. 96–100. [Электронный ресурс]: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1839690/> (дата обращения 01.03.2020).
20. Smith B. Basic Formal Ontology 2.0. Specification and user's guide. 2015. [Электронный ресурс]: <https://raw.githubusercontent.com/BFO-ontology/BFO/v2.0/BFO2-Reference.docx> (дата обращения: 01.03.2020).
21. General Formal Ontology (GFO) – A foundational ontology integrating objects and processes / H. Herre [et al.]. Report Nr. 8. OntoMed, IMISE, 2006.
22. Borgo S., Masolo C. Ontological foundations of DOLCE / R. Poli, M. Healy, A. Kameas (eds) Theory and applications of ontology: Computer applications. Dordrecht: Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-90-481-8847-5_13.
23. Hepp M., Radinger A. eClassOWL – The web ontology for products and services. 2010 [Электронный ресурс]: <http://www.heppnetz.de/projects/eclassowl/> (дата обращения 01.03.2020).
24. Общий классификатор процессов для различных отраслей. Версия 7.0.5 / APQC, 2016 [Электронный ресурс]: https://www.apqc.org/system/files/K08175_Cross_Industry_v7.0.5_russian.pdf (дата обращения 01.03.2020).
25. Вашуков Ю.А., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А. QFD: Разработка продукции и технологических процессов на основе требований и ожиданий потребителей: Методические указания. Самара: СГАУ, 2012.
26. Kano N., Seraku N., Takahashi F., Tsuji S. Attractive quality and must-be quality // Journal of Japanese Society for Quality Control. 1984. Vol. 14. No. 2. P. 39–48.
27. Oliver D.W., Kelliher T.P., Keegan J.G., Jr. Engineering complex systems with models and objects. McGraw-Hill, 1997.
28. Разработка прототипа многоагентной системы сетевого взаимодействия учебных заведений / Ю.Ф. Тельнов и [др.] // Открытое образование. 2018. Т. 22. № 6. С. 14–26. DOI: 10.21686/1818-4243-2018-6-14-26.

Об авторах

Тельнов Юрий Филиппович

доктор экономических наук, профессор;
заведующий кафедрой прикладной информатики и информационной безопасности,
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,
117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;
E-mail: Telnov.YUF@rea.ru
ORCID: 0000-0002-2983-8232

Казаков Василий Александрович

кандидат экономических наук;
ведущий научный сотрудник НИИ «Стратегические информационные технологии»,
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,
117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;
E-mail: Kazakov.VA@rea.ru
ORCID: 0000-0001-8939-2087

Трембач Василий Михайлович

кандидат технических наук, доцент;
доцент кафедры 304, Московский авиационный институт,
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4;
E-mail: trembach@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-7499-4368

Developing a knowledge-based system for the design of innovative product creation processes for network enterprises

Yury F. Telnov^a

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

Vasiliy A. Kazakov^a

E-mail: Kazakov.VA@rea.ru

Vasiliy M. Trembach^b

E-mail: trembach@yandex.ru

^a Plekhanov Russian University of Economics
Address: 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia

^b Moscow Aviation Institute (National Research University)
Address: 4, Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia

Abstract

The relevance of developing knowledge-based systems used to support innovative processes for creating products and services is related to the objective need to reduce the life cycle of products under the influence of modern digital technologies in developing network enterprises. Well-known research results in the field of model-oriented design of products, processes, systems and enterprises do not fully provide semantic interoperability in the interaction of stakeholders in the innovation process. The aim of this work is to build a knowledge-based system architecture that implements semantic interoperability of network enterprise participants at various stages of the product lifecycle. The work is based on the use of a model-oriented approach to building a digital thread at all stages of the product lifecycle, an ontological approach to semantic modeling of a distributed knowledge base and a multi-agent approach to organizing interaction between interested participants in the innovation process. The paper proposes a functional architecture of a knowledge-based system that includes modules for planning the innovation process, forming product value characteristics and functional requirements, construction and value chain design. A multi-level system of ontologies of the innovation process is also developed and its application in the work of functional modules that provide access to associated knowledge bases is described. The development of knowledge-based systems based on the results obtained will allow us to find the best design solutions for the configuration of products and corresponding value chains due to the possible iteration of the innovation process and increasing the semantic interoperability of network enterprise stakeholders.

Key words: innovative process; digital thread; model-oriented approach; knowledge-based system; ontology of innovative process; stakeholders of network enterprise; value chain; multi-agent interaction; semantic interoperability.

Citation: Telnov Yu.F., Kazakov V.A., Trembach V.M. (2020) Developing a knowledge-based system for the design of innovative product creation processes for network enterprises. *Business Informatics*, vol. 14, no 3, pp. 35–53.
DOI: 10.17323/2587-814X.2020.3.35.53

References

1. Namestnikov A.M. (2009) *Smart project repositories*. Ulyanovsk: USTU (in Russian).
2. Baker L., Clemente P., Cohen R., Permenter L., Purves B., Salmon P. (2000) *Foundational concepts for model driven system design*. White paper. INCOSE Model Driven System Design Interest Group, International Council on Systems Engineering.
3. Frechette S.P. (2010) *Model based enterprise for manufacturing*. Manufacturing Systems Integration Division, Engineering Laboratory, National Institute of Standards and Technology.
4. Minaev V.A., Mazin A.V., Zdiruk K.B., Kulikov L.S. (2019) Digital twins of objects in the solution of control problems. *Radio Industry (Russia)*, vol. 29, no 3, pp. 68–78 (in Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-68-78
5. United States Air Force (2013) *Global Horizons. Final Report: United States Air Force Global Science and Technology Vision – AF/ST TR 13-01. 21 June 2013*. Available at: https://www.airforcemag.com/PDF/DocumentFile/Documents/2013/GlobalHorizons_062313.pdf (accessed 01 March 2020).
6. NIST (2020) *Digital thread for smart manufacturing*. Available at: <https://www.nist.gov/programs-projects/digital-thread-smart-manufacturing> (accessed 20 June 2020).

7. Uschold M., King M., Moralee S., Zorgios Y. (1998) The enterprise ontology. *The Knowledge Engineer Review*, vol. 13, no 1, pp. 31–89. DOI: 10.1017/S0269888998001088.
8. Dietz J.L.G. (2006) *Enterprise ontology: Theory and methodology*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. DOI: 10.1007/3-540-33149-2.
9. Telnov Yu.F., Trembach V.M., Danilov A.V., Yaroshenko E.V., Kazakov V.A., Kozlova O.A. (2019) Constructing network enterprise structure to create innovative products. *Open Education*, vol. 23, no 6, pp. 59–73 (in Russian). DOI: 10.21686/1818-4243-2019-6-59-73.
10. NIST (2020) *Model-based enterprise program*. Available at: <https://www.nist.gov/programs-projects/model-based-enterprise-program> (accessed 20 June 2020).
11. Bone M., Blackburn M., Kruse B., Dzielski J., Hagedorn T., Grosse I. (2018) Toward an interoperability and integration framework to enable digital thread. *Systems*, vol. 46, no 6. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-8954/6/4/46> (accessed 01 March 2020). DOI: 10.3390/systems6040046.
12. Bajaj M., Hedberg T. (2018) System lifecycle handler – Spinning a digital thread for manufacturing. Proceedings of the *28th Annual INCOSE International Symposium, Washington, DC, 7–12 July 2018*, pp. 1626–1650. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2018.00573.x.
13. Kalachihin P.A., Telnov Yu.F. (2018) Formation of value chains in network interaction structures based on intelligent technologies. Proceedings of the *XVI National Scientific Conference on Artificial Intelligence with International Participation, Moscow, Russia, 24–27 September 2018*, vol. 1, pp. 106–115 (in Russian).
14. Rudnicki R., Smith B., Malyuta T., Mandrick W. (2016) *Best practices of ontology development. White paper*. Available at: https://www.nist.gov/system/files/documents/2019/05/30/nist-ai-rfi-cubrc_inc_002.pdf (accessed 01 March 2020).
15. W3C (2012) *OWL 2 Web Ontology Language document overview (Second edition)*. Available at: <http://www.w3.org/TR/owl2-overview/> (accessed 01 March 2020).
16. Pease A. (2009) *Standard Upper Ontology Knowledge Interchange Format (SUO-KIF)*. Available at: <https://github.com/ontologyportal/sigmakee/blob/master/suo-kif.pdf> (accessed 01 March 2020).
17. ISO (2018) *ISO/IEC 24707:2018. Information technology – Common Logic (CL) – A framework for a family of logic-based languages*. Available at: <https://www.iso.org/standard/66249.html> (accessed 01 March 2020).
18. W3C (2014) *The RDF Schema vocabulary (RDFS)*. Available at: <https://www.w3.org/TR/rdf-schema/> (accessed 01 March 2020).
19. Brinkley J.F., Suciú D., Detwiler L.T., Gennari J.H., Rosse C. (2006) A framework for using reference ontologies as a foundation for the semantic web. *AMIA Annual Symposium Proceedings*, pp. 96–100. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1839690/> (accessed 01 March 2020).
20. Smith B. (2015) *Basic Formal Ontology 2.0. Specification and user's guide*. Available at: <https://raw.githubusercontent.com/BFO-ontology/BFO/v2.0/BFO2-Reference.docx> (accessed 01 March 2020).
21. Herre H., Heller B., Burek P., Loebe F., Hoehndorf R., Michalek H. (2006) *General Formal Ontology (GFO) – A foundational ontology integrating objects and processes*. Report Nr. 8. OntoMed, IMISE.
22. Borgo S., Masolo C. (2010) Ontological foundations of DOLCE. *Theory and applications of ontology: Computer applications* (R. Poli, M. Healy, A. Kameas, eds). Dordrecht: Springer. DOI: 10.1007/978-90-481-8847-5_13.
23. Hepp M., Radinger A. (2010) *eClassOWL – The web ontology for products and services*. Available at: <http://www.heppnetz.de/projects/eclassowl/> (accessed 01 March 2020).
24. APQC (2016). *Cross-industry process classification framework*. Available at: https://www.apqc.org/system/files/K08175_Cross_Industry_v7.0.5_russian.pdf (accessed 01 March 2020) (in Russian).
25. Vashchukov Yu.A., Dmitriev A.Ya., Mitroshkina T.A. (2012) *QFD: Product and process development based on customer requirements and expectations*. Samara: SSAU (in Russian).
26. Kano N., Seraku N., Takahashi F., Tsuji S. (1984) Attractive quality and must-be quality. *Journal of Japanese Society for Quality Control*, vol. 14, no 2, pp. 39–48.
27. Oliver D.W., Kelliher T.P., Keegan J.G., Jr. (1997) *Engineering complex systems with models and objects*. McGraw-Hill.
28. Telnov Yu.F., Danilov A.V., Diveev R.I., Kazakov V.A., Yaroshenko E.V. (2018) Development of a prototype of multi-agent system of network interaction of educational institutions. *Open Education*, vol. 22, no 6, pp. 14–26 (in Russian).

About the authors

Yury F. Telnov

Dr. Sci. (Economics), Professor;

Head of the Department of Applied Information Technologies and Information Security, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

ORCID: 0000-0002-2983-8232

Vasiliy A. Kazakov

Cand. Sci. (Economics);

Leading Researcher, Research Institute “Strategic Information Technologies”, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: Kazakov.VA@rea.ru

ORCID: 0000-0001-8939-2087

Vasiliy M. Trembach

Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor;

Associate Professor, Department 304, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia;

E-mail: trembach@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-7499-4368