

УДК 004.822

ОНТОЛОГИИ КАК ИНСТРУМЕНТ СОЗДАНИЯ ОТКРЫТЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ

А.А. Жилиев*НПК «Разумные решения», Самара, Россия**Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара, Россия**zhilyaev@smartsolutions-123.ru*

Аннотация

В статье рассматривается использование онтологических моделей объектов планирования для сокращения трудоёмкости разработки и расширения возможностей по настройке мультиагентных систем управления ресурсами предприятий. В этих целях вводится базовая онтология планирования ресурсов, относительно независимая от предметной области, и даются примеры её расширения для управления ресурсами в различных прикладных сферах. В качестве центрального понятия предлагаемой онтологии планирования выделяется концепт «Задача», позволяющий формализовать требования к необходимым ресурсам, установить связи с предшествующими и последующими задачами, определить входные и выходные объекты каждой задачи. Показывается, что на основе этого концепта появляется возможность создать относительно универсального и легко настраиваемого программного агента задачи; на его базе в мультиагентной системе строится расписание как сеть потребностей и возможностей связанных между собой задач конкретного производства. На основе базовой онтологии и её прикладных расширений строится база знаний предприятия, содержащая его онтологическую модель, включающую экземпляры введённых классов понятий и отношений. Предложены расширения классов агентов сети потребностей и возможностей и разработан мультиагентный метод планирования ресурсов, использующий базу знаний предприятия. Приводится описание разработанного комплекса программных средств, с помощью которого осуществляется создание онтологии и базы знаний, а также планирование производства до уровня задач отдельных сотрудников. Обсуждаются перспективы развития предложенного подхода для создания онтологических «цифровых двойников» предприятий, применимых как в оперативном управлении, так и для моделирования процессов модернизации предприятий.

Ключевые слова: управление ресурсами, онтологии, базы знаний, мультиагентные технологии, планирование, адаптивность, гибкое производство.

Цитирование: Жилиев, А.А. Онтологии как инструмент создания открытых мультиагентных систем управления ресурсами / А.А. Жилиев // Онтология проектирования. – 2019. – Т.9, №2(32). – С.261-281. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-261-281.

Введение

Многие производственные предприятия сталкиваются с новыми вызовами современной экономики, связанными с необходимостью более частого обновления продукции и технологий производства, перехода к позаказному малотиражному или даже единичному производству, развитию цепочек кооперации и другими изменениями [1].

С ростом сложности решаемых задач способность бизнеса быстро адаптироваться к происходящим изменениям становится важнейшей характеристикой, определяющей экономическую эффективность предприятия. При этом можно говорить об адаптивности первого рода, при которой планы предприятий изменяются с учётом поступления новых непредвиденных событий, но также важна и адаптивность второго рода, когда изменяются сами знания, ле-

жащие в основе процессов принятия решений по планированию деятельности предприятий, например, о выпускаемых изделиях, технологических процессах, возможностях имеющихся ресурсов и т.д. Совокупность всех знаний и данных об объекте производства и самом предприятии всё чаще называют «цифровым двойником» изделия и самого предприятия [2].

В этих условиях управление предприятиями требует новых подходов к автоматизации решения задач планирования, которое из стратегического долгосрочного постепенно должно становиться всё более оперативным и гибким, чутко реагирующим на любые изменения ситуации. И хотя большая часть предприятий по-прежнему планирует реальное производство один раз в месяц, налицо растущая востребованность в еженедельном и далее – ежедневном планировании, а в идеале – непрерывном адаптивном планировании по событиям в реальном времени. Цель такого планирования в том, чтобы сделать план предприятия всегда актуальным, показывающим реальную прибыль и картину использования всех ресурсов, позволяющим прогнозировать сроки завершения работ и поставки продукции и видеть возможности для снижения рисков. Производственный план становится необходимой частью «цифрового двойника» предприятия, наравне с другими параметрами, такими как, например, состояние его складов и станков в любой момент времени.

Наличие высокой сложности и динамики производственных процессов, имеющих событийную природу, приводит к тому, что традиционные пакетные, централизованные и последовательные вычислительные модели, методы и алгоритмы комбинаторного или эвристического типа не позволяют эффективно решать указанные задачи с приемлемым качеством и за приемлемое время [3, 4].

В этой связи актуальна и значима задача поиска рациональных методов, обеспечивающих возможность адаптивной перестройки планов по событиям в реальном времени.

При этом опыт решения практических задач [5] показывает, что ключевым фактором, влияющим на качество и эффективность планирования, являются не столько «изобретательные» методы планирования, сколько профессиональные знания специалистов, которые определяют семантику предметной области (ПрО) и содержательные особенности решаемых задач. Например, при планировании агрегатной сборки самолетов важное значение имеют сведения о закладных деталях (детали, при поступлении которых можно начинать сборку агрегата, даже при отсутствии других узлов), возможностях распараллеливания части технологических операций, усиления этих операций рабочими для ускорения работ, компетенциях рабочих, их совместимости при работе в сменах и т.д. Попытки создания полностью инвариантной к ПрО «универсальной» системы планирования неизбежно ведут к выхолащиванию рассматриваемой сути задачи, так как разработанные универсальные системы не позволяют учесть специфику ПрО, намеренно сокращая число факторов, принимаемых во внимание при планировании специалистами.

Указанные вызовы делают актуальным и значимым решение задачи цифровизации знаний в виде, допускающем их компьютерную обработку, в частности, для применения в системах автоматизации планирования использования производственных ресурсов.

1 Объект исследования

Одним из перспективных подходов при создании автоматизированных систем управления ресурсами является использование мультиагентных технологий [4-5]. Мультиагентная система (МАС) состоит из автономных программных объектов (агентов), способных воспринимать ситуацию, принимать решения и взаимодействовать с себе подобными.

Предлагаемый подход к созданию МАС для управления ресурсами связан с использованием сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей) [6-9]. В этом подходе расписание лю-

бого предприятия или его подразделения строится посредством проведения параллельных и асинхронных аукционно-подобных взаимодействий программных агентов потребностей и возможностей на виртуальном рынке системы до момента достижения агентами неулучшаемого «конкурентного равновесия», которое интерпретируется как «динамический останов» и определённого рода «консенсус» (баланс интересов), когда ни один из агентов не может более улучшить свои показатели, после чего решение выдаётся пользователю. Такой подход позволяет перейти от привычного «централизованного» видения управления, где доминирует единственный интерес и одна целевая функция – к распределённому решению задачи управления, где могут быть представлены, ценятся и учитываются интересы всех участников.

При этом решение любой сложной задачи формируется эволюционно. Этот процесс в общем случае можно рассматривать как недетерминированный процесс самоорганизации агентов, поскольку каждый агент сам принимает решение об установлении или разрыве связей в заранее не известный момент времени (пересмотр принятых ранее решений – типовой шаг в указанном методе), но делает это в ходе непрерывного выявления и разрешения конфликтов с другими агентами. Разрешение конфликтов реализуется посредством различного типа протоколов переговоров и взаимных уступок с компенсациями на основе функций удовлетворенности и бонусов-штрафов. В результате строится не глобально-оптимальное, а рациональное (локально-оптимальное) решение, причём это решение обладает возможностями для быстрой адаптации по событиям, возникающим в реальном времени.

В работах [10-11] показан ряд важных свойств таких методов и алгоритмов для планирования и оптимизации, которые не только позволяют сократить комбинаторный перебор вариантов и иногда дают оптимальное решение, но также интуитивно понятны, лучше распараллеливаются, устойчивы к изменениям постановки задачи и могут стать новым инструментом решения NP-трудных задач.

Вместе с тем, разработка МАС в настоящее время остаётся скорее искусством, чем технологией, и требует больших усилий от разработчиков как на этапе проектирования и разработки, так и на этапе внедрения и эксплуатации. При этом замечено, что самые важные и трудно формализуемые знания начинают выявляться уже после разработки системы, в ходе внедрения и эксплуатации, порождая большое число производственных конфликтов и трудоёмких доработок, вплоть до полного перепроектирования системы.

Возможность адаптации логики под изменяющиеся параметры объекта планирования является актуальной и в случае, если разработка системы поддержки принятия решений опережает процесс создания самого предприятия, для планирования деятельности которого она разрабатывается.

Таким образом, разработка МАС поддержки принятия решений по управлению ресурсами предприятий требует разработки методов и средств формализованного представления знаний, позволяющих унифицировать построение цифровых моделей деятельности предприятия для повышения эффективности управления его ресурсами, обеспечения быстрой реакции на изменения в номенклатуре выпускаемой продукции или оказываемых услуг, используемых технологий и средств производства.

Основные принципы построения мультиагентных систем на основе онтологий были ранее сформулированы в работе [5], а в статье [12] показана структура типовой МАС планирования ресурсов, модель данных которой построена на основе онтологии управления проектами. Представленная работа развивает известные принципы в части создания базовой онтологии планирования и разработки моделей и методов принятия решений при управлении ресурсами, а также в части реализации комплекса программных средств, в котором онтологии позволяют не только расширять набор принимаемых во внимание ограничений, но и перестраивать систему планирования под решение новых задач.

2 Онтологический подход к управлению ресурсами

2.1. Формализация знаний

При формализации знаний об индивидуальных особенностях объектов и процессов ПрО используется создание набора инструментальных средств, в основе работы которых лежит принцип разделения логики планирования и описания ПрО конкретной решаемой задачи.

Такой подход позволяет настраивать систему на область применения, формализованным образом описывая модель предприятия как объекта планирования с помощью базового набора понятий и отношений онтологии ПрО. Эта онтологическая модель объекта управления (технического объекта или производственного предприятия) загружается в МАС планирования для построения плана и дальнейшей его адаптивной корректировки по событиям. При этом каждому заказу или ресурсу сопоставляется свой программный агент и вариант его поведения, который настраивается на специфику своего владельца из базы знаний (описывающей, например, квалификации рабочего или особенности технологического процесса выполнения задачи).

В статье предлагается использовать базы знаний (БЗ) для формализации, накопления и использования знаний, которых в настоящее время в корпоративных системах нет. Такая БЗ, содержащая уже экземпляры объектов, может быть построена на основе онтологии ПрО в форме семантической сети классов понятий и отношений.

Создание подобной технологии является шагом на пути к реализации парадигмы «облачного производства», при которой производственные ресурсы (оборудование, инструменты или персонал) предоставляются пользователю в качестве сервиса в нужном объеме по его запросу по мере необходимости. В этом случае система должна уметь подбирать подходящие для выполнения конкретной задачи ресурсы, исходя из динамически расширяемого перечня их свойств и отношений.

2.2. Требования к построению онтологии планирования ресурсов

План работы предприятия строится исходя из запущенных в производство заказов, каждый из которых характеризуется применяемыми технологическими или бизнес-процессами, предусловиями для начала выполнения задач и ожидаемым результатом (продуктом или услугой) каждой задачи, предпочтениями по выбору ресурсов, а также нормами времени на выполнение работы.

Для продукта обычно задан процесс его получения в виде последовательности операций (задач), для которых указаны требования по ресурсам. При этом указывается необходимое количество ресурса, а также набор характеризующих свойств (признаков, качеств, квалификаций и т.п.), позволяющих подбирать ресурсы в зависимости от ситуации. Перечень таких свойств часто известен заранее, но как правило, подлежит уточнению в процессе функционирования системы. Например: для операции фрезерования может потребоваться определить допустимую конфигурацию фрезерного станка, тип режущего инструмента, направление вращения фрезы относительно направления движения заготовки и др.; при выполнении операции может одновременно использоваться несколько видов ресурсов, так, при сварке двух деталей необходимо найти свободного сварщика, а также подходящий сварочный инструмент; для тяжёлых операций нужна кран-балка, которая может оказаться наиболее дефицитным ресурсом цеха, и т.д.

Продолжительность каждой операции определяется производительностью используемого ресурса. Операция может быть прервана, в результате чего будут временно высвобождены все используемые при её выполнении ресурсы, но для ряда операций может быть установлен

запрет на прерывание. Операции могут быть упорядочены между собой посредством отношений предшествования-следования. Одна из трудностей в определении порядка операций может быть связана с тем, что такое упорядочение часто задаётся неявно, например, посредством схемы сборки изделия. В ряде случаев ожидаемый результат может быть получен различными способами, описываемыми альтернативными технологическими процессами или выстраиваемыми динамически или по контексту ситуации (при строительстве нефтедобывающих скважин в процессе выполнения плана появляется необходимость в выполнении вспомогательных операций, например, вследствие зажима инструмента). Может допускаться возможность наличия альтернативных вариантов выполнения отдельной операции с использованием различного состава ресурсов, обладающих различной производительностью. Построение эффективного плана требует знания всех возможных альтернатив, что позволит найти наилучшую комбинацию ресурсов, учитывающую влияние и ограничения параллельно запущенных в производство заказов.

Помимо описания того, что, в какие сроки и какими способом необходимо сделать для выполнения каждого заказа, указывается и доступный набор ресурсов, включая их состав, характеристики, располагаемое количество, зависящее от календаря работы или графика поставки. В зависимости от типа ресурсы могут быть разделяемыми и неразделяемыми (в каждый момент времени могут быть использованы только в одной операции) а также возобновляемыми и невозобновляемыми. Использование в операции возобновляемого ресурса означает, что с началом её выполнения этот ресурс в требуемом количестве считается недоступным для выполнения других операций, но после её завершения ресурс высвобождается. Потребление ресурса означает, что после начала выполнения операции происходит уменьшение количества ресурса на заданную величину.

Задача планирования заключается в расчёте расписания выполнения заказов, определяющем распределение ресурсов по задачам и точное время их выполнения с использованием показателей эффективности:

- выполнение заказов как можно раньше или точно в срок;
- повышение загрузки ресурсов;
- минимизация среднего или максимального опоздания по заказам;
- уменьшение времени пролёживания продуктов и др.

Получаемое решение должно удовлетворять ограничениям по производительности и графику работы ресурсов, например, неразделяемый ресурс в данный момент времени может одновременно использоваться только одной операцией. При наличии нескольких допустимых вариантов расписания необходимо выбрать близкое к оптимальному, так как получение оптимального результата может быть затруднено и неоправданно с точки зрения затрачиваемого времени.

Таким образом, в общем случае процесс поиска решения заключается в выборе наилучшего или рационального плана исполнения конкурирующих за ресурсы заказов в зависимости от их требований и сложившейся ситуации. Эта задача, в свою очередь, распадается на ряд подзадач, связанных с подбором подходящих продуктов, технологических процессов и ресурсов.

По сравнению с известными и подобными задачами построения расписания (выполнение работ проекта Project Scheduling и планирование задач на станках Job Shop Scheduling [13]) в рассматриваемой постановке имеется ряд дополнительных требований, из которых принципиальными являются рост числа критериев, предпочтений и ограничений для каждого объекта, а также необходимость адаптивного перерасчёта расписания вследствие наступления событий, изменяющих как доступность ресурсов и материалов, так и технологические процессы выполнения заказов.

2.3. Обзор онтологий производственных ресурсов

Одна из первых известных производственных онтологий - «Process Specification Language» (PSL), разработанная как язык представления знаний о производственном процессе и используемая для интеграции различных приложений [14].

В 2006 году опубликована онтология «Manufacturing's Semantics Ontology» (MASON), предназначенная для моделирования производственного процесса и расчёта связанных с ним затрат. Основными классами понятий в ней являются ресурсы (в том числе материалы и персонал) и операции. Важной особенностью онтологии является возможность отображения экземпляров сущностей онтологии в программные объекты для последующего моделирования производственного процесса [15].

В [16] предложена версия онтологии производства на основе одной из общедоступных онтологий верхнего уровня (DOLCE) и расширение её предметно-зависимыми понятиями. Построенная онтология определяет таксономию изделий и компонентов, материалов, заказов и производственных процессов.

В статье [17] предложена производственная онтология, в основе которой лежат три класса понятий: продукт, процесс и ресурс. Для связи между процессами и ресурсами дополнительно введено понятие «возможность», с помощью которого задаются как требования со стороны операций, так и функциональность ресурсов. Авторы одними из первых стали использовать онтологический подход для автоматизации процесса управления сборочным конвейером, создав MAC, в которой агенты ресурсов регистрировали в системе имеющиеся у них возможности, а процессы подбирали необходимые ресурсы.

Пример использования семантических ограничений в многоагентных системах управления ресурсами показан в работе [18]. Состав агентов и учитываемых ими ограничений предложено определять на этапе проектирования системы в зависимости от особенностей рассматриваемой ПрО.

Преимущества использования онтологий в агентно-ориентированных системах управления ресурсами продемонстрированы в работе [19]. В центре внимания рассматриваемой здесь онтологии находятся такие понятия как заказ, продукт, производственный процесс и структура предприятия (группировка оборудования в производственные ячейки, описание маршрутов перемещения продукции между ячейками). В качестве примера рассмотрена задача по моделированию работы конвейера, упаковывающего подарки, состав и параметры которых определяются поступающими в систему заказами. Более подробно вопрос моделирования возможностей ресурсов (параметров оборудования и навыков работников) рассмотрен в работах [20, 21].

В статье [22] предложена производственная онтология верхнего уровня, позволяющая объединить на своей основе стадии проектирования и производства изделий. В работе [23] вопрос применения БЗ рассматривается в контексте помощи диспетчерам при планировании производственного процесса. В одной из последних работ по рассматриваемой теме [24] предложена онтология, в основе которой лежит представление производственного процесса в трёх измерениях: структурном (взаимосвязи между процессами и используемым оборудованием, оборудованием и инструментами и т.п.), временном (последовательность выполнения операций), вариативном (возможность выбора между альтернативными процессами, оборудованием и инструментами). Кроме того, значительная часть исследований посвящена более общей теме накопления и использования знаний в производственных системах [25, 26]. Подробный анализ современных тенденций и будущего производственных БЗ на основе онтологий опубликован в работе [27].

Результат проведённого анализа показывает, что большинство онтологий ориентированы на конкретную область производства и в основном служат для интеграции знаний из различ-

ных информационных систем или моделирования производственных процессов. Целью же настоящей работы является разработка базовой, предметно-независимой онтологии планирования, позволяющей применить накопленные знания о производственном процессе в автоматизированной МАС планирования.

2.4. Структура онтологии управления ресурсами

Основное назначение онтологий и построенных на их основе БЗ – формализация знаний ПрО в целях более точной спецификации требований, которые необходимо учитывать в прикладных системах, а также отделение этой информации от программного кода системы для обеспечения возможности её редактирования и расширения. Процесс разработки онтологии заключается в классификации понятий ПрО и определении формата представления знаний в виде конечного множества концептов (понятий) и отношений ПрО.

При этом для планирования удобно выделить три уровня описания ПрО, отличающихся степенью изменчивости предметных знаний:

- онтология ПрО – содержит формализованную модель знаний ПрО;
- онтологическая модель предприятия – содержит онтологическое описание ресурсов предприятия, построенное на основе онтологии ПрО, включая организацию предприятия, описание изделий и технологических процессов, оборудования, персонала и применяемых инструментов;
- сцена мира предприятия - соответствует текущему расписанию работы предприятия в выбранный момент времени.

Онтология представляет собой иерархически организованный словарь понятий, используемых для описания ПрО и связанных между собой отношениями. Базовые понятия через отношение наследования могут быть конкретизированы производными. Понятия и отношения из одной онтологии могут быть использованы при построении другой – это позволяет структурировать знания, например, создав несколько онтологий, различающихся уровнем абстракции. Качественные и количественные характеристики понятий и отношений задаются с помощью атрибутов. Онтологическая модель содержит устойчивые конфигурации экземпляров классов, заданных в онтологии. На основе онтологии и онтологической модели определяются структуры данных, используемые в дальнейшем для описания информационных моделей объектов и процессов решения бизнес-задач прикладными системами. Сцена описывает экземпляры понятий и отношений между ними с конкретными значениями атрибутов и отношений в расписании в выбранный момент времени [28].

На верхнем уровне предлагается использовать онтологию планирования, состоящую из наиболее общих и повторно используемых концепций, в то время как детали, зависящие от ПрО фиксировать в специализированных онтологиях, расширяющих базовую. Так, для описания ПрО машиностроительного производства может быть создана отдельная онтология машиностроения. Иерархия понятий может уточняться в более специализированных онтологиях, вплоть до уровня онтологии конкретного предприятия. На основе онтологии ПрО строится онтологическая модель предприятия, состоящая из экземпляров описанных ранее понятий (см. рисунок 1).

К преимуществам использования такого подхода можно отнести:

- создание единого базиса, в котором описываются знания;
- возможность внесения изменений в структуру представления знаний по мере изменения целей и задач, стоящих перед системой;
- наглядность и доступность для восприятия пользователями больших объёмов сложно структурированной информации;
- возможности по интеграции разнородных источников информации.



Рисунок 1 – Пример представления онтологии в виде нескольких слоев

2.5. Базовая онтология планирования

Для того, чтобы «объяснить» системе планирования как работать с ПрО, необходимо связать её понятия и отношения с уже известными (интерпретируемыми системой) понятиями и отношениями, встроенными в её программный код. Набор этих понятий и отношений формирует «онтологию планирования», в которой могут быть собраны все абстракции, которыми оперирует система планирования.

В качестве базовых понятий и отношений предметной онтологии целесообразно выбрать те, которые соответствуют основным агентам ПВ-сети, применяемым для адаптивного планирования на основе мультиагентных технологий. Такими понятиями являются: заказ, задача, ресурс и продукт (см. рисунок 2).



Рисунок 2 – Базовая онтология планирования

Заказы определяют состав и сроки создания продукта, задачи требуют для своего выполнения ресурсы с определённым набором характеристик. При этом могут быть выделены задачи с фиксированной длительностью или фиксированным объёмом работ, который должен быть выполнен для её завершения. Продукты могут поступать на вход задачи, а также являться результатом её выполнения. Продукты требуют размещения (например, сборочная единица должна храниться на соответствующей площадке вплоть до момента её использования при сборке конечного изделия).

В зависимости от способа определения длительности задачи могут классифицироваться как атомарные, групповые, а также задачи вида «гамак» (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Базовые типы задач

Тип	Описание
Атомарная	Продолжительность задана фиксированной нормой времени.
	Продолжительность зависит от состава и характеристик используемых ресурсов и/или объёма выпускаемого продукта.
Групповая	Продолжительность «покрывает» интервалы выполнения дочерних задач (атомарных или групповых).
Гамак	Выполняется строго между моментами времени окончания задач предшественников и началом задач-последователей.

Все задачи могут требовать для своего выполнения ресурсы, производить и потреблять или использовать (без преобразования) продукты. Требование к ресурсу определяет набор ресурсов, необходимых для выполнения задачи. Требование характеризуется типом ресурса, количеством ресурсов данного типа, а также перечнем атрибутов, ограничивающих множество подходящих под описание ресурсов. Атрибут представляет собой тройку: название, оператор, значение.

Ресурсы обеспечивают выполнение задач. С точки зрения участия в технологическом процессе они подразделяются на преобразуемые и обеспечивающие (см. таблицу 2). Преобразуемые ресурсы подвергаются трансформации в ходе выполнения технологического процесса и непосредственно входят в состав получаемой на выходе продукции в качестве исходного сырья и материалов. В качестве подкласса преобразуемого ресурса отдельно выделен класс «Продукт». При выполнении процесса продукт приобретает дополнительную ценность и поступает на его выход – внутреннему или внешнему потребителю. В свою очередь, потребитель может рассматривать преобразованный продукт в качестве входа для своего процесса. Для того чтобы различать производимые и потребляемые продукты дополнительно вводятся два соответствующих подкласса. Обеспечивающие ресурсы участвуют в процессе преобразования, но не изменяют своё состояние. К их числу можно отнести оборудование, программное обеспечение, инфраструктуру, персонал.

Таблица 2 – Базовые типы ресурсов

Тип	Описание
Преобразуемый	Тратится при выполнении задачи (в количестве, определённом её требованиями), может быть восполнен согласно графику поставок.
Обеспечивающий	Становится доступными для повторного использования в прежнем количестве сразу после завершения задач, на которые был выделен. В общем случае может иметь график зависимости располагаемого объёма от времени (ресурс с переменной доступностью).

Оба типа ресурсов характеризуются графиком зависимости располагаемого объёма от времени. Для обеспечивающих ресурсов устанавливаются правила обслуживания, правила переналадки и транспортная доступность с другими ресурсами (через отношения «соединён с»), которая определяет возможность и время транспортировки обрабатываемых продуктов от одного ресурса (или группы ресурсов) к другому. Правила переналадки определяют технологический переход между последовательным выпуском различных видов продуктов на одном и том же оборудовании, правила обслуживания – потребность ресурса в проведении ремонтных и профилактических работ.

Между базовыми понятиями могут быть установлены отношения. Каждый заказ требует появления некоторого продукта («требует создания»), который, в свою очередь, связан с задачей, в результате выполнения которой он появляется (задача «производит» продукт). Продукты могут быть использованы при выполнении задач (задача «потребляет» продукт). Зада-

чи связаны между собой посредством отношений вложенности («является частью») и упорядоченности («следует за»). Эти отношения позволяют агенту найти предыдущую и следующую задачу для запроса о перемещении в расписании или сообщения о возникшей задержке в выполнении. Отношение «требуется ресурс» показывает, какие ресурсы необходимы для выполнения задачи (см. таблицу 3).

Таблица 3 – Отношения, определённые в базовой онтологии планирования

Домен	Тип отношения	Диапазон
Заказ	Требуется создания	Производимый продукт
Задача	Является частью	Групповая задача
	Следует за	Задача
	Использует	Ресурс / требование к ресурсу
	Производит	Производимый продукт
	Потребляет	Потребляемый продукт
Ресурс	Доступен	График доступности
Обеспечивающий ресурс	Входит в	Группа ресурсов
	Требуется обслуживания	Правило обслуживания
	Требуется переналадки	Правило переналадки

Таким образом, для формирования онтологической модели объекта планирования необходимо выполнить следующие этапы:

- 1) описать номенклатуру используемых и производимых продуктов (сырья, полуфабрикатов, информационных продуктов, документов, изделий и др.). Часть продуктов (сырьё, материалы) не являются объектом собственного производства и используются системой планирования в качестве ограничений, оказывающих влияние на сроки выполнения потребляющих эти продукты операций. Полуфабрикаты и готовые продукты являются объектами собственного производства и должны иметь маршрут своего изготовления, в процессе которого используют производственные мощности предприятия. При необходимости в онтологию могут быть добавлены классы, описывающие подвиды продукции. Описание каждого вида продукта может быть уточнено с помощью дополнительных отношений и атрибутов.
- 2) описать состав и структуру используемых ресурсов (кадры, станки, инструменты и т.д.). Для ресурсов задаётся: производительность; календарь работы; правила проведения планово-предупредительных ремонтов и обслуживания в зависимости от наработки или объёмов выпущенной продукции; правила переналадки, определяющие длительность перехода на производство продукции другого вида; дополнительные атрибуты и отношения. Ресурсы могут быть объединены в группы в целях удобства задания общих для всей группы характеристик, например, графика работы всего подразделения. Дополнительно могут быть установлены отношения «вложенности» одних групп в другие.
- 3) задать технологические процессы получения продуктов, представляющие собой упорядоченный список операций. Для операций указываются нормативы времени выполнения: фиксированные или зависящие от объёмов участвующей в преобразовании продукции и необходимые для её выполнения ресурсы (путём задания необходимых свойств). Время выполнения операции может зависеть от производительности выбранной линии.
- 4) сформировать перечень заказов, содержащих сведения об изготавливаемом продукте, его количестве и сроках выполнения.

2.6. Прикладные онтологии

Прикладные онтологии содержат классы понятий и отношений, являющиеся специфическими для этой области, например, в онтологии машиностроения описываются такие классы как «изделие», «технологический процесс», «цех», «оборудование» и другие (см. рисунок 3).

Некоторые из этих классов ссылаются на базовые, приведённые в онтологии планирования, например, «Обеспечивающий ресурс» на уровне онтологии машиностроения представлен классами «Технологическая оснастка» и «Оборудование». Дополнительно указываются классы общего назначения, которые не наследуются от базовых, а лишь участвуют с ними в отношениях, позволяя описывать свойства понятий ПрО (модель оборудования, компетенция

сотрудника и др.). В ПрО бурения в качестве результата рассматривается скважина с заданным набором свойств (назначение, конструкция, тип, месторождение и др.). В процессе бурения используется буровая установка, конкретные операции требуют участия бригады буровиков, обладающих различной специализацией, расходуются буровые и обсадные трубы различного диаметра (см. рисунок 4).

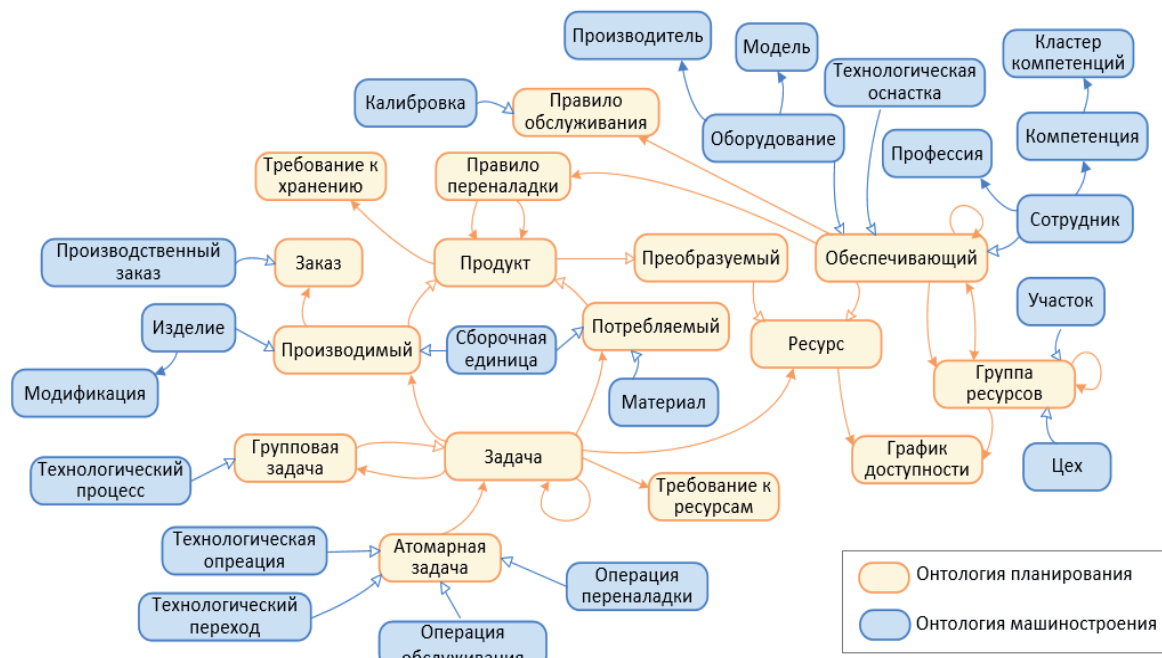


Рисунок 3 – Расширение онтологии планирования на область машиностроения

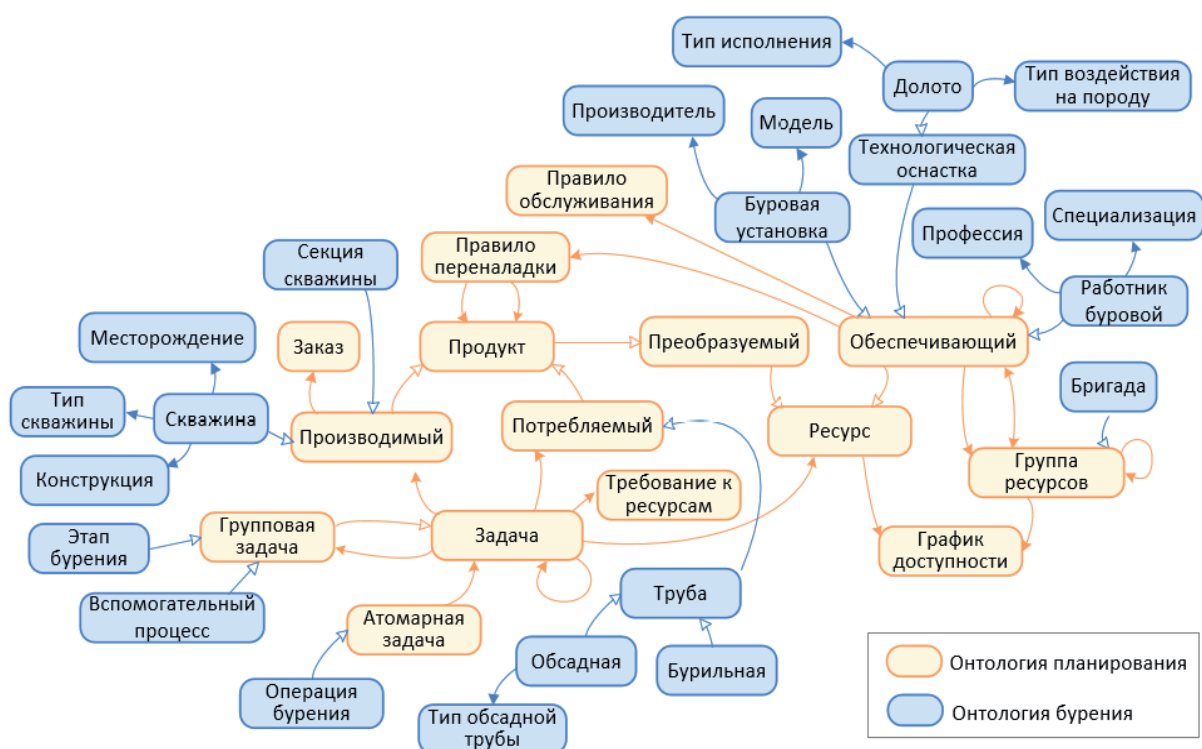


Рисунок 4 – Расширение онтологии планирования на предметную область бурения

3 Развитие мультиагентного метода планирования на основе онтологий

3.1. Базовые классы агентов

Для решения задачи планирования предлагается использовать мультиагентный подход, в основе которого лежит сопоставление онтологическим сущностям ПрО действующих от их лица программных агентов [29].

Каждый агент способен принимать решения и взаимодействовать с другими агентами, вместе образующими МАС. Поведение МАС не регулируется каким-либо централизованным алгоритмом, а, напротив, возникает из локальных взаимодействий образующих её агентов. Каждый агент обладает набором поведений, определяющих его реакцию на сообщения от других агентов, либо на изменение внешних условий (событий).

В предлагаемом подходе расписание строится путём самоорганизации программных агентов ПВ-сети, ведущих конкуренцию и кооперацию на виртуальном рынке системы. В качестве базовых типов агентов выделены агенты заказов, задач, ресурсов, продуктов, а также агент сцены. Цели и ограничения этих агентов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Цели и ограничения агентов

Тип	Цели и предпочтения	Ограничения
Агент заказа	Быть выполненным в указанные сроки в полном объёме, с минимальной стоимостью	Сроки, объём, предельная стоимость
Агент задачи	Быть выполненным на подходящем ресурсе в указанные сроки за минимальное время	Характеристики требуемых ресурсов и продуктов, сроки начала и окончания, взаимосвязи с другими задачами
Агент ресурса	Быть максимально загруженным, минимизировать простои и переналадки	Календарь работы, интервалы недоступности, правила обслуживания и переналадки, производительность
Агент продукта	Обеспечить своё хранение, минимизировать пролёживание	Требования по хранению, время поставки или производства, время потребления
Агент сцены	Выявление «узких мест» в расписании, управление активностью агентов системы, взаимодействие с внешними системами	Время, отводимое на планирование, глубина цепочек перестановок в расписании

3.2. Удовлетворённость агентов

Цели и предпочтения каждого агента определяются через функцию удовлетворённости, представляющую собой взвешенную сумму компонент, соответствующих различным критериям:

$$Y = \sum_{i=1}^n w_i y_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где: y_i – функция удовлетворённости по критерию i ,

w_i – весовой коэффициент.

Примеры компонент функций удовлетворённости агентов различных типов приведены на рисунке 5. В зависимости от значения функции удовлетворённости агенту автоматически начисляется премия (штраф), размер которой определяется через заданную для этого агента функцию бонусов и штрафов: $P = f(Y)$.

Пример функции бонусов и штрафов показан на рисунке 6.

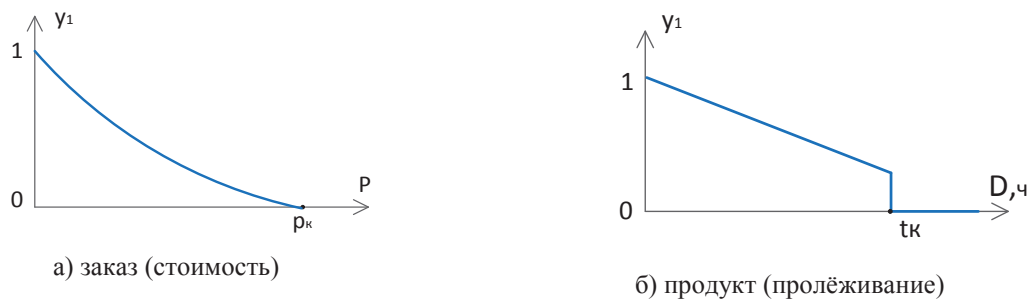


Рисунок 5 – Примеры компонент функций удовлетворѣнности агентов

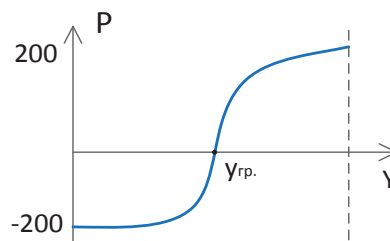


Рисунок 6 – Пример функции бонусов и штрафов

Если функция удовлетворѣнности определяет чувствительность агента к изменению своего состояния, то функция бонусов и штрафов – возможность агента перестроить расписание в угоду своих интересов (его «агрессивность» при достижении собственных целей).

3.3. Метод планирования на основе агентов и онтологий

В основе планирования лежит механизм разбора конфликтов, обеспечивающий возможность перестановки конфликтующих задач в расписании посредством переговоров агентов (путѣм обмена сообщениями по заданным регламентам). В результате достигается допустимое локально-оптимальное решение, которое в дальнейшем адаптивно корректируется в «скользящем режиме» на рассматриваемом горизонте планирования.

- 1) В соответствии с текущим состоянием сцены создаются агенты заказов, ресурсов и продуктов. Агент сцены отправляет сигнал о начале планирования одному или нескольким агентам заказов.
- 2) Агент заказа считывает технологический процесс получения связанного с ним продукта и порождает агентов задач, соответствующих технологическому процессу и операциям, выстроенных в иерархию.
- 3) Агент задачи верхнего уровня считывает концепт указанной ему задачи в БЗ и проверяет наличие используемых при выполнении задачи продуктов, оценивает требования по ресурсам и подбирает их комбинацию на основе оценки продолжительности. Процедура поиска вариантов размещения включает анализ требуемых ресурсов, сопоставление требований задач и возможностей ресурсов, согласование времѣн доступности всех ресурсов, выбор лучшей комбинации исполнителей. При этом по мере подбора ресурсов определяется множество заказов, мешающих размещению на выбранных ресурсах (конфликтное множество). Процедура определения конфликтного множества заказов зависит от типа рассматриваемого ресурса: неразделяемый ресурс фиксирует конфликт в случае пересечения используемых двумя задачами интервалов времени, разделяемый – если суммарное количество используемого задачами ресурса превышает предельное значение. После выбора варианта размещения агент групповой задачи отправляет запрос на планирование агентам дочерних задач.
- 4) Агенты дочерних задач рекурсивно проводят поиск вариантов размещения с учетом установленных родительской задачей ограничений. Результаты планирования сообщаются агенту задачи верхнего уровня, который уточняет свое размещение или предлагает дочерним задачам запланировать в другое время.
- 5) Агент задачи верхнего уровня сообщает агенту заказа о параметрах выбранного размещения.
- 6) Агент заказа предлагает конфликтующим заказам найти себе другое место в расписании, сообщив потери, которые им пришлось понести по сравнению с базовым (отправным для текущей нити) вариантом расписания.

ния. В результате определяется цепочка перестановок задач и заказов, рассчитываются значения целевых функций тех сущностей, которых затронули изменения в плане, и на основе этого уточняется итоговое значение целевой функции системы как нормированной суммы целевых функций составляющих её агентов. Цепочка перестановок является успешной (допустимой), если значение целевой функции системы становится больше, и агент заказа может компенсировать потери других сущностей, участвующих в этом варианте перестановок. Если эти условия выполнены, то происходит утверждение изменений в расписании, иначе – определяется другой вариант размещения.

- 7) После размещения агент заказа проверяет наличие связанных с ним отношений «Производится» продуктов и оповещает их агентов о сроках поставки на склад.
- 8) Данный процесс продолжается до тех пор, пока не зафиксируется состояние, когда ни один агент не может более улучшить своё состояние (функцию удовлетворенности).
- 9) Агент сцены определяет агента с наихудшими критериями для системы в целом. Выбранному худшему агенту даётся команда разорвать связи со связанными продуктами и ресурсами. Выбранному агенту увеличивается значение коэффициента важности наихудшего критерия в функции удовлетворённости, что будет вызывать выбор других опций при его повторном новом планировании.
- 10) Агент пытается планироваться заново – если успешно, процесс переходит к следующему критерию и соответствующему агенту. Если нет, то агент сообщает сумму компенсации, которой ему не достаёт для достижения нового значения критерия.
- 11) Агент сцены оценивает наличие валюты в системе и добавляет при необходимости виртуальную валюту данному агенту. В результате худшие агенты итерационно «подтягивают» свои критерии по новым значениям, компенсируя убытки других агентов за счёт виртуального бюджета.
- 12) Процесс заканчивается, если вышло время, отводимое на построения расписание или не осталось возможностей по его улучшению.

3.4. Инструментальные средства поддержки

Для реализации предложенного подхода был разработан комплекс программных средств, включающий в свой состав модуль управления, пользовательский интерфейс, конструктор онтологий, моделей и сцен, а также модуль планирования (см. рисунок 7).

Подсистема управления является серверной частью веб-приложения, реализующей его бизнес-логику. Конструктор моделей, онтологий и сцен обеспечивает создание, редактирование и хранение цифровой модели объекта планирования, предоставляя программный интерфейс для доступа к имеющейся информации. Хранилище данных



Рисунок 7 – Архитектура комплекса программных средств

физически разделено на две части: онтологическую и реляционную. Онтологическая часть содержит описание всех используемых онтологий и моделей в виде триплетов, реляционная – данные о всех введенных в систему объектах (ресурсах, заказах, задачах и т.п.). Такое разделение позволяет сочетать преимущества жестких нормализованных и динамически расширяемых структур данных, хранящихся в различных СУБД: PostgreSQL и Mongo.

Главной задачей модуля планирования является формирование и адаптивная перестройка плана выполнения заказов с учётом ограничений на ресурсы. Модуль создаёт и настраивает экземпляры агентов системы исходя из онтологического описания объекта планирования, предоставляет многопоточную среду для их выполнения, определяет порядок и алгоритм их функционирования.

Интерфейс пользователя представляет собой клиентскую часть веб-приложения, исполняющуюся в браузере и реализующую графический интерфейс для доступа к модели объекта и результатам планирования.

Примеры экранов разработанных программных средств показаны на рисунке 8.

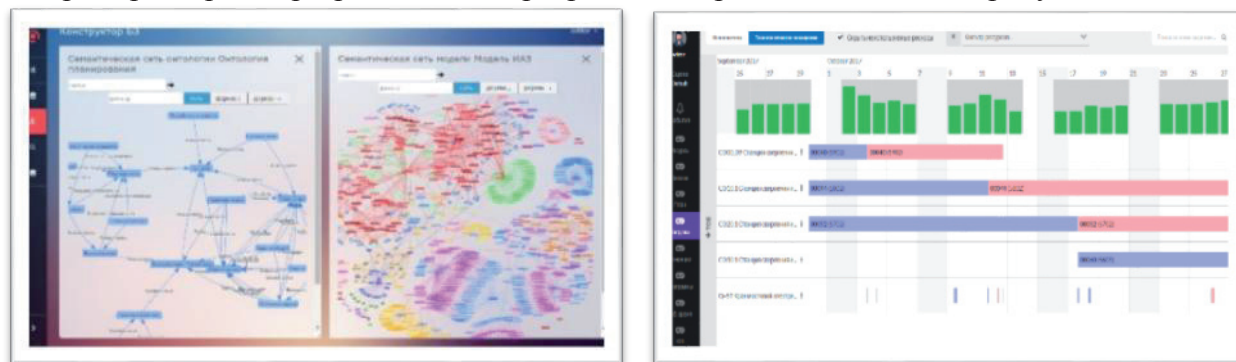


Рисунок 8 – Примеры экранов разработанных программных средств (слева – прикладная онтология и онтологическая модель предприятия для одного из цехов, справа – график выполнения операций сборки)

4 Применение инструментальных средств для решения прикладных задач

4.1. Планирование производства на авиастроительном предприятии

Объектом планирования является процесс агрегатной и окончательной сборки пассажирского самолета МС-21. Производственное расписание включает работы по сборке технологических сборочных единиц каждого экземпляра самолета, изготавливаемых на заданном горизонте планирования, с декомпозицией до уровня технологических переходов [30].

Работы выполняются на сборочной линии, состоящий из специализированных станций для сборки панелей, отсеков, фюзеляжа и всего самолета в целом. Фрагменты будущего самолета – технологические сборочные единицы – перемещаются от одной станции к другой по заранее определённом технологическому маршруту сборки. На станции над сборочной единицей выполняется комплекс работ (операций) по базированию, закреплению деталей по отверстиям или в сборочной оснастке, соединению деталей между собой, контролю и выемке собранной сборочной единицы из оснастки. Этот процесс должен быть синхронизирован на всех станциях.

Требуется определить порядок и сроки выполнения технологических операций так, чтобы минимизировать задержки при выполнении заказов, повысить загрузку оборудования и персонала. Построенное расписание должно адаптивно перестраиваться при возникновении следующих событий: приход новых срочных заказов, например, по доработанным техпроцессам, исправляющим брак; непредвиденные события с участков сборки, такие как выход из строя оборудования, поломка инструмента, невыход на работу рабочего, отсутствие комплектующих, наличия брака или потерь, невыполнение запланированных операций.

В результате проекта была создана МАС для управления работой сборочного цеха, которую в дальнейшем предполагается растиражировать и объединить в сетевую систему управления группой смежных цехов, работающую на общей цифровой платформе. Расширение прикладной онтологии в область авиастроения потребовало введения 152 классов понятий и отношений.

4.2. Планирование сборки грузовых автомобилей

Требуется составить план работы роботизированной фабрики по сборке электрических грузовых автомобилей, обеспечив возможность её быстрой реконфигурации для выпуска но-

вых моделей изделий. Сборка ведётся по задаваемой структуре изделий и технологическому маршруту, однако некоторые его этапы предполагают вариативность за счёт использования различных типов ресурсов. Так, например, соединение панелей аккумуляторного отсека может выполняться как с помощью промышленных роботов-манипуляторов, так и силами бригады рабочих. Выбор того или иного варианта должен осуществляться исходя из сложившейся на конкретный момент времени ситуации.

Некоторые используемые при сборке компоненты поставляются со смежных предприятий, другие могут быть изготовлены на фабрике по заданным технологическим процессам. Система планирования должна учитывать сроки поставки требуемых для конкретной операции компонентов или запланировать их производство, если это отвечает критериям эффективности, главным из которых является минимизация сроков выполнения заказов.

Особое значение имеет возможность гибкого включения в производственный процесс новых ресурсов и изделий без необходимости перестройки системы управления и планирования. При этом для точной спецификации возникающих потребностей и предоставляемых инфраструктурой фабрики возможностей требуется динамически вводить новые свойства и характеристики, учитывать их при выборе ресурсов и необходимых компонентов. Для выполнения этого требования онтология машиностроения была расширена онтологией промышленных роботов-манипуляторов, позволяющей описать граничные условия их применения, такие как грузоподъёмность, радиус действия и наличие подходящих для операций насадок (см. рисунок 9).

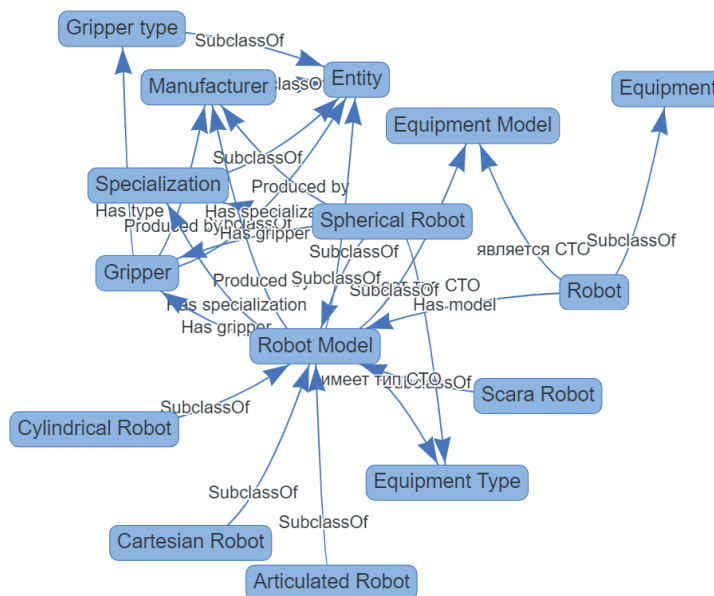


Рисунок 9 – Фрагмент онтологии роботов-манипуляторов

МАС управления роботизированной сборкой автомобилей позволила быстро настраивать систему на различные изделия (электромобили, мотоциклы, автобусы и др.) и конфигурации производств (от ручной – до роботизированной сборки). Расширение прикладной онтологии в область роботизированного производства потребовало введения 89 классов понятий и отношений.

4.3. Планирование процесса бурения скважин

Требуется определить состав, последовательность и время выполнения технологических операций бурения скважины с учётом ограничений по оборудованию, материалам, инструментам и исполнителям так, чтобы минимизировать общий срок выполнения работ. Состав необходимых операций задаётся на основе типового шаблона технологического процесса бурения, который модифицируется исходя из параметров конкретной скважины: конструкции, диаметра и глубины, способа бурения.

При строительстве нескольких скважин возникает необходимость в перераспределении общих ресурсов. Характеристики используемого оборудования оказывают влияние на время выполнения операций (например, при наличии на роторном столе автоматических клиньев скорость бурения увеличивается). В зависимости от типа операции могут быть безостанов-

вочными или прерываемыми. Технологический процесс может быть скорректирован в процессе выполнения работ, например, в случае выявления нештатной ситуации или отклонения от намеченного графика.

МАС управления процессом бурения, главной особенностью которой стала возможность накопления и учёта «лучших практик», собранных при бурении предшествующих скважин, позволила скорректировать технологический процесс с учётом специфики месторождения. Для ПрО бурения расширение базовой онтологии потребовало введения 85 классов понятий и отношений. Данная область существенно отличается от области машиностроения, и разработка МАС позволила проверить расширяемость базовой онтологии планирования.

4.4. Результаты разработок

Несмотря на существенные различия в постановках, приведённые выше задачи были решены с помощью комплекса программных средств с некоторыми доработками, связанными, в первую очередь, с визуализацией предметно-зависимых процессов, таких как диаграммы загрузки ресурсов по цехам или график «глубина-день» при бурении скважины. При этом все изменения в модуле планирования «не привязывались» к конкретной ПрО и лишь наращивали его общие возможности.

В каждом случае использовалась базовая онтология планирования, на основе которой создавались предметно-ориентированные онтологии и модели предприятий. В случае агрегатной сборки грузовиков удалось использовать и онтологию машиностроения, расширив её на частный случай робототехнических средств. Параллельно, исходя из возникающих при решении прикладных задач потребностей, происходило наращивание базовой онтологии планирования, синхронно с которой модифицировалась и логика работы агентов. Общие сведения о количестве сущностей в БЗ, агентов в модуле планирования, а также примерных сроках доработки комплекса инструментальных средств приведены в таблице 5 (число агентов зависит от количества введённых заказов, в таблице приведены усреднённые значения).

Таблица 5 – Общие сведения применения инструментальных средств для решения прикладных задач

Прикладная задача	Размер базовой онтологии	Размер предметной онтологии	Размер модели предприятия	Количество агентов	Время на доработку (человек/месяц)	
					БЗ	модуль планирования
Сборка самолётов	61	152	925	> 350	3	5.5
Сборка грузовиков		89	382	> 520	1	2
Бурение скважин		85	441	> 5000	2	3.5

На основании проведённого анализа можно заключить, что разработанный подход позволяет:

- уменьшить сложность и трудоёмкость создания МАС для управления ресурсами;
- бороться с «редукционизмом» и наращивать число факторов для принятия решений;
- настраивать логику работу МАС без привлечения программистов;
- сократить расходы на создание и поддержку рассматриваемых систем;
- привлекать к разработке программистов с более низкой квалификацией;
- использовать один и тот же исходный код на разных задачах, сокращая число ошибок и риски, связанные с разработкой.

На практике появляется возможность систематизации, накопления и формализации специфических знаний предприятий, которые ранее не были отделены от программного кода и которые теперь могут получить дополнительную ценность, а в перспективе позволят рассматривать формирующуюся БЗ как ещё один актив предприятия.

Заключение

Разработана базовая онтология планирования ресурсов и показана возможности её расширения в ПрО, позволяющие использовать один и тот же набор агентов ПВ-сети для управления предприятиями в существенно разных ПрО. Представлено расширение мультиагентного метода планирования на основе онтологической модели предприятия, хранящейся в БЗ. Показано применение подхода для управления сборкой самолетов, роботизированной сборкой автомобилей и процессом бурения.

Предложенный подход позволяет строить формализованные онтологические модели ПВ-сетей предприятий и гибко настраивать МАС управления ресурсами без трудоёмкого перепрограммирования для учёта специфики их работы. Применение онтологий позволяет сократить расходы на создание и поддержку МАС для управления ресурсами. Уменьшение трудоёмкости и сроков разработки объясняется снижением затрат времени на выявление и информационное моделирование знаний ПрО, типизацию задач компонент планирования, разработку учётной системы и интеграцию модуля планирования с вновь разработанной инфраструктурой. Используемая в работе БЗ позволяет накапливать разнородные сведения о производственном процессе, отражая растущую сложность реального мира и развивая индивидуальный подход к каждой задаче. Созданные онтологические модели предприятий могут стать основой для создания «цифровых двойников» предприятий, применимых как в оперативном управлении, так и для моделирования процессов развития предприятий.

Благодарности

Статья подготовлена на основе материалов научных исследований в рамках Госбюджетной темы ИПУСС РАН № АААА-А19-119030190053-2 «Разработка и исследование методов и средств аналитического конструирования, компьютерного представления знаний, вычислительных алгоритмов и мультиагентных технологий в задачах оптимизации процессов управления сложными системами».

Список источников

- [1] **Zhong, R.Y.** Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review / R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, S. Newman // *Frontiers of Mechanical Engineering*. - 2016. - P. 616-630.
- [2] **Tao, F.** Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data / F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, F. Sui // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2017. - P. 3563-3576.
- [3] **Leitao, P.** Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems / P. Leitao, S. Karnouskos, L. Ribeiro, J. Lee, T. Strasser, A. W. Colombo // *Proceedings of the IEEE*. - 2016. - № 104(5). - P. 1086-1101.
- [4] **Городецкий, В.И.** Современное состояние и перспективы промышленных применений многоагентных систем / В. И. Городецкий, О. Л. Бухвалов, П. О. Скобелев, И. В. Майоров // *Управление большими системами: сборник трудов*. - 2017. - № 66. - С. 94-157.
- [5] **Ржевский, Г.** Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания сложных систем управления предприятиями / Г. Ржевский, П.О. Скобелев. - Самара: Офорт, 2015. - 290 с.
- [6] **Скобелев, П.О.** Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений / П.О. Скобелев // *Автометрия*. - 2002. - Т. 38. - № 6. - С. 45-61.
- [7] **Виттих, В.А.** Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах / В. А. Виттих, П. О. Скобелев // *Автоматика и телемеханика*. - 2003. - №1. - С. 162-169.
- [8] **Виттих, В.А.** Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени / В. А. Виттих, П. О. Скобелев // *Автометрия*. - 2009. - Т.45. - № 2. - С. 78-87.
- [9] **Skobelev, P.** Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management / P. Skobelev // *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*. - Elsevier. - 2015. - P. 207-230.
- [10] **Shoham, Y.** Multi-agent systems: Algorithmic, Game Theoretic and Logical Foundations / Y. Shoham, K. Leyton-Brown. - Cambridge University Press, 2009. - 513 p.

- [11] **Easley, D.** Networks, Crowds, and Markets: Reasoning about a Highly Connected World / D. Easley, J. Kleinberg. – Cambridge University Press, 2010. – 744 p.
- [12] **Скобелев, П.О.** Ситуационное управление и мультиагентные технологии: коллективный поиск согласованных решений в диалоге / П.О. Скобелев // *Онтология проектирования*. – 2013. – №2(8). – С.26-48.
- [13] **Лазарев, А.А.** Теория расписаний. Задачи и алгоритмы / А.А. Лазарев, Е.Р. Гафаров. – М.: МГУ, 2011. – 222 с.
- [14] **Gruninger, M.** The process specification language (PSL): theory and applications / M. Gruninger, C. Menzel // *AI Magazine*. – 2003. – Vol. 24(3). – P. 63-74.
- [15] **Lemaignan, S.** MASON: A proposal for an ontology of manufacturing domain / S. Lemaignan, A. Siadat, J.Y. Dantan, A. Semenenko // *Proceedings - DIS 2006: IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems - Collective Intelligence and Its Applications*. – 2006. – P. 195-200.
- [16] **Borgo, S.** Foundations for a Core Ontology of Manufacturing / S. Borgo, P. Leitão // *Ontologies. Integrated Series in Information Systems*. – 2007. – P. 751-775.
- [17] **Cândido, G.** A multiagent control system for shop floor assembly / G. Cândido, J. Barata // *HoloMAS: International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. – 2007. – P. 293-302.
- [18] **Ризванов, Д.А.** Интеллектуальная поддержка принятия решений при управлении ресурсами сложных систем на основе многоагентного подхода / Д.А. Ризванов, Н.И. Юсупова // *Онтология проектирования*. – 2015. – №3(17). – С. 297-312. – DOI:10.18287/2223-9537-2015-5-3-297-312.
- [19] **Vrba, P.** Semantic Extension of Agent-Based Control: The Packing Cell Case Study / P. Vrba, M. Radaković, M. Obitko, V. Mařík. – 2009. – P. 47-60.
- [20] **Järvenpää, E.** The development of an ontology for describing the capabilities of manufacturing resources / E. Järvenpää, N. Siltala, O. Hylli, M. Lanz // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2019. – Vol. 30. – P. 959-978.
- [21] **Backhaus, J.** Digital description of products, processes and resources for task-oriented programming of assembly systems / J. Backhaus, G. Reinhart // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2015. – Vol. 28(8). – P. 1787-1800.
- [22] **Usman, Z.** A Manufacturing Core Concepts Ontology for Product Lifecycle Interoperability / Z. Usman, R. Young, N. Chungoora, C. Palmer, K. Case, J. Harding // *Enterprise Interoperability. IWEI 2011. Lecture Notes in Business Information Processing*. – 2011. – Vol 76. – P. 5-18.
- [23] **Minhas, S.** Ontology Based Environmental Knowledge Management - A System to Support Decisions in Manufacturing Planning / S. Minhas, U. Berger // *6th International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development*. – 2014. – P. 397-404.
- [24] **Sormaz, D.** SIMPM – Upper-level ontology for manufacturing process plan network generation / D. Sormaz, A. Sarkar // *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. – 2019. – Vol. 55. – P. 183-198.
- [25] **Giovannini, A.** Knowledge-based system for supporting manufacturing sustainability / A. Giovannini, A. Aubry, H. Panetto, M. Dassisti, H. El Haouzi // *Annual Reviews in Control*. – 2012. – Vol. 36. – № 2. – P. 309-317.
- [26] **Chungoora, N.** A model-driven ontology approach for manufacturing system interoperability and knowledge sharing / N. Chungoora, R.I. Young, G. Gunendran, C. Palmer, Z. Usman, N.A. Anjum, A.F. Cutting-Decelle, J.A. Harding, K. Case // *Computers in Industry*. – 2013. – Vol. 64. – № 4. – P. 392-401.
- [27] **Chandrasegaran, K.** The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems / K. Chandrasegaran, K. Ramani, R.D. Sriram, I. Horváth, A. Bernard, R.F. Harik, W. Gao // *Computer-Aided Design*. – 2013. – Vol. 45(2). – P 204-228.
- [28] **Матюшин, М.М.** Методы и средства построения онтологий для визуализации связанных информационных объектов произвольной природы в сложных информационно-аналитических системах / М.М. Матюшин, Т.Г. Вакурина, В.В. Котеля, П.О. Скобелев, О.И. Лахин, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, А.И. Носкова // *Информационно-управляющие системы*. – 2014. – № 2. – С. 9-17.
- [29] **Скобелев, П.О.** Планирование сеансов связи между микроспутниками и сетью наземных станций с использованием мультиагентных технологий / П.О. Скобелев, А.Б. Иванов, Е.В. Симонова, В.С. Травин, А.А. Жилиев // *Онтология проектирования*. – 2014. – №2(12). – С. 92-100.
- [30] **Скобелев, П.О.** Оперативное управление ресурсами цехов предприятий на основе мультиагентного подхода / П.О. Скобелев, А.А. Жилиев, И.В. Майоров, В.Г. Елисеев, В.С. Травин, Е.В. Симонова // *Труды XIX Международ. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»*. – 2017. – С. 474-485.

ONTOLOGY AS A TOOL FOR CREATING OPEN MULTI-AGENT RESOURCE MANAGEMENT SYSTEMS

A.A. Zhilyaev

SEC Smart Solutions Ltd., Samara, Russia

Institute of Control of Complex Systems RAS, Samara, Russia

zhilyaev@smartsolutions-123.ru

Abstract

This article proposes to use an ontological model of planning object for flexible configuration of multi-agent enterprise resource management systems. It presents the basic ontology of resource planning and gives examples of its extension for resource management in different applications. The concept «Task» is considered as a key concept: a formalized description of various classes of tasks based on this concept allows to create a relatively universal agent and customize it to the specific manufacturing area. On the basis of ontology, an enterprise knowledge base, which contains examples of concepts and relationships, is created. The author introduces new classes of agents for demand-resource networks and proposes a new method of multi-agent planning using the enterprise knowledge base. The proposed approach has been applied in several areas through the developed software suite. It is shown that the using of ontologies allows improving the quality and efficiency of planning by taking into account additional factors on the fly, reduce the costs of creating and supporting multi-agent systems, as well as reduce the time and risks of development.

Key words: *resource management, ontology, multi-agent technology, planning, adaptability, flexible manufacturing.*

Citation: Zhilyaev AA. Ontology as a tool for creating open multi-agent resource management systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(2): 261-281. - DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-261-281.

Acknowledgment

The article was prepared on the basis of research materials on the topic № AAAA-A19-119030190053-2 "Development and research of methods and tools for analytical design, computer representation of knowledge, computational algorithms and multi-agent technologies in the tasks of the complex systems control".

References

- [1] **Zhong RY, Xu X, Klotz E, Newman S.** Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Frontiers of Mechanical Engineering*; 2016: 616-630.
- [2] **Tao F, Cheng J, Qi Q, Zhang M, Zhang H, Sui F.** Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*; 2017: 3563-3576.
- [3] **Leitao P, Karnouskos S, Ribeiro L, Lee J, Strasser T, Colombo AW.** Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems. *Proceedings of the IEEE*; 2016; № 104(5): 1086-1101.
- [4] **Gorodetsky VI, Bukhvalov OL, Skobelev PO, Mayorov IV.** The current state and prospects of industrial applications of multi-agent systems [In Russian]. *Control of large systems: collection works*; 2017; 66: 94-157.
- [5] **Rzevski G, Skobelev P.** Managing complexity, WIT Press, London-Boston; 2014.
- [6] **Skobelev P.** Open multi-agent systems for rapid processing of information in decision-making processes [In Russian]. *Autometry*; 2002; 38; 6: 45-61.
- [7] **Vittykh VA, Skobelev PO.** Multi-agent interaction models for building networks of needs and opportunities in open systems [In Russian]. *Automation and Telematics*; 2003; 1: 62-169.
- [8] **Vittykh VA, Skobelev PO.** The method of conjugate interactions to control the distribution of resources in real time [In Russian]. *Autometry*; 2009; 45; 2: 78-87.
- [9] **Skobelev P.** Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*. Elsevier; 2015: 207-230.
- [10] **Shoham Y, Leyton-Brown K.** Multi-agent systems: Algorithmic, Game Theoretic and Logical Foundations. Cambridge University Press; 2009. – 513 p.
- [11] **Easley D, Kleinberg J.** Networks, Crowds, and Markets: Reasoning about a Highly Connected World. Cambridge University Press; 2010. – 744 p.
- [12] **Skobelev PO.** Situational management and multi-agent technologies: a collective search for consistent solutions in the dialogue [In Russian]. *Ontology of Designing*; 2013; 2(8): 26-48.

- [13] **Lazarev AA, Gafarov ER.** Scheduling theory. Tasks and algorithms [In Russian]. - Moscow: Moscow State University publ.; 2011. – 222 p.
- [14] **Gruninger M, Menzel C.** The process specification language (PSL) theory and applications. *AI Magazine*; 2003; 24(3): 63-74.
- [15] **Lemaignan S, Siadat A, Dantan JY, Semenenko A.** MASON: A proposal for an ontology of manufacturing domain. *Proceedings - DIS 2006: IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems - Collective Intelligence and Its Applications*; 2006: 195-200.
- [16] **Borgo S, Leitão P.** Foundations for a Core Ontology of Manufacturing. *Ontologies. Integrated Series in Information Systems*; 2007: 751-775.
- [17] **Cândido G, Barata J.** A multiagent control system for shop floor assembly. *HoloMAS: International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*; 2007: 293-302.
- [18] **Rizvanov DA, Yusupova NI.** Intelligent decision support for resource management of complex systems based on multi-agent approach [In Russian]. *Ontology of Designing*; 2015; 3(17): 297-312. - DOI:10.18287/2223-9537-2015-5-3-297-312.
- [19] **Vrba P, Radaković M, Obitko M, Mařík V.** Semantic Extension of Agent-Based Control: The Packing Cell Case Study; 2009: 47-60.
- [20] **Järvenpää E, Siltala N, Hylli O, Lanz M.** The development of an ontology for describing the capabilities of manufacturing resources. *Journal of Intelligent Manufacturing*; 2019; 30: 959-978.
- [21] **Backhaus J, Reinhart G.** Digital description of products, processes and resources for task-oriented programming of assembly systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*; 2015; 28(8): 1787-1800.
- [22] **Usman Z, Young R, Chungoora N, Palmer C, Case K, Harding J.** A Manufacturing Core Concepts Ontology for Product Lifecycle Interoperability. *Enterprise Interoperability. IWEI 2011. Lecture Notes in Business Information Processing*; 2011; 76: 5-18.
- [23] **Minhas S, Berger U.** Ontology Based Environmental Knowledge Management - A System to Support Decisions in Manufacturing Planning. *6th International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development*; 2014: 397-404.
- [24] **Sormaz D, Sarkar A.** SIMPM – Upper-level ontology for manufacturing process plan network generation. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*; 2019; 55: 183-198.
- [25] **Giovannini A, Aubry A, Panetto H, Dassisti M, Haouzi H.** Knowledge-based system for supporting manufacturing sustainability. *Annual Reviews in Control*; 2012; 36(2): 309-317.
- [26] **Chungoora N, Young RI, Gunendran G, Palmer C, Usman Z, Anjum NA, Cutting-Decelle AF, Harding JA, Case K.** A model-driven ontology approach for manufacturing system interoperability and knowledge sharing. *Computers in Industry*; 2013; 64(4): 392-401.
- [27] **Chandrasegaran K, Ramani K, Sriram RD, Horváth I, Bernard A, Harik RF, Gao W.** The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design. *Computer-Aided Design*; 2013; 45(2): 204–228.
- [28] **Matyushin MM, Vakurina TG, Kotela VV, Skobelev PO, Lahin OI, Kozhevnikov SS, Simonova EV, Noskova AI.** Methods and tools for the construction of ontologies for visualization of related information objects of arbitrary nature in complex information and analytical systems [In Russian]. *Information management systems*; 2014; 2: 9-17.
- [29] **Skobelev P, Ivanov A, Simonova E, Travin V, Zhilyaev A.** Multi-agent scheduling of communication sessions between microsatellites and ground stations network. *Ontology of Designing*; 2014; 2(12): 92-100.
- [30] **Skobelev PO, Zhilyaev AA, Mayorov IV, Eliseev VG, Travin VS, Simonova EV.** Operational resource management of enterprises on the basis of multi-agent approach [In Russian]. *Proceedings of the XIX International Conference "Problems of control and modeling in complex systems"*; 2017: 474-485.

Сведения об авторе



Жиляев Алексей Александрович, 1992 г. рождения. Окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва в 2014 г. Старший программист в научно-производственной компании «Разумные решения». В списке научных трудов более 15 работ в области разработки мультиагентных систем управления ресурсами.

Aleksey Aleksandrovich Zhilyaev (b. 1992) graduated from the Samara State Aerospace University in 2014. Works as a senior software developer in SEC «Smart Solutions». He is co-author of about 15 scientific articles in the field of development of multi-agent systems for resource management.