

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
«Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С. П. Королева»  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»

*На правах рукописи*

**Жиляев Алексей Александрович**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА  
ПОСТРОЕНИЯ «ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ» ПРОЦЕССОВ  
УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯМИ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЙ  
И МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(технические науки)

**Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
Скобелев Петр Олегович

Самара – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Анализ задачи построения «цифровых двойников» процессов управления предприятиями .....	11
1.1 Понятие «цифрового двойника» предприятия .....	11
1.2 Задача управления ресурсами предприятия в реальном времени .....	14
1.3 Обзор применений онтологий в задачах управления ресурсами.....	19
1.4 Обзор современных подходов и методов решения задачи планирования ресурсов .....	23
1.5 Сравнение технологий для создания ЦД процессов управления предприятиями.....	26
1.6 Выводы .....	31
2 Онтологический подход к описанию объекта управления .....	33
2.1 Использование онтологий при решении задачи планирования.....	33
2.2 Разработка базовой онтологии управления ресурсами.....	35
2.3 Разработка прикладных онтологий.....	41
2.4 Построение онтологической модели предприятия .....	43
2.5 Методика онтологического описания модели объекта планирования.....	45
2.6 Выводы .....	49
3 Разработка мультиагентного метода планирования .....	50
3.1 Мультиагентный подход к решению задачи планирования.....	50
3.2 Базовые классы агентов .....	52
3.3 Развитие и модификация модели ПВ-сети и метода компенсаций .....	57
3.4 Алгоритм подбора комбинаций ресурсов .....	62
3.5 Выводы .....	63
4 Разработка комплекса инструментальных средств для создания ЦД предприятий.....	65
4.1 Конструктор онтологий и баз знаний предприятия .....	66
4.2 Конструктор сцены.....	68
4.3 Модуль МАС управления ресурсами .....	71
4.4 Выводы .....	75
5 Применение разработанного комплекса инструментальных средств для создания ЦД предприятий.....	77
5.1 Разработка прототипа ЦД агрегатно-сборочного производства на авиастроительном предприятии .....	77
5.1.1 Постановка задачи.....	77
5.1.2 Функциональные возможности системы .....	80
5.1.3 Особенности архитектуры системы .....	81
5.1.4 Сценарии использования.....	82
5.2 Разработка прототипа ЦД сборки грузовых электромобилей.....	86

5.2.1	Постановка задачи.....	86
5.2.2	Функциональные возможности системы.....	88
5.2.3	Сценарии использования.....	89
5.3	Разработка прототипа ЦД бурения скважин.....	92
5.3.1	Постановка задачи.....	92
5.3.2	Функциональные возможности системы.....	93
5.3.3	Сценарии использования.....	94
5.4	Разработка прототипа ЦД посевов растений для решения задач точного земледелия .....	98
5.4.1	Постановка задачи.....	98
5.4.2	Расширение базовой онтологии управления ресурсами .....	100
5.4.3	Функциональные возможности системы.....	102
5.4.4	Сценарии использования.....	103
5.5	Разработка прототипа ЦД целевого применения группировки космических аппаратов ДЗЗ .....	106
5.5.1	Постановка задачи.....	106
5.5.2	Функциональные возможности системы.....	109
5.5.3	Особенности архитектуры системы .....	109
5.5.4	Сценарии использования.....	110
5.6	Выводы .....	114
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	117
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	118
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	119
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРИМЕР ЗАГРУЖАЕМОЙ МОДЕЛИ ПРЕДПРИТИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ СБОРКИ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ .....	128
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ НА ЭВМ .....	132
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ НА ЭВМ .....	133
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЖИЛЯЕВА А.А. В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ САМАРСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.....	135
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЖИЛЯЕВА А.А. В ООО «НПК «РАЗУМНЫЕ РЕШЕНИЯ».....	136
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЖИЛЯЕВА А.А. В ООО «НПК «СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ».....	137

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность проблемы.** Понятие «цифрового двойника» (ЦД) возникло около 20 лет назад в работах по кибер-физическим системам в рамках концепции формирующейся «Индустрии 4.0» [69, 81] для представления всего комплекса знаний и данных о сложных технических объектах, позволяющих планировать, моделировать и прогнозировать поведение объектов на основе получаемых в реальном времени данных об их состоянии.

Сегодня концепция «Цифрового двойника» привлекает все большее внимание ведущих компаний: Gartner включила ЦД в список наиболее перспективных технологий 2019 года [67], крупнейшие разработчики программного обеспечения, такие как Siemens, IBM, Oracle, SAP SE, Autodesk и ANSYS, активно занимаются созданием собственных продуктов на основе ЦД.

Рынок ЦД стремительно развивается: прирост годового оборота в этой области оценивается более чем в 20% в год, с ростом в абсолютном выражении от 3.1 млрд. USD в 2020 году – к 48.2 млрд. USD в 2025 году. Интерес к этой теме растет и в научной среде: по данным Web of Science, количество упоминаний ЦД в публикациях за последние 4 года увеличилось почти в 10 раз [74].

Однако, если первые ЦД представляли собой виртуальные модели различных технических систем и их компонентов, то в последнее время начали создаваться комплексные ЦД процессов управления предприятиями (далее – ЦД предприятий), включающие процессы распределения, планирования и контроля использования ресурсов. Одним из таких примеров является проект разработки ЦД почтовой службы Франции, в рамках которого решалась также задача проектирования взаимодействия людей и роботов [82].

Наиболее современное представление о ЦД дает следующее определение: «ЦД является новой парадигмой цифровизации и автоматизации, которая связывает виртуальные модели объектов с интеллектуальными возможностями принятия решений» [74].

Такое понимание ЦД отражает суть идущей конвергенции различных информационных технологий для построения целостного виртуального образа каждого объекта, работающего в реальном времени параллельно с реальным объектом.

Для достижения этой цели объединяются возможности кибер-физических систем (КФС), использующих датчики, вычислительные модули, мобильные сети передачи данных и исполнительные механизмы, и компьютерных моделей объекта (математических, имитационных и др.), отражающих структуру и поведение объекта и имеющих обратную связь для самосинхронизации с состоянием реальных объектов.

В нашей стране исследования по созданию ЦД объектов ведутся в СПбПУ под руководством проф. А. Боровкова для автомобильной промышленности и ряда других

применений, в которых ключевое значение приобретает интеграция полипредметных знаний об объекте на всех стадиях жизненного цикла каждого экземпляра изделия [3].

В развитие этого направления в настоящей работе под ЦД предприятия предложено понимать интеллектуальную кибер-физическую систему (ИКФС), объединяющую возможности кибер-физических систем и интеллектуальных систем поддержки принятия решений, обеспечивающую управление задачами и ресурсами предприятия в реальном времени, а также моделирование его работы и синхронизацию модели предприятия с состоянием реального предприятия за счет обработки непредвиденно возникающих и рассинхронизирующих планы событий, таких, как поступление нового заказа, поломка оборудования, задержка поставки материалов, изменение технологий работы, расширение парка станков, ввод новых смен и др.

Для реализации ЦД процессов управления предприятиями в работе предложено использование онтологий и мультиагентных технологий, которые позволят не только повысить качество и эффективность управления предприятием по сравнению с традиционными ERP системами, но и автоматизировать процессы разработки и дать конечным пользователям возможность настраивать логику принятия решений агентами на специфику работы своего предприятия, сокращая сроки и стоимость создания и эксплуатации такого рода систем.

Цель применения онтологий, создаваемых в рамках Semantic Web и получивших развитие в работах Т. Gruber, В. Хорошевского, Т. Гавриловой, С. Смирнова и ряда других авторов [8, 27, 50], – создание формализованной модели знаний о предметной области «Управление ресурсами предприятия», которая далее может расширяться на сферу деятельности предприятия и порождать его онтологическую модель, используемую в унифицированной мультиагентной системе (МАС) для настройки на предметную область и специфику работы предприятия.

К настоящему времени уже создан ряд онтологий в промышленности, строительстве, сельском хозяйстве и других областях, однако, эти онтологии используются преимущественно в целях обеспечения интеллектуального поиска и аннотирования информации и не могут применяться в качестве порождающих моделей при построении ЦД предприятий, требующих спецификации доступных кадровых, производственных и других ресурсов.

Мультиагентные технологии развиваются в работах М. Wooldridge, N. Jennings, A. Tambe, Н. Brussel, P. Valkenaers, V. Marik, P. Verba, P. Leitaо, G.Rzevski, В. Городецкого, В. Тарасова уже несколько десятилетий [84, 88]. Для мультиагентного решения задач управления ресурсами В. Виттихом и П. Скобелевым была предложена концепция сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей) на основе виртуального рынка [7], которая была развита в работах Е. Клейменовой, О. Лахина, И. Майорова и А. Лады для решения конкретных прикладных задач управления ресурсами [12, 14, 23]. В рамках этой концепции расписание представляется в виде динамической

сети связей между агентами потребностей и возможностей, находящихся, находящихся в отношениях конкуренции и кооперации. Важным теоретическим результатом, полученным в работах Y. Shoham и K. Leyton-Brown [75], было доказательство эквивалентности метода линейного программирования и метода виртуального рынка в задаче о назначениях, однако задачи планирования и оптимизации ресурсов при этом не рассматривались. Использование виртуального рынка для проведения аукционов между агентами предложено в работах T. Sandholm и V. Lesser [71]. В работах А. Фрадкова, О. Граничина и Н. Амелиной доказана эффективность мультиагентных методов локального голосования для получения глобального оптимума при решении задач динамического распределения нагрузки в сетях с переменной топологией и помехами [1, 29].

Однако задачи построения ЦД предприятий, сочетающих в себе планирование и контроль за исполнением планов в МАС по событиям в реальном времени, а также моделирование процессов управления, не ставились.

Кроме того, опыт разработки ПВ-сетей для различных применений показал существенную сложность и трудоемкость этого процесса при реализации конкретных классов агентов и протоколов их взаимодействий. Использование онтологических моделей для отделения исходного кода МАС от предметной области и ее настройки на специфику работы предприятия может сократить сроки и стоимость разработки и эксплуатации такого рода систем.

В этой связи становится актуальной задача разработки методов и средств создания ЦД предприятий на основе онтологий и мультиагентных технологий, пригодных как для планирования, так и моделирования работы предприятий, а также автоматизирующих процессы их настройки на предметную область и специфику работы предприятий.

**Цели и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка методов и средств построения «цифровых двойников» процессов управления предприятиями на основе онтологий и мультиагентных технологий для повышения оперативности управления ресурсами, а также сокращения трудоемкости, стоимости и сроков создания «цифровых двойников» предприятий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Выполнить системный анализ особенностей задачи управления производственными ресурсами, которые должны учитываться при создании «цифровых двойников» предприятий.
- 2) Разработать базовую онтологию управления ресурсами и методику построения онтологических моделей «цифровых двойников» предприятий, позволяющую

учитывать особенности производственной области предприятия при планировании его деятельности.

- 3) Модифицировать базовые классы агентов ПВ-сети и протоколы их взаимодействия для решения задачи поиска баланса интересов (консенсуса) агентов при возникновении событий рассогласования состояния «цифрового двойника» и реального предприятия.
- 4) Разработать комплекс инструментальных средств для автоматизации процесса создания программных компонент «цифровых двойников» предприятий на основе онтологий и мультиагентных технологий.
- 5) Провести апробацию разработанных методов и средств построения «цифровых двойников» в задачах управления ресурсами различных предприятий.

**Методы исследования и достоверность результатов.** В качестве методологической основы решения указанных задач в диссертационной работе использованы методы системного анализа, методы исследования операций и теории расписаний, модели и методы построения ПВ-сетей, теория множеств, методы формализованного представления знаний и построения онтологий для поддержки принятия решений. Достоверность результатов обеспечивается применением классических методов в новой области ЦД, сопоставлением классических и разработанных методов и средств построения ЦД на модельных и реальных данных, практическим использованием результатов применения ЦД для решения задач управления целевым применением космических аппаратов, сборкой самолетов и электромобилей, бурением нефтяных скважин, выращиванием посевов растений, сравнением результатов моделирования с результатами, полученными квалифицированными специалистами предприятий.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются производственные системы, предметом – методы и средства принятия решений по управлению ресурсами на основе онтологий и мультиагентных технологий.

**Научная новизна.** В диссертации получены следующие новые научные результаты:

- 1) Предложена методика построения ЦД предприятий в виде ИКФС, синхронизируемых с реальным предприятием по событиям в реальном времени, позволяющая повысить оперативность управления и сократить сроки создания ЦД.
- 2) Разработана базовая онтология управления ресурсами для создания онтологических моделей предприятий, позволяющих настраивать ЦД на специфику производственного предприятия без перепрограммирования.
- 3) Модернизирована модель ПВ-сети за счет введения новых классов онтологически-настраиваемых агентов и методов (протоколов) их взаимодействия для автоматизации процессов создания ЦД предприятий.

- 4) Разработаны инструментальные средства построения ЦД предприятий позволяющие создавать и развивать ЦД пользователями-непрограммистами.
- 5) На основе разработанного инструментального комплекса впервые созданы прикладные ЦД для различных предприятий.

**Практическая значимость.** Результаты работы позволяют:

- 1) Решить сложные задачи управления ресурсами предприятий, в частности задачи управления сборкой самолетов и электромобилей, бурением скважин, целевым применением группировки космических аппаратов и выращиванием посевов сельскохозяйственных культур.
- 2) Снизить трудоемкость, стоимость и сроки разработки и эксплуатации ЦД предприятий.
- 3) Обеспечить открытость создаваемых ЦД процессов управления предприятиями за счет расширения предметных онтологий и модификации онтологических моделей предприятий.
- 4) Повысить оперативность, гибкость и эффективность управления ресурсами, а также снизить риск возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором.
- 5) Повысить коэффициент использования программных компонент при разработке новых ЦД процессов управления предприятиями.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) Методика построения ЦД процессов управления предприятиями в виде ИКФС управления ресурсами, синхронизируемых по событиям.
- 2) Базовая онтология управления ресурсами ЦД для построения онтологических моделей предприятия.
- 3) Унифицированная МАС, расширенная новыми классами агентов и протоколами их взаимодействия в ЦД, обеспечивающая настройку на предметную область посредством загрузки онтологической модели предприятия.
- 4) Комплекс инструментальных средств для автоматизации процесса создания программных компонент ЦД предприятий.
- 5) Прототипы ЦД для управления целевым применением группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ), агрегатно-сборочным производством самолетов и электромобилей; бурением нефтяных скважин и выращиванием посевов сельскохозяйственных культур.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использованы при проектировании, разработке и внедрении интеллектуальных систем управления производством самолета МС-21 в ПАО «Иркут» (г. Иркутск), управления сборкой грузовых электромобилей с

применением робототехнических комплексов для компании «ТРА» (г. Санкт-Петербург), управления группировкой космических аппаратов для предприятия «СТТ Групп», управления бурением нефтяных скважин для компании «Газпромнефть-Ямал» (г. Тюмень), а также управления сельскохозяйственным предприятием точного земледелия на основе ЦД посевов растений для ОАО «Рассвет» (Ростовская область).

Результаты использованы в проектах Минобрнауки РФ 14.576.21.0012 – уникальный ID номер RFMEFI57614X0012, выполненному в ООО "Научно-производственная компания "Разумные решения", а также № 075-15-2019-1691 – уникальный ID номер RFMEFI60419X0224, выполненному в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Результаты работы используются в учебном процессе Самарского университета в курсе «Современные технологии навигации и управления в космосе» для подготовки магистров по направлению 24.04.01 Ракетные комплексы и космонавтика по профилю «Перспективные космические технологии и эксперименты в космосе».

**Апробация работы.** Основные положения и научные результаты исследований докладывались на следующих научно-технических конференциях: Всероссийская конференция «Инфокоммуникационные технологии в научных исследованиях» (г. Таруса, 14 – 16 ноября 2012 г.); XII Королевские чтения: Международная молодёжная научная конференция (г. Самара, 1 – 3 октября 2013 г.); Международная научно-техническая конференция «Перспективные информационные технологии» (г. Самара, 4 – 6 декабря 2013 г.); XVI Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 30 июня – 3 июля 2014 г.); VII Российская мультikonференция по проблемам управления (г. Санкт-Петербург, 7 – 9 октября 2014 г.); Международная научно-практическая конференция «Теория активных систем» (г. Москва, 17 – 19 ноября 2014 г.); Международная конференция International Conference on Complex Systems in Business, Administration, Science and Engineering (New Forest, UK, 12 – 14 may, 2015); Восьмая всероссийская мультikonференция по проблемам управления (г. Геленджик, 28 сентября – 3 октября 2015 г.); XVIII Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 20 – 25 сентября 2016 г.); XII International Symposium «Intelligent Systems» (г. Москва, 5 – 7 октября 2016 г.); XIX Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 12 – 15 сентября 2017 г.); Десятая всероссийская мультikonференция по проблемам управления (г. Геленджик, 25 – 30 сентября 2017 г.); 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (Funchal, Portugal, 16 – 18 January, 2018); International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics and Optimization (Prague, Czech Republic, 9 – 21 May, 2018); 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (Valetta, Malta, 22 – 24 February, 2020).

**Основные публикации.** Результаты диссертации опубликованы в 20 научных работах, из них 5 публикации опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, 6 в изданиях, индексируемых в Scopus, 9 работ в трудах международных и всероссийских конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 92 источника. Текст занимает 127 страниц основной части, содержит 79 рисунков, 11 таблиц и 6 приложений объемом 10 страниц.

# 1 АНАЛИЗ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ «ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ» ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯМИ

## 1.1 Понятие «цифрового двойника» предприятия

Понятие «цифрового двойника» (ЦД) в последнее десятилетие стремительно входит в науки об управлении и обработке данных [3, 43, 47, 49].

Общепринятых определений ЦД еще не выработано (в настоящее время ведется разработка стандарта ISO 23247 «Digital Twin framework for manufacturing»), однако чаще всего под «цифровым двойником» объекта понимают некоторый набор его виртуальных (цифровых) моделей, используемый для моделирования или прогнозирования поведения объекта в будущем. При этом на практике выделяют следующие ключевые свойства ЦД: 1) быть виртуальным «представителем» объекта, способным замещать его при планировании и моделировании; 2) обеспечивать непрерывную синхронизацию своего состояния с состоянием реального объекта; 3) поддерживать автономность работы относительно объекта [32].

По определению IBM UK Technical Consultancy Group, ЦД – это динамическое виртуальное представление физического объекта или системы, обычно на нескольких этапах его жизненного цикла [79]. Он использует реальные данные, имитационные модели или модели машинного обучения в сочетании с анализом данных, чтобы обеспечить понимание, обучение и рассуждения. По своему определению, ЦД могут использоваться для ответа на вопросы «что, если» и должны представлять свои идеи интуитивно понятным способом для конкретного экземпляра объекта, т.е. фундаментальная цель ЦД всегда состоит в том, чтобы моделировать поведение систем реального мира и позволить людям принимать лучшие решения.

При создании ЦД, как правило, не ставится задача исчерпывающего описания объекта или протекающих в нем процессов с первых шагов: ЦД лишь приближенно описывает тот или иной аспект физического объекта или процесса, и строится для того, чтобы с его помощью можно было решать конкретный набор прикладных задач и постепенно развивать и наращивать сложность используемых моделей объектов, интегрируя разнородные знания об объекте.

В частности, ЦД может использоваться для объединения возможностей кибер-физических систем и компьютерных моделей объекта управления. Кибер-физические системы (от англ. cyber-physical systems) уже сами по себе отличает тесное взаимодействие между вычислительными процессами и процессами физическими, но в последние годы эти системы получили дополнительный импульс в развитии за счет повсеместного внедрения Интернета вещей (IoT - Internet of Things) – возможности подключения различных устройств к общей

информационной сети. Используя IoT-технологии, можно создавать интеллектуальные приложения, помогающие управлять ресурсами и повышать эффективность их использования.

Именно развитие и объединение автоматизированных измерений, вычислительных, управляющих и коммуникационных возможностей КФС совместно с компьютерными моделями и привело к появлению концепции ЦД объекта управления.

Наибольшее распространение ЦД, создаваемые на базе КФС, получили в современных производственных системах [81] – как новый тип систем Industry 4.0, объединяющих в себе датчики, вычислительные, коммуникационные и управляющие компоненты, средства сетевых взаимодействий и исполнительные механизмы, а также компьютерные модели объектов [70, 82]. Базовая архитектура КФС представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Архитектура типовой КФС

Одной из задач, решаемых с помощью ЦД, является принятие решений в режиме реального времени, что должно позволять лицам, принимающим решения, быстро понять возможные последствия любых изменений, происходящих в любой точке жизненного цикла продукта, системы или организации.

Пока ЦД основаны преимущественно на использовании данных: представление реального мира (модельные данные, получаемые от датчиков) является ключом к моделированию реального мира. Данные должны быть визуализированы, чтобы предоставить точную и своевременную информацию для моделирования и последующего принятия решений.

В ходе исследования рассмотренных подходов к построению ЦД процессов управления ресурсами были выделены следующие их основные задачи и функции:

- описывать организацию предприятия, бизнес-процессы или технологические процессы,
- вести реестр описаний классов задач каждого процесса,
- специфицировать изделия или сервисы, технологические процессы и необходимые ресурсы для исполнения каждой задачи,
- строить планы работы предприятия до уровня каждого сотрудника,

- оптимизировать использование ресурсов (пока есть время);
- вести мониторинг и контролировать исполнение планов,
- моделировать варианты действий на возможные события в режиме «Что будет, если ...?».,
- оценивать эффективность работы предприятия в реальном времени,
- синхронизировать состояния ЦД и реального предприятия путем обработки событий и выдачи предложений к планам работы сотрудников.

Возможная структура ЦД является многоуровневой – например, показанная на рисунке 1.2 архитектура содержит семь уровней (строки) управления информацией и три сквозных уровня, гарантирующих, что ЦД интегрирован, защищен и соответствует политикам обеспечения качества, точности и достоверности данных [79].



Рисунок 1.2 – Пример многоуровневой архитектуры ЦД

Как уже было отмечено выше, изначально ЦД строились только для сложных инженерных и природных объектов, но в последнее время начали создаваться ЦД процессов управления. При этом в тенденциях построения ЦД, наряду с полноценным использованием технологий Industry 4.0, все чаще обсуждается необходимость перехода к новому укладу, называемому Industry 5.0, состоящего в цифровизации знаний и создании цифровых эко-систем колоний автономных систем искусственного интеллекта для автоматизации процессов коллективного мышления и принятия решений в кооперации людей и роботов. Суть концепции Industry 5.0, по сравнению с концепцией Industry 4.0, состоит в переходе от «цифровой вещи» к «умной вещи» и, далее, «автономной вещи», а также в создании платформ их группового взаимодействия для поддержки конкуренции и кооперации между автономными интеллектуальными системами.

В настоящее время ЦД активно развиваются на стыке реальных и виртуальных миров в самых разных предметных областях: от космоса, автомобильной промышленности – к природным объектам, и могут обеспечить растущий уровень автономного поведения для разного

рода «умных устройств», способных к восприятию информации из внешней среды, коллективному принятию решений и взаимодействию с пользователями.

В перспективе при создании ЦД ожидается постепенный переход от цифровых теней (использующих только исторические данные и не позволяющих моделировать ситуации) к интегрированным компьютерным моделям (Pre-Digital Twin и Digital Twin) и далее к интеллектуальным системам, в которых появляются базы знаний, системы поддержки принятия решений, моделирования и машинного обучения (Adaptive Digital Twin, Intelligent и Cognitive Digital Twin).

## **1.2 Задача управления ресурсами предприятия в реальном времени**

Выше были выделены основные процессы управления предприятиями, в числе которых наиболее сложным процессом является решение задачи планирования ресурсов различных производственных и технических систем.

Сложность современных производственных и технических систем обусловлена не только увеличением количества входящих в их состав элементов и внутренних связей между ними, но и ростом неопределенности условий их функционирования. Способность быстро адаптироваться к происходящим изменениям становится важнейшей характеристикой, напрямую определяющей экономическую эффективность. Изменению могут быть подвержены не только численные параметры решаемой задачи, такие как число заказов и ресурсов, но и сами знания, лежащие в основе процессов принятия решений, например, сведения об изделиях и технологических процессах, возможностях применения ресурсов в контексте различных ситуаций и т.д.

Так, расписание агрегатной и окончательной сборки пассажирского самолета МС-21 в ПАО «Иркут» состоит из десятков тысяч связанных между собой операций, при выполнении которых задействованы десятки сборочных станций и сотни рабочих. При этом на предприятии одновременно ведется сборка нескольких экземпляров самолетов, а значит используемые при этом ресурсы должны разделяться между заказами в зависимости от загрузки и установленных сроков выпуска готовой продукции. Выполнение сборочных операций часто требует одновременного задействования группы исполнителей, планы работы которых должны быть согласованы между собой. Дополнительным фактором, повышающим связность элементов системы, является необходимость учета сроков поставки используемых при сборке изделия комплектующих от смежных подразделений и предприятий. В результате производственное расписание можно представить в виде множества взаимоувязанных планов отдельных участников производственного процесса (предприятий, цехов, рабочих и т.д.), между которыми должна поддерживаться постоянная координация вследствие возникновения различных

возмущающих событий, таких как поломка оборудования, невыход на работу сотрудника, отсутствие необходимых комплектующих, обнаружение брака, невыполнение или опоздание при выполнении запланированных работ.

Другим характерным примером сложного расписания является расписание целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ). В этом случае планирование заключается в определении совместной программы съемки наземных объектов группой КА, а также сброса полученных результатов на наземные пункты приема информации (ППИ) [24]. Задача планирования характеризуется большой размерностью (десятки КА и пунктов приема информации, вместе обслуживающие значительные по площади территории земной поверхности и обеспечивающие доставку информации тысячам потребителей), разнородностью технических характеристик бортовой аппаратуры, оперативностью принятия решений, сочетающейся с необходимостью обеспечения «консервативности» расписания (новое событие не должно вызывать пересчет всего расписания) и многокритериальностью. Наличие нескольких КА увеличивает количество потенциально возможных съемок наземных объектов, что приводит к увеличению числа альтернативных вариантов съемки объектов различными космическими аппаратами. При ограниченном количестве пунктов приема информации становится возможной ситуация, когда несколько космических аппаратов претендуют на передачу данных на один и тот же пункт приема информации [9]. Из-за ограничений бортового запоминающего устройства перед КА может дополнительно встать вопрос о выборе между съемкой очередного района или передачей уже отснятой информации. Вместе с тем, требования к экономической эффективности обуславливают необходимость формирования таких планов, реализация которых обеспечивает максимальную ценность информации о снятых объектах в условиях ограниченных возможностей бортового информационного комплекса КА по ее сбору, хранению и передаче [2].

Управление такими системами становится все более трудоемкой и комбинационной задачей. К настоящему времени разработано множество моделей, методов, алгоритмов и методик календарного планирования и диспетчеризации ресурсов [13]. Однако наличие высокой сложности и динамики производственных процессов, имеющих событийную природу, приводит к тому, что традиционные централизованные и последовательные вычислительные модели, методы и алгоритмы комбинаторного типа не позволяют эффективно решать указанные задачи с приемлемым качеством и в допустимые для практического применения сроки. Предлагаемые подходы должны поддерживать высокий уровень оперативности, гибкости и эффективности в принятии решений в режиме реального времени. Рассматриваемые системы планирования должны работать в условиях неопределенности, где непредвиденные события становятся скорее

нормой, чем исключением, а долгосрочное планирование – все менее продуктивным и эффективным [77].

Классификация задач планирования ресурсов предприятий должна позволить выделить схожие черты, по которым можно было бы создать базис из понятий и отношений предметной области, достаточных для описания целей, предпочтений и ограничений объекта планирования.

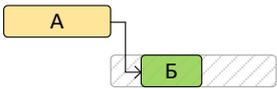
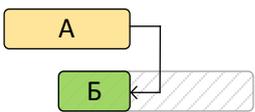
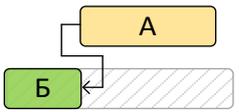
Проведенный анализ различных приложений для планирования показывает, что расписание работы предприятия обычно строится исходя из принятых на выполнение заказов, каждый из которых характеризуется применяемыми технологическими или бизнес-процессами, условиями для начала выполнения задач и ожидаемым результатом (продуктом или услугой) каждой задачи, предпочтениями по выбору ресурсов, а также принятыми нормами времени на выполнение работы. Все эти особенности предметной области предприятия обычно учитываются опытными диспетчерами в процессе планирования.

Процесс получения изделий представляется 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. Количество аспектов, необходимых для описания операции, зависит от её вида. 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 разделяемым ресурсом цеха, и т.д.

Продолжительность операции определяется её длительностью или 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, подвидами которого могут «окончание-начало», «начало-начало» (таблица 1.1) и др. 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, что ещё более сложно, выстраиваемыми динамически или по контексту ситуации, как например, при

строительстве нефтедобывающих скважин, когда в процессе выполнения плана появляется необходимость в выполнении вспомогательных операций, например, вследствие зажима инструмента.

Таблица 1.1 – Типы связей предшествования-следования между задачами

Тип связи	Отношение	Описание	Пример
<p>Окончание-Начало</p> 	<p>Б начинается после завершения А</p>	<p>Задача Б может начаться только после завершения задачи А.</p>	<p>«Покраска» (задача Б) не может начаться, пока не завершится задача «Сборка» (задача А)</p>
<p>А заканчивается перед началом Б</p>	<p>Б начинается после начала А</p>		
<p>Начало-Начало</p> 	<p>А начинается перед началом Б</p>	<p>Задача Б не может завершиться, пока не завершится задача А. При этом необязательно, чтобы обе задачи завершались одновременно. Задача Б может завершиться в любое время после завершения задачи А.</p>	<p>Для экономии времени установка электрооборудования может начаться до завершения прокладки кабелей. Но задача «Проложить проводку» (Задача Б) не может начаться, пока не начнется задача «Закрепить оборудование» (Задача А).</p>
<p>Окончание-Окончание</p> 	<p>Б заканчивается после завершения А</p>	<p>Задача Б не может завершиться, пока не завершится задача А. При этом необязательно, чтобы обе задачи завершались одновременно. Задача Б может завершиться в любое время после завершения задачи А.</p>	<p>Задача «Проверить работу оборудования» (Задача Б), не может завершиться, пока не завершится задача «Проложить проводку» (Задача А).</p>
<p>Начало-Окончание</p> 	<p>Б заканчивается после начала А</p>	<p>Задача Б не может завершиться, пока не начнется задача А. Задача Б может завершиться в любое время после начала задачи А.</p>	<p>Задача «Закрепить обшивку» (Задача Б) не может завершиться, пока не начнется задача «Доставить фермы» (Задача А).</p>
	<p>А начинается перед завершением Б</p>		

Допускается 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 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 возобновляемого ресурса операцией означает, что с началом выполнения операции этот ресурс в требуемом операцией 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 точки зрения заданных критериев или показателей эффективности:

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

Получаемое решение должно удовлетворять ограничениям по производительности и графику работы ресурсов, например, неразделяемый ресурс может одновременно использоваться только одной операцией. При наличии нескольких допустимых вариантов расписания необходимо выбрать близкое к оптимальному, так как из-за размерности пространства решений или совершенно различных критериев, применяемых на разных стадиях планирования, получение оптимального результата может быть затруднено и неоправданно с точки зрения затрачиваемого времени.

Таким образом, в наиболее общем случае, процесс поиска решения заключается в выборе наилучшего, но если лучший вариант не может быть вычислен из-за размерности задачи, то наиболее 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.

В соответствии с приведенной в статье Д. А. Новикова классификацией [17], решаемая «цифровым двойником» задача управления ресурсами может быть отнесена к классу дискретных многокритериальных задач оптимизации, с нестационарным объектом управления, характеризующимся многоэлементной смешанной структурой, управление которым осуществляется с учетом знаний и в условиях неопределенности, обусловленной возмущениями (событиями), которые запускают процесс адаптации производственных планов на основе кооперативного и конкурентного взаимодействия элементов системы (участников производственного процесса).

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

Кроме этого, важными особенностями текущей постановки являются:

- выполнение операции требует одновременного задействования группы ресурсов, каждый из которых характеризуется индивидуальным графиком работы;
- выполнение операции может быть прервано вследствие ограничений, накладываемых доступностью ресурсов;
- операции могут быть косвенно упорядочены между собой через производимые и потребляемые компоненты.

Такого рода требования оказываются довольно характерными для широкого круга задач планирования ресурсов, но для конкретных предприятий могут появляться и другие требования, индивидуальный учет которых предполагается учитывать на основе онтологий.

### **1.3 Обзор применений онтологий в задачах управления ресурсами**

В настоящей работе предлагается использовать онтологии для создания онтологических моделей предприятий и построения ЦД процессов управления предприятиями, которые могут применяться как для планирования задач и ресурсов производства в реальном времени, так и моделирования процессов исполнения будущих заказов в различных конфигурациях ресурсов (производственного оборудования, персонала и т.д.).

Сложность и многообразие описываемых изделий и процессов заставляет структурировать понятия, выделяя наиболее универсальные. Наиболее абстрактными являются онтологии представления, предназначенные для спецификации других онтологий, расположенных ниже по иерархии. В онтологиях верхнего уровня фиксируются знания, общие для нескольких предметных областей в целях их многократного использования. Ниже расположены онтологии предметных областей и прикладные онтологии, описывающие концептуальную модель одной предметной области или конкретной задачи соответственно [11].

В настоящее время наиболее проработанным является уровень онтологий представления. Стандартизация понятий на этом уровне произошла благодаря деятельности консорциума W3C – организации, занимающейся разработкой и внедрением стандартов для Всемирной паутины. Одной из целей этой организации является создание механизма дополнения содержимого веб-страниц семантической информацией, на основе которой программные агенты могли бы проводить поиск и обработку ее содержимого. В 1997 году консорциум предложил спецификацию RDF (Resource Description Framework), в основе которой лежит представление данных в виде набора утверждений – триплетов, состоящих из трех элементов: субъекта, предиката и объекта. Каждый элемент триплета является ресурсом, на который можно сослаться с помощью уникального идентификатора. В качестве объекта может выступать как идентификатор, так и литерал одного из базовых типов, например, строка или число. Набор триплетов формирует связный ориентированный граф, вершинами в котором являются субъекты и объекты, а дугами – предикаты.

Помимо структуры, RDF и его расширение RDFS определяют набор терминов, используемых при описании новых ресурсов. Так, для группировки ресурсов вводится термин «класс», для обозначения подгруппы ресурсов, выступающих в роли предикатов термин «свойство», а для выстраивания классов в иерархию – свойство «является подклассом» и т.д.

Язык OWL, являющийся надстройкой над RDFS, вводит ряд дополнительных терминов таких как «свойство-объект», «свойство-значение» и «ограничение на значение свойства», обеспечивает проверку целостности и непротиворечивости содержимого онтологии, а также связывание онтологий друг с другом. Онтология, построенная на основе языка OWL состоит из объявлений классов, их свойств (как значений-литералов, так и объектов), экземпляров классов и ограничений над свойствами [33]. Пример описания экземпляров понятий и отношений в такой форме показан на рисунке 1.3.

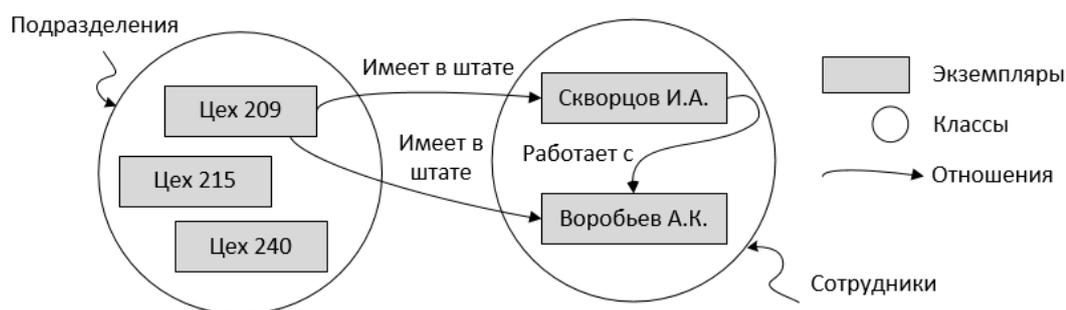


Рисунок 1.3 – Фрагмент производственной онтологии на уровне экземпляров понятий и отношений

Несмотря на то, что RDF и OWL изначально разрабатывались для Web, эти стандарты оказались полезными и в других областях, и на сегодняшний день являются общепризнанным способом представления семантической информации.

Среди онтологий верхнего уровня наиболее известными являются онтологии OpenСус [66], Gist [46] и SUMO [80]. Эти онтологии описывают общие и повсеместно используемые концепты, например, разновидности процессов и объектов, абстракции, единицы измерения, понятия времени, части и целого. Несмотря на то, что в терминах онтологий верхнего уровня невозможно описать прикладную задачу, их использование позволяет повысить интероперабельность и связность различных онтологий прикладного уровня.

Вопрос создания онтологий для управления производственными процессами и ресурсами в настоящее время является предметом ряда исследований.

Одной из первых известных производственных онтологий стала онтология «Process Specification Language» (PSL), разработанная как независимый язык представления знаний о производственном процессе и используемая для интеграции различных приложений [51].

В 2006 году была 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 этого исследования является реализованная возможность отображения экземпляров сущностей онтологии в программные объекты для последующего моделирования производственного процесса [59].

Борго и Лейталу [35] предложили свою версию онтологии производства, взяв за основу одну из общедоступных онтологий верхнего уровня (DOLCE) и расширив её предметно-зависимыми понятиями. Получившаяся в результате онтология определяет таксономию изделий и компонентов, материалов, заказов и производственных процессов.

В статье [38] была предложена производственная онтология, в основе которой лежит 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 мультиагентные системы (МАС), в которой агенты ресурсов регистрировали в системе имеющиеся у них возможности, а процессы подбирали необходимые ресурсы.

Пример использования семантических ограничений в МАС управления ресурсами показан в работе [21]. При этом состав агентов и учитываемых ими ограничений предлагается определять на этапе проектирования системы в зависимости от особенностей рассматриваемой предметной области. Преимущества использования онтологий в МАС для управления ресурсами продемонстрированы в работе [85]. 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 производственных ресурсов (параметров оборудования и навыков работников) рассмотрен в работах [30, 53].

В статье [83] предложена производственная онтология верхнего уровня, позволяющая объединить на своей основе стадии проектирования и производства изделий. В работе [64] вопрос применения баз знаний рассматривается в контексте помощи диспетчерам при планировании производственного процесса. В одной из последних работ по рассматриваемой теме [78] 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 [40, 45]. Подробный анализ современных тенденций и будущего производственных БЗ на основе онтологий опубликован в работе [39].

Проведённый анализ указанных работ показывает, что большинство онтологий ориентированы либо на наивысший абстрактный уровень описания производства, не применимый для оперативного ежедневного планирования, либо на конкретную область

производства, и, в основном, служат для интеграции знаний из различных информационных систем или моделирования производственных процессов.

Целью же настоящей работы является разработка базовой, предметно-независимой онтологии планирования, позволяющей формализовывать, накапливать и использовать знания о производственных процессах при создании ЦД процессов управления предприятиями, с последующей детализацией до уровня конкретных предприятий.

#### **1.4 Обзор современных подходов и методов решения задачи планирования ресурсов**

Для решения сложных задач составления расписаний используется широкий набор точных и приближенных методов. Большая часть используемых в научной литературе примеров посвящены календарному планированию на производстве, рассматриваемому в контексте задач теории расписаний – области исследования операций, связанной с распределением и упорядочиванием работ по времени и исполнителям.

Ряд исследований посвящены применению классических методов исследования операций, представляющих задачу планирования как задачу линейного целочисленного программирования. Широкое распространение получил метод ветвей и границ, являющийся вариацией полного перебора возможных решений с отсевом подмножеств допустимых, но заведомо неоптимальных вариантов [26]. Последнее достигается за счет введения функции оценки узлов дерева решений, а также исключения его повторяющихся ветвей. Эти методы гарантируют поиск оптимального решения, однако большинство задач теории расписаний являются *NP*-трудными, поэтому точные алгоритмы их решения приводят к экспоненциальному росту сложности и могут быть применены только к задачам небольшой размерности [13, 26, 37].

На практике, вместо поиска глобально-оптимальных решений, зачастую ограничиваются поиском приближенных решений с помощью различных эвристических алгоритмов, которые находят «хорошее» решение за приемлемое время. Примерами таких алгоритмов являются алгоритмы «бутылочного горлышка» [28, 86] табу-поиска с запретами [72], имитации отжига [42] и генетические алгоритмы [56].

Для примера более подробно рассмотрим методы и средства планирования группировок космических аппаратов (КА). Существующие методы и средства, применяемые при планировании целевого применения КА дистанционного зондирования Земли, ориентированы на одиночные КА и не могут быть использованы при планировании действий группировки из нескольких спутников. Кроме того, делается неправомерное допущение о детерминированности среды, в которой функционирует космический аппарат: план его работы является статичным и пересматривается не более двух раз в сутки.

В виду большой размерности задач дистанционного зондирования Земли многими исследователями предлагается использование приближенных методов. В работе [48] авторы сравнивают несколько реализаций генетического алгоритма, алгоритм восхождения к вершине и имитации отжига. Генетический алгоритм для решения задачи планирования сеансов связи между космическими аппаратами и наземными пунктами приема информации используется и в работе [89]. Для планирования динамически поступающих задач ДЗЗ предложено использование алгоритма колонии муравьев [44, 52], или его комбинации с нейронной сетью [60] и динамическим программированием [61]. Дополнительно вопросы планирования операций на космических аппаратах с помощью эвристических алгоритмов, учитывающих особенности предметной области, рассматриваются в работах [41, 55]. В этих работах делается вывод о том, что в целях решения задач многоцелевого мониторинга ДЗЗ следует в корне изменить концепцию управления и целевого планирования, а также схему взаимодействия с потребителями. Прежде всего, необходимо отойти от схемы директивного управления, заключающуюся в заблаговременном составлении детерминированных программ наблюдения и передачи информации, полученной в ходе дистанционного зондирования, на Землю. Планирование должно сочетаться с коммуникацией, в ходе которой уточняются требования и адаптивно перестраиваются планы, в особенности, в связи с возникновением непредвиденных событий (новые важные заказы, отказы техники и каналов связи и т.п.).

Во многих промышленных системах планирования вместо сложных математических алгоритмов используются более простые эвристические процедуры, называемые правилами диспетчеризации (предпочтения). Такие правила позволяют определить последовательность выполнения работ на основе относительно простых критериев, таких как продолжительность или предельный срок завершения работы. Среди предлагаемых правил диспетчеризации можно выделить следующие: правила, основанные на отношениях предшествования (анализируется количество или суммарная продолжительность всех предшествующих или последующих работ); правила, основанные на информации о критическом пути (порядок работ определяется исходя из значений их директивных сроков начала или завершения, продолжительности); правила, основанные на информации о необходимых ресурсах [13, 68].

Одним из активно развивающихся направлений исследований в этой области является разработка мультиагентных систем планирования. В таких системах решение строится на основе взаимодействия программных агентов, обладающих собственными целями и ограничениями [18, 87]. При этом воспроизводится процесс согласования планов между различными субъектами, участвующими в построении расписания, для чего описываются правила, которыми они руководствуются при принятии решений. Этот подход является развитием теории активных

систем, разработанной В. Н. Бурковым [4], в основе которой лежит процесс согласования индивидуальных интересов элементов системы с интересами ее центра, с тем отличием, что в мультиагентных системах процесс согласования ведется в том числе и между не связанными отношением иерархической подчиненности элементами. Благодаря распределенному характеру принятия решений, такие системы способны работать в динамически изменяющихся условиях, перестраивая расписание при возникновении непредвиденных событий [63]. Применение мультиагентных технологий рассматривается для широкого круга задач планирования: производства [36, 65], проектной деятельности [91], управления группировкой спутников [34]. В ряде работ предлагается объединить мультиагентный подход с другими эвристическими методами, например, с генетическими алгоритмами [73] или методом лучевого поиска [54].

Проведенный анализ рассмотренных выше исследований позволяет сделать следующие выводы: задача планирования ресурсов в общем случае является NP-трудной и не может быть эффективно решена точными методами оптимизации вследствие экспоненциального роста сложности вычислений при увеличении размерности; обобщенные до уровня задачи цехового планирования эвристические алгоритмы не позволяют учесть специфику прикладной области, и, тем более, обеспечить выработку согласованных решений многими разнородными участниками; примеры эвристических алгоритмов планирования дистанционного зондирования Земли не могут быть повторно использованы в других приложениях в виду своей узкой специализации.

На сегодняшний день на рынке программного обеспечения присутствует ряд различных систем управления предприятием и производством: BAAN, SAP ERP, Preactor и др. Эти системы, как правило, реализуют алгоритмы линейного или динамического программирования, программирования в ограничениях и другие традиционные методы, основанные на комбинаторном поиске вариантов. Как следствие, поиск решений в этих системах может занимать продолжительное время, а полученные планы зачастую оказываются невыполнимыми, так как при их построении не учитывались специфические особенности предприятия. В виду трудоемкости построения расписания эти системы не позволяют оперативно справиться с происходящими изменениями. В результате на многих предприятиях применение систем планирования ограничено функциональностью по учету материалов, ресурсов и размещению заказов, а построенные на основе этих данных расписания многократно дорабатываются в «ручном режиме» силами специалистов плановых и диспетчерских отделов.

К числу недостатков традиционных методов и программных средств планирования ресурсов, препятствующих их применению на практике, можно отнести следующие:

- существенное повышение вычислительной сложности с ростом размерности задачи вследствие поиска оптимальной программы функционирования объекта планирования на каждом интервале времени;
- ограниченные возможности по учету индивидуальных целей и предпочтений множества задействованных в расписании объектов, невозможность их изменения в зависимости от сложившейся ситуации;
- пакетная обработка изменений против адаптивности, невозможность оперативного реагирования на изменение внешних условий без полного перестроения расписания;
- глубокая привязка логики планирования к предметной области решаемой задачи, без возможности ее настройки и конфигурации.

В результате можно сделать вывод, что рассмотренные методы и средства не позволяют в полной мере решать задачи планирования ресурсов с достаточным уровнем качества и эффективности. Для парирования этих недостатков целесообразно попытаться использовать мультиагентные технологии вместе с онтологиями, связка которых позволит описать содержательные особенности решаемой задачи и настроить состав и логику функционирования агентов системы, сохранив одно из главных преимуществ мультиагентных систем – высокую адаптивность при построении расписания и учет множества интересов участников.

Таким образом, задача разработки ЦД процессов управления предприятиями на основе онтологий и мультиагентных технологий является актуальной.

### **1.5 Сравнение технологий для создания ЦД процессов управления предприятиями**

В результате проведенного анализа основные подходы к реализации ЦД процессов управления можно разделить на следующие категории.

**Цифровые двойники на основе систем математических уравнений.** Подход основан на построении математических моделей, содержащих набор переменных, связанных различными алгебраическими или дифференциальными уравнениями. Помимо очевидных преимуществ возможности получения точного решения, у этого подхода есть ряд недостатков: с ростом числа принимаемых во внимание факторов, может потребоваться существенная доработка модели, часть зависимостей может иметь табличный или даже алгоритмический характер, который трудно описать уравнениями, многие универсальные классические алгоритмы не учитывают индивидуальные особенности рассматриваемых в модели объектов. Существующие методы планирования, рассматриваемые в исследовании операций и теории расписаний [25], не позволяют адаптивно строить связанные планы управления различными ресурсами и решают, в основном, логистические задачи в узких постановках, исходя из предположения, что все

исходные данные известны заранее и не меняются в ходе вычислений, что в реальной жизни постоянно нарушается непредвиденными событиями, такими как выход из строя ресурсов, приход приоритетных заказов, задержки при выполнении операций и т.д. Наконец, применение классических комбинаторных методов может быть неприемлемым вследствие экспоненциального роста времени вычислений, сопровождающего рост размерности задачи.

**Цифровые двойники на основе нейронных сетей и машинного обучения.** В основе подхода лежит применение нейронных сетей для прогнозирования состояния и поведения объекта управления [5, 90]. Данный способ позволяет обобщить накопленные исторические данные предприятия и установить зависимости между входными и выходными параметрами объекта управления, обеспечив получение устойчивого решения даже при наличии ошибок и шумов в данных. В отличие от параметрических математических моделей, модели на основе машинного обучения не требуют явного описания происходящих внутри объекта процессов, и вместо этого, аппроксимируют имеющиеся в статистических данных закономерности. Но и нейросетевые модели имеют существенные недостатки, среди которых длительная процедура обучения, а также необходимость повторного обучения в условиях неопределенности и динамики, что снижает их способность к адаптации. Методы машинного обучения крайне чувствительны к выбору обучающих массивов данных, на которых проводится обучение и валидация моделей. Обученную модель, как правило, трудно интерпретировать и корректировать с целью внесения в нее дополнительных закономерностей в явном виде, минуя этап накопления достаточного количества статистических данных.

Вместе с тем, в будущем такого рода модели и методы могут быть успешно применены для калибровки более содержательных моделей.

**Цифровые двойники на основе онтологий и мультиагентных технологий.** С учетом приведенных ранее особенностей задачи управления ресурсами более практичным подходом к разработке ЦД представляется использование баз знаний на основе онтологий и мультиагентных технологий [10, 31, 57, 92].

Онтологии представляют собой формализованную модель знаний предметной области в виде семантической сети классов понятий и отношений, которая может помочь настраивать агентов на специфику работы каждого конкретного предприятия.

Опыт решения практических задач управления ресурсами показывает, что ключевым фактором, влияющим на качество и эффективность планирования, являются не столько «изобретательные» математические методы планирования, сколько профессиональные знания специалистов, которые определяют семантику предметной области 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. Примеры таких предметных знаний в области ДЗЗ могут включать не только описание параметров аппаратуры и требований потребителей к информационным продуктам, но и технологии их изготовления, сведения о возможности распараллеливания операций, совместимости оборудования, а также более детальные сведения о предпочтениях при выборе режимов съемки и передачи данных.

Это очень важные, но трудно формализуемые знания, которые могут накапливаться и после разработки системы – в процессе внедрения и эксплуатации. Так, исходя из опыта сборки предыдущих экземпляров самолетов, постепенно может уточняться набор специфических требований к исполнителям производственных операций, утончаются оценки трудоемкости и т.п. Принципиальным моментом здесь является то, что структуру и состав этих требований невозможно определить заранее, а их изменение фактически является еще одним видом событий, которые должна обрабатывать интеллектуальная система планирования ресурсов. Возможность адаптации логики планирования под изменяющиеся параметры объекта планирования является актуальной и в случае, если разработка системы поддержки принятия решений опережает процесс создания самого объекта, для планирования деятельности которого она разрабатывается. Например, система планирования может быть использована для определения возможностей и границ применимости проектируемого производства в условиях отсутствия окончательного понимания всех учитываемых при планировании его деятельности аспектов.

Таким образом для повышения качества и эффективности планирования, прежде всего, требуется учитывать знания об особенностях объектов и процессов предметной области.

Мультиагентные технологии позволяют поставить в соответствие каждому физическому или абстрактному объекту производственного предприятия (такому, как «заказ», «изделие», «технологический процесс», «продукт» или «ресурс» и т.д.) свой класс специально разработанного программного агента, который будет действовать от его лица и в его интересах, сам по себе, выступая в виде микро ЦД такого объекта. При этом событие, возникающее с каждым из указанных объектов, может вызывать процесс адаптивного пересмотра и перестроения в реальном времени планов ЦД предприятия с выработкой вариантов управляющих воздействий и их согласования с исполнителями через мобильные устройства.

Наличие множества интересов указанных выше сущностей (от предприятия в целом и его подразделений – до уровня каждого заказа и ресурса), вызывает необходимость перехода от традиционной постановки задачи планирования и оптимизации ресурсов с одной целевой

функцией «центра» – к поиску баланса интересов (консенсуса) множества целевых функций «участников» процессов принятия решений, представленных программными агентами, при возникновении каждого события. Переходный процесс по перестройке расписания работы предприятия, начатый внезапно пришедшим рассинхронизирующим событием, должен завершаться установлением нового «конкурентного равновесия» интересов агентов, когда ни один из них не может больше улучшить ситуацию.

Однако, опыт разработки мультиагентных систем (МАС) [62] показывает, что разработка МАС для каждой новой возникающей задачи «с нуля» требует значительных затрат времени и ресурсов, в частности привлечения квалифицированных разработчиков. Попытки создания полностью инвариантной к предметной области системы планирования обычно ведут к выхолащиванию задачи, так как разработанные универсальные системы не позволяют учесть специфики предметной области, намеренно упрощая и редуцируя количество факторов, принимаемых во внимание при планировании специалистами. Решение данной проблемы требует создания набора инструментальных средств, в основе работы которых лежит принцип разделения методов планирования и описания предметной области конкретной решаемой задачи.

Такой подход должен позволить настраивать систему на область применения, описывая предприятие с помощью базового набора понятий и отношений онтологии предметной области. Далее это описание, представляющее собой онтологическую модель предприятия, включающее спецификацию как производимого изделия, так и процесса его производства и доступных ресурсов, может быть загружено в интеллектуальную систему планирования для построения плана и дальнейшей его корректировке по событиям, при этом каждому заказу, операции, продукту и ресурсу будет сопоставлен свой программный агент и вариант его поведения, который будет настраиваться на специфику своего владельца из базы знаний, описывающей, например, квалификации каждого рабочего или особенности каждой задачи технологического процесса ее выполнения (рисунок 1.4).

Это позволит «универсализировать» классы агентов всех участников, сохраняя возможность настройки их экземпляров на специфику каждого предприятия, сократить трудоемкость, стоимость и сроки разработки и поддержки работы системы. Применение онтологий также позволит применить существующие стандарты представления информации, такие как язык OWL, и использовать уже созданные онтологии при создании такого рода моделей предприятий для построения ЦД предприятий.

Однако, в настоящее время все известные существующие инструменты создания МАС (Cougar, Jade и др.) фокусируются на «физическом уровне» МАС – например, поддерживают функции создания классов агентов, передачи сообщений, ведения желтых страниц и т.д.



Рисунок 1.4 – Использование МАС для реализации ЦД предприятия

Инструментария создания МАС, который бы поддерживал работу с онтологиями и позволял создавать онтологические модели предприятий, а также предлагал набор готовых классов программных агентов и протоколов их взаимодействия, в настоящее время нет как в научных лабораториях, так и на рынке промышленных систем.

Проведенное сопоставление подходов к созданию ЦД (таблица 1.2) позволяет обосновать выбор баз знаний на основе онтологий и мультиагентных технологий в качестве основы для их построения.

Таблица 1.2 – Сравнение подходов к построению ЦД предприятий

Классическая оптимизация		Нейронные сети		База знаний и МАС	
Преимущества	Недостатки	Преимущества	Недостатки	Преимущества	Недостатки
Достижение глобального оптимума по одной целевой функции	Ориентация на интересы центра – не подходит для учета и поиска баланса интересов участников (консенсуса)	Подходит для решения узких задач распознавания образов	Требует долгого обучения и точной подготовки выборки массивов обучающих данных	Решает сложные задачи управления ресурсами путем разбора конфликтов	Высокая сложность и трудоемкость начальной разработки мультиагентной системы

Продолжение таблицы 1.2

Отработанный и изученный метод предлагается для решения любых задач планирования и оптимизации ресурсов	Высокая вычислительная сложность комбинаторного перебора вариантов, ограничивающая возможные применения с ростом размерности	Дает устойчивое решение даже при наличии ошибок в данных, помех и шумов	При изменении ситуации во внешней среде надо начинать обучение заново, трудно определить этот момент	Возможность развития и учета индивидуальных особенностей заказов и ресурсов	При изменении ситуации во внешнем мире требует коррекции базы знаний и/или изменения состава агентов
Возможность купить готовый программный продукт на рынке	Невозможность работы по событиям в адаптивном режиме, что требуется для синхронизации реального и цифрового предприятия	Возможность купить готовый программный продукт на рынке	Не работает в адаптивном режиме по событиям	Может работать в адаптивном режиме для быстрого ответа на событие и синхронизации с реальным предприятием	Усложнение диалога с пользователем (проактивность, встречные предложения и т.д.)
Легко встраиваются в существующие бизнес-процессы	Большая трудность настройки на решение практических задач	Позволяет использовать накопленные исторические данные предприятия	Трудность настройки на решение новых практических задач	Учет семантики предметной области предприятия в базе знаний	Трудности внедрения за счет смены бизнес-процессов и регламентов

### 1.6 Выводы

- 1) Рассмотрены современные концепции ЦД и существующие подходы к созданию ЦД сложных технических объектов, которые призваны объединить возможности современных КФС и компьютерных моделей объектов, и показана тенденция их интеллектуализации на пути к Adaptive, Intelligent и Cognitive Digital Twins.
- 2) Предложена методика построения ЦД процессов управления предприятиями в виде интеллектуальной кибер-физической системы, построенной на основе онтологий и мультиагентных технологий, работающей по событиям в реальном времени для синхронизации своего состояния с состоянием реального предприятия.
- 3) Проведен анализ задачи создания ЦД предприятий и выделены основные процессы управления, в числе которых наиболее сложным процессом является решение задачи планирования производственных ресурсов.

- 4) Рассмотрены главные особенности задач планирования производственных ресурсов для создания ЦД процессов управления предприятиями, отличающие ее от канонической задачи построения расписания работ проекта, определены требования, предъявляемые к разрабатываемым методам представления знаний и построения расписаний. Проведенный анализ требований позволяет с общих позиций подходить к разработке унифицированных методов и алгоритмов решения задач рассматриваемого класса.
- 5) Показано, что основная проблема и сложность планирования ресурсов заключается в необходимости учета специфики предметной области – важно не столько получение глобально-оптимального расписания, сколько учет семантических особенностей предметной области, а также взаимосвязанности элементов расписания, разнообразия факторов, принимаемых во внимание при планировании, ситуативного характера принимаемых решений, требующих согласования и координации планов различных подразделений в зависимости от сложившейся производственной обстановки.
- 6) Приведен обзор использования онтологий в задачах управления ресурсами, выделены основные подходы к использованию онтологий и их ограничения, обоснована необходимость интеграции баз знаний и мультиагентных систем планирования.
- 7) Проведен обзор современных методов планирования ресурсов. Показано, что в виду принадлежности задачи к классу NP-трудных, широкое распространение получили различные приближенные методы, среди которых наиболее распространенными являются генетические алгоритмы и эвристические правила диспетчеризации. Обосновывается применимость мультиагентных технологий для решения схожих задач в области управления производством, управления группировкой космических аппаратов и других применений на основе ПВ-сетей и методов виртуального рынка. Выявленным недостатком рассмотренных существующих подходов является глубокая привязка логики планирования к предметной области решаемой задачи и невозможность адаптивного изменения построенного расписания при возникновении событий.
- 8) Сделан вывод о необходимости разработки новых методов и средств адаптивного событийного планирования ресурсов на основе онтологий и мультиагентных технологий в целях сокращения трудоемкости, стоимости и сроков разработки ЦД процессов управления предприятиями.

## 2 ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

### 2.1 Использование онтологий при решении задачи планирования

Основное назначение онтологий и баз знаний – формализация знаний предметной области в целях более точной спецификации требований, которые необходимо учитывать в прикладных системах, а также отделение этой информации от программного кода системы для обеспечения возможности ее редактирования и расширения.

В настоящей работе предлагается использовать онтологии и базы знаний для индивидуальной настройки экземпляров агентов разработанных ранее сетей потребностей и возможностей на специфику предметной области конкретного предприятия.

К преимуществам использования онтологий относится:

- создание единого базиса, в котором описываются знания, что позволяет систематизировать и унифицировать способы представления знаний;
- возможность внесения изменений в структуру представления знаний по мере изменения целей и задач, стоящих перед системой;
- возможность извлечения новых знаний посредством логического вывода из имеющегося набора фактов, правил и аксиом;
- наглядность и доступность для восприятия пользователями больших объемов сложно структурированной информации;
- возможности по интеграции разнородных источников информации и др. [8].

Для удобства создания ЦД предприятий предлагается разделить базу знаний на три уровня описания предметной области, отличающихся степенью изменчивости предметных знаний: онтология для описания классов понятий и отношений предметной области, онтологическая модель предприятия и сцена для хранения состояний экземпляров объектов:

- 1) Набор онтологий, представляющих собой иерархически организованный словарь классов понятий и отношений, используемых для описания предметной области. Качественные и количественные характеристики понятий и отношений задаются с помощью атрибутов. Понятия через отношение наследования могут быть конкретизированы производными понятиями и сгруппированы по уровню абстракции и степени детализации в отдельные онтологии. Таким образом, иерархия понятий может уточняться в специализированных онтологиях, вплоть до уровня онтологии конкретного предприятия.

- 2) Онтологическая модель содержит устойчивые конфигурации экземпляров классов, заданных в онтологии, например, описание изделий и технологических процессов, а также ресурсов предприятия. На основе онтологии и онтологической модели определяются структуры данных, используемые в дальнейшем для описания информационных объектов и решения бизнес-задач прикладными системами.
- 3) Сцена описывает экземпляры понятий с конкретными значениями атрибутов и отношений в заданный момент времени [16].

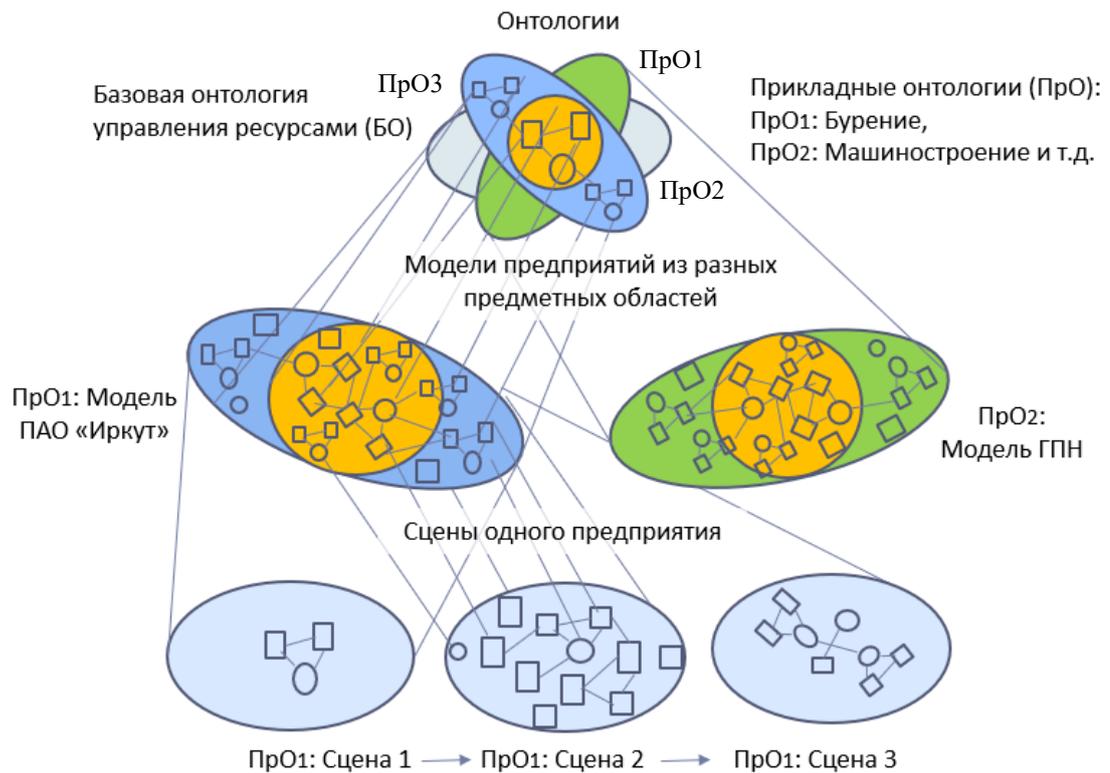


Рисунок 2.1 – Онтологии, модели и сцены

Предложенное разбиение позволит упростить задачу использования онтологий для создания ЦД следующим образом:

- первоначально будет определена базовая онтология управления ресурсами;
- для базовой онтологии будут созданы универсальные базовые классы агентов, которые будут моделировать основные процессы управления предприятием;
- на основе базовой онтологии будут строиться прикладные онтологии для различных предметных областей;
- прикладные онтологии позволят специфицировать онтологические модели предприятий, описывающие их структуру и технологические или бизнес-процессы, оборудование, компетенции рабочих и т.д.;

- созданные универсальные классы агентов получают возможность считывать прикладные онтологии и настраиваться на предметную область предприятия, создавая по онтологической модели предприятия его мультиагентную модель, синхронизируемую по событиям в реальном времени.

В результате, однажды созданная мультиагентная система, как основная часть ИКФС, сможет настраиваться на специфику работы любого предприятия поддерживаемого класса.

## 2.2 Разработка базовой онтологии управления ресурсами

Основной целью создания онтологий является формализация, накопление и использование знаний предметной области для построения ЦД процессов управления предприятиями.

Качество достижения этой цели во многом зависит от структуры онтологии предметной области. Хорошо спроектированная структура онтологии должна вводить минимально возможный набор понятий и отношений, но в тоже время позволять описывать максимально возможное число ситуаций реального мира с требуемой степенью детализации.

Процесс разработки онтологии заключается в классификации понятий и отношений предметной области и определении формата представления знаний в виде конечного множества концептов предметной области.

Общее определение онтологии имеет вид:  $O = \langle C, R, \Phi \rangle$ , где  $C$  – множество понятий,  $R$  – множество атрибутов и отношений ( $n$ -местных предикатов),  $\Phi$  – множество функций семантической обработки (интерпретации), заданных на понятиях и отношениях.

На верхнем уровне предлагается использовать базовую онтологию управления ресурсами (планирования)  $O_{plan}$ , состоящую из наиболее общих и повторно используемых понятий, таких как заказ, групповая и атомарная задача, ресурс и продукт (таблица 2.1), в то время как детали, зависящие от предметной области фиксировать в специализированных онтологиях  $O_{domain}$ , расширяющих базовую:

$$O_{domain} \supseteq O_{plan}.$$

На основе онтологии предметной области строится онтологическая модель предприятия, состоящая из экземпляров описанных ранее понятий (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Пример представления онтологии в виде нескольких слоев

Таблица 2.1 – Основные понятия базовой онтологии управления ресурсами

Заказ	Заявка на выпуск продукта, специфицирующая его количество и директивные сроки получения
Продукт	Объект, поступающий на вход или являющийся результатом выполнения задачи
Задача	Групповая или атомарная работа (набор связанных работ), выполнение которых необходимо для получения продукта
Ресурс	Средство производства, необходимое для выполнения задачи

Онтология  $O_{plan}$  используется реализованными в мультиагентной системе классами агентов, которые через функции семантической обработки  $\Phi$  получают возможность взаимодействовать с базой знаний. Часть понятий и отношений из  $O_{domain}$  являются производными от базовых понятий и отношений из  $O_{plan}$ , что позволяет объяснить системе как работать с онтологией предметной области, связав ее понятия и отношения с уже известными и интерпретируемыми системой, обработка которых встроена в ее программный код (рисунок 2.3). При этом  $O_{domain}$  может также включать понятия и отношения, не являющиеся производными от базовых, которые будут использоваться МАС при сопоставлении свойств ресурсов и продуктов с требованиями к ним со стороны задач.



Рисунок 2.3 – Базовая онтология управления ресурсами

Заказы (*Order*) определяют количество и сроки создания продукта (*Product*), задачи (*Task*) задают необходимую последовательность действий для его получения и специфицируют необходимые для своего выполнения ресурсы (*Resource*).

$$C_{plan} = \{Order, Product, Task, Resource\}$$

Каждый заказ требует появления некоторого продукта (отношение «создает» – *create*), который, в свою очередь, связан с задачей, в результате выполнения которой он появляется:

$$\forall_x \exists_y (Order(x) \rightarrow Product(y) \wedge create(x, y)).$$

Продукты могут поступать на вход задаче, а также являться результатом ее выполнения. В зависимости от роли в технологическом процессе они декомпозируются на «Производимые» (*Produced Product*) и «Потребляемые» (*Consumed Product*). При этом продукт может одновременно принадлежать обоим множествам, являясь входом одной задачи и выходом для другой. Между задачей и соответствующим видом продукта вводятся отношения «производит» (*produce*) и «потребляет» (*consume*):

$$\forall_x \exists_y (ProducedProduct(x) \rightarrow Product(x) \wedge Task(y) \wedge produce(y, x)),$$

$$\forall_x \exists_y (ConsumedProduct(x) \rightarrow Product(x) \wedge Task(y) \wedge consume(y, x)).$$

Множество задач разбивается на два подмножества: «Групповые» (*Group Task*) и «Атомарные» (*Atomic Task*). Задачи связаны между собой посредством отношений вложенности («является частью» – *part of*) и упорядоченности («следует за» – *follow*). Связи предшествования следования между задачами могут быть дополнительно разделены на четыре типа: окончание-начало, начало-начало, окончание-начало, начало-окончание. Эти отношения позволяют агенту найти предыдущую и следующую задачу для запроса о перемещении в расписании или сообщения о возникшей задержке в выполнении:

$$\forall_{x,y} (partof(x, y) \rightarrow Task(x) \wedge Task(y)),$$

$$\forall_{x,y} (follow(x, y) \rightarrow Task(x) \wedge Task(y)),$$

$$\forall_x \exists_y (GroupTask(x) \leftrightarrow Task(x) \wedge Task(y) \wedge partof(y, x)),$$

$$\forall_x (AtomicTask(x) \leftrightarrow \neg GroupTask(x)).$$

В зависимости от способа определения длительности, атомарные задачи подразделяются на задачи с фиксированной длительностью, с фиксированным объемом работ, который должен быть выполнен для ее завершения, и на задачи вида «гамак» (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Базовые типы задач

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

Для задач типа «Гамак» (*Hammock*) накладываются ограничения на наличие предшествующей и последующей задачи, длительность которых не зависит от соседних задач:

$$\forall x \exists y, z (HammockTask(x) \rightarrow Task(x) \wedge Task(y) \wedge Task(z) \\ \wedge \neg HammockTask(y) \wedge \neg HammockTask(z) \wedge follow(y, x) \wedge follow(x, z)).$$

Ресурсы обеспечивают выполнение задач. С точки зрения участия в технологическом процессе подразделяются на преобразуемые и обеспечивающие (таблица 2.3). Преобразуемые ресурсы подвергаются трансформации в ходе выполнения технологического процесса и непосредственно входят в состав получаемой на выходе продукции в качестве исходного сырья и материалов. Обеспечивающие ресурсы участвуют в процессе преобразования, но не изменяют свое состояние. К их числу можно отнести оборудование, инфраструктуру, сотрудников.

Таблица 2.3 – Базовые типы ресурсов

Преобразуемые	Тратится при выполнении задачи (в количестве, определенном ее требованиями), может быть восполнен согласно графику поставок
Обеспечивающие	Становится доступными для повторного использования в прежнем количестве сразу после завершения задач, на которые был выделен. В общем случае может иметь график зависимости располагаемого объема от времени (ресурс с переменной доступностью)

Оба типа ресурсов характеризуются графиком зависимости располагаемого объема от времени и транспортная доступность с другими ресурсами (через отношения «соединен с» – *connected*), которая определяет возможность и время транспортировки обрабатываемых продуктов от одного ресурса (или группы ресурсов) к другому:

$$\forall x, y (connected(x, y) \\ \rightarrow (Resource(x) \vee ResourceGroup(x)) \wedge (Resource(y) \vee ResourceGroup(y))).$$

Для обеспечивающих ресурсов устанавливаются правила обслуживания и правила переналадки. 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.

Продукты могут требовать размещения (*stored*), например, космический снимок необходимо хранить в бортовом запоминающем устройстве, а изделие – на соответствующей площадке склада:

$$\forall x, y (stored(x, y) \rightarrow Product(x) \wedge ReusableResource(y)).$$

Отношение «требует» (*require*) показывает какие ресурсы необходимы для выполнения задачи. Для моделирования различных режимов выполнения задачи (на разных наборах

ресурсов) вводится понятие «Требование к ресурсам» (*Resource requirement*), указывающее через отношение «состоит из» (*consist of*) на один или несколько ресурсов, которые должны быть назначены на задачу для достижения заданной производительности:

$$\forall_{x,y} \left( require(x,y) \rightarrow Task(x) \wedge (ResourceRequirement(y) \vee Resource(y)) \right),$$

$$\forall_x \exists_y \left( ResourceRequirement(x) \rightarrow Resource(y) \wedge consist\_of(x,y) \right).$$

Требование к ресурсу ограничивает список ресурсов, необходимых для выполнения задачи. Требование характеризуется типом ресурса, количеством ресурсов данного типа, а также набором атрибутов и отношений, ограничивающих множество подходящих под описание ресурсов. Добавление нового атрибута или отношения сужает множество возможных исполнителей задачи, например:

- любой космический аппарат;
- КА с разрешением менее 5 м;
- КА с разрешением менее 5 м и шириной полосы более 30 км;
- КА с разрешением менее 5 м и шириной полосы более 30 км, способный выполнять мультиспектральную съемку.

Последнее условие может быть представлено следующим выражением:

$$x \rightarrow Satellite(x) \wedge less(resolution(x), 5) \wedge more(width(x), 30) \wedge hasSensingType(x, y) \wedge Multispectral(y),$$

где предикаты *less(x, y)* и *more(x, y)* определены на уровне онтологии планирования и являются встроенными функциями сравнения количественных показателей, а понятия *Satellite* и *Multispectral*, отношение *hasSensingType(x, y)*, а также атрибуты *resolution* и *width* – специфичными для предметной области дистанционного зондирования Земли.

Таким образом, на уровне базовой онтологии планирования фиксируется множество отношений *R*, которые должны поддерживаться мультиагентной системой:

$$R_{plan} = \{create, consume, produce, partof, follow, connected, require, stored, consist\ of\},$$

которые выделены на основе анализа различных производственных задач планирования и обеспечивают возможность спецификации предметной области промышленного производства (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Основные отношения базовой онтологии управления ресурсами

Область определения	Отношение	Область значений
Заказ	Требует создания	Производимый продукт
Продукт	Требует хранения	Обеспечивающий ресурс

Продолжение таблицы 2.4

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
	Соединен с	Ресурс / группа ресурсов
	Требует обслуживания	Правило обслуживания
	Требует переналадки	Правило переналадки

Для работы с построенными на основе онтологии планирования базами знаний были выделены функции семантической обработки (интерпретации)  $\Phi$  (приведены в порядке повышения сложности запросов):

- 1)  $Concepts = \phi_1(c)$  – получить множество всех понятий  $Concepts \subseteq C$ , являющихся производными от указанного понятия  $c \in C$ .
- 2)  $Relations = \phi_2(r)$  – получить множество всех отношений  $Relations \subseteq R$ , являющихся производными от указанного отношения  $r \in R$ .
- 3)  $Instances = \phi_3(c)$  – получить множество всех экземпляров  $Instances$  заданного класса  $c \in C$  (включая экземпляры производных классов).
- 4)  $AreRelated = \phi_4(c_1, c_2)$  – проверить является ли понятие  $c_1 \in C$  производным от понятия  $c_2 \in C$ .
- 5)  $AreRelated = \phi_5(r_1, r_2)$  – проверить является ли отношение  $r_1 \in R$  производным от отношения  $r_2 \in R$ .
- 6)  $IsPart = \phi_6(i, set)$  – определить, принадлежит ли экземпляр  $i$  заданному множеству  $set$ , путем сравнения атрибутов и отношений экземпляра с атрибутами и отношениями, определяющими это множество (учитывая возможность замещения базового класса или отношения производным).
- 7)  $Tasks = \phi_7(p)$  – определить множество задач, результатом которых является получение указанного продукта  $p \in ProducedProduct$ .
- 8)  $Resources = \phi_8(t)$  – определить подходящие для выполнения задачи  $t \in Task$  ресурсы.
- 9)  $Products = \phi_9(t)$  – определить подходящие для выполнения задачи  $t \in Task$  продукты.

Указанные функции семантической обработки  $\Phi$  допускают построение сложных композиций на основе алгебраических операций подстановки и рекурсии, например,  $Resources = \phi_8(\phi_7(p))$  – найти множество ресурсов, требуемых для получения продукта  $p$ .

Функции из множества  $\Phi$  реализованы в виде библиотеки на языке Java и формируют «исчисление» агентов над онтологиями, которое далее используется агентами в ходе планирования и оптимизации ресурсов. Разработанная библиотека, являющаяся базисом данного исчисления, является открытой и, по мере необходимости, может расширяться прикладными программистами.

### 2.3 Разработка прикладных онтологий

Отношения и понятия из базовой онтологии могут быть использованы при построении множества прикладных онтологий. При этом создание потомков базовых классов может быть использовано для более точного определения отношений между понятиями. Онтология предметной области содержит классы понятий и отношений, являющихся специфичными для этой области. В отличие от онтологии управления ресурсами, принятой в качестве базовой, онтология предметной области может дополняться новыми элементами без необходимости последующего внесения изменений в состав и логику работы агентов. Для того чтобы быть интерпретируемыми мультиагентной системой, добавляемые понятия, атрибуты и отношения должны быть достижимы относительно базовых понятий, атрибутов и отношений при применении к ним функций семантической обработки  $\Phi$ .

Например, на уровне онтологии машиностроения (рисунок 2.4) в качестве продуктов рассматриваются детали (*Component*), сборочные единицы (*AssemblyElement*) и изделия (*FinalProduct*):

$$\forall_x (Product(x) \rightarrow Component(x) \vee AssemblyElement(x) \vee FinalProduct(x)),$$

в качестве задач – технологические процессы (*Process*) и операции (*Operation*):

$$\forall_x (Task(x) \rightarrow Process(x) \vee Operation(x)),$$

обеспечивающие ресурсы представлены складскими ячейками (*StorageCell*), оборудованием (*Equipment*), оснасткой (*Tool*) и персоналом (*Employee*):

$$\forall_x (ReusableResource(x) \rightarrow StorageCell(x) \vee Equipment(x) \vee Tool(x) \vee Employee(x)),$$

$$\forall_x (Equipment(x) \rightarrow Machine(x) \vee Crane(x))$$

а группы ресурсов – производственными цехами и участками:

$$\forall_x (ResourceGroup(x) \rightarrow Shop(x) \vee Site(x)).$$



Рисунок 2.4 – Расширение онтологии управления ресурсами на область машиностроения

Указанные понятия связаны с базовыми через отношение наследования, однако для описания их свойств могут быть введены и дополнительные понятия, которые не наследуются от базовых. Например, для описания квалификации рабочего вводятся понятия «Квалификация» (*Qualification*), «Профессия» (*Profession*) и «Компетенция» (*Competence*), соответствующие им отношения «имеет квалификацию» (*hasQualification*), «имеет профессию» (*hasProfession*) и «имеет компетенцию» (*hasCompetence*), а также целочисленный атрибут «разряд» (*rank*):

$$\forall_{x,y} (hasQualification(x,y) \rightarrow Employee(x) \wedge Qualification(y)),$$

$$\forall_{x,y} (hasCompetence(x,y) \rightarrow Employee(x) \wedge Competence(y)),$$

$$\forall_{x,y} (hasProfession(x,y) \rightarrow Qualification(x) \wedge Profession(y)),$$

$$\forall_{x,y} (rank(x,y) \rightarrow Qualification(x) \wedge Numeric(y)).$$

В предметной области бурения в качестве результата рассматривается скважина с заданным набором свойств таких как назначение, конструкция, тип, месторождение и другие. В процессе бурения используется буровая установка, конкретные операции требуют участия бригады буровиков, обладающих различной специализацией, расходуются буровые и обсадные трубы различного диаметра (рисунок 2.5).

Иерархия понятий может уточняться в еще более специализированных онтологиях, вплоть до уровня онтологии конкретного предприятия.



Рисунок 2.5 – Расширение онтологии управления ресурсами на предметную область бурения

## 2.4 Построение онтологической модели предприятия

На основе прикладной онтологии строится онтологическая модель предприятия  $M$ :

$$M = \{O_{domain}(O_{plan}), I\}$$

в которую, помимо понятий и отношений базовой онтологии  $O_{plan}$  и прикладной онтологии  $O_{domain}$ , рассмотренных выше, включаются дополнительные понятия уровня предприятия, а также экземпляры  $I$  введенных ранее понятий, например, добавляются единицы оборудования с инвентарными номерами, а также рабочие с табельными номерами, навыками и компетенциями..

Вместе с тем, часть экземпляров понятий и отношений онтологической модели будет формироваться уже в ходе вычислений и построения планов работы предприятия, например, на основе типовых технологических процессов будут созданы экземпляры операций, привязанных к экземплярам соответствующих заказов.

Например, пусть задан технологический процесс  $p_1 \in Process$ , описывающий соединение двух деталей  $\{c_1, c_2\} \subset Component$  с целью получения изделия  $f_1 \in FinalProduct$  и состоящий из трех операций  $\{o_1, o_2, o_3\} \subset Operation$ . Операции  $o_1$  и  $o_2$  – представляют собой транспортировку и установку деталей  $c_1$  и  $c_2$ , операция  $o_3$  – их соединение. Все три операции являются частью технологического процесса:

$$partof(o_1, p_1),$$

$$\begin{aligned} &partof(o_2, p_1), \\ &partof(o_3, p_1). \end{aligned}$$

К моменту выполнения операций по транспортировке соответствующая деталь должна быть в наличии:

$$\begin{aligned} &consume(o_1, c_1), \\ &consume(o_2, c_2). \end{aligned}$$

Операция по сборке  $o_3$  должна выполняться после завершения операций транспортировки:

$$\begin{aligned} &follow(o_3, o_1) \\ &follow(o_3, o_2) \end{aligned}$$

В результате выполнения технологического процесса  $p_1$  будет получено изделие  $f_1$ :

$$produce(p_1, f_1).$$

Операции по транспортировке одновременно задействуют мостовой кран  $r_1$ , а также рабочего  $r_2$ , обладающего компетенцией  $comp_1 \in Competence$  «Допущен к выполнению стропальных работ»:

$$\begin{aligned} &require(o_1, r_1) \rightarrow Crane(r_1), \\ &require(o_2, r_1) \rightarrow Crane(r_2) \\ &require(o_1, r_2) \rightarrow Employee(r_2) \wedge hasCompetence(r_2, comp_1), \\ &require(o_2, r_2) \rightarrow Employee(r_2) \wedge hasCompetence(r_2, comp_1), \end{aligned}$$

Операция сборки требует рабочего  $r_3$  с профессией «Сборщик»  $pr_1 \in Profession$ :

$$require(o_3, r_3) \rightarrow Employee(r_3) \wedge hasProfession(r_3, pr_1).$$

Также заданы:

- производственный заказ  $\{order_1\} \subset Order$  на выпуск изделия  $f_1$ :

$$create(order_1, f_1).$$

- список сотрудников  $\{emp_1, emp_2, emp_3\} \subset Employee$ :

$$\begin{aligned} &hasCompetence(emp_1, comp_1), \\ &hasProfession(emp_2, pr_1), \\ &hasProfession(emp_3, pr_1), \end{aligned}$$

- состав оборудования  $\{machine_1, machine_2\} \subset Equipment$  и  $\{crane_1\} \subset Crane$ ,
- детали на складе  $\{c_1, c_2\} \subset Component$ .

В результате, с помощью применения функций интерпретации  $\Phi$ , будут получены следующие выводы-утверждения:

- чтобы создать изделие  $f_1$  нужно завершить технологический процесс  $p_1$ ;
- чтобы завершить технологический процесс  $p_1$ , нужно выполнить операции  $\{o_1, o_2, o_3\}$ ;

- чтобы приступить к выполнению операции  $o_1$ , нужно дождаться появления детали  $c_1$  (аналогично для операции  $o_2$  – дождаться детали  $c_2$ );
- для выполнения операций  $\{o_1, o_2\}$  подходят ресурсы  $emp_1$  и  $crane_1$ ;
- чтобы приступить к выполнению операции  $o_3$  нужно дождаться завершения предшествующих операций  $o_1$  и  $o_2$ ;
- при выполнении операции  $o_3$  можно выбрать одного из двух рабочих:  $emp_2$  и  $emp_3$  (каждый из них обладает требуемой профессией).

На этой основе строится сцена предприятия  $S$ , которая содержит значения атрибутов всех экземпляров понятий и отношений онтологической модели предприятия для заданного момента времени  $t$ :

$$S = M(t).$$

Начальная сцена будет загружаться в ЦД вместе с онтологической моделью предприятия.

В дальнейшем, сцена будет перестраиваться в ЦД под действием событий, поступающих в реальном времени.

При этом предлагаемый подход позволит минимизировать расхождение между планом и фактом, т.е. будет постоянно поддерживать ЦД в синхронизированном состоянии.

## 2.5 Методика онтологического описания модели объекта планирования

Для формирования онтологической модели предприятия, для построения «цифрового двойника» объекта планирования, необходимо сделать следующее:

- 1) Описать номенклатуру используемых и производимых продуктов (сырья, полуфабрикатов, информационных продуктов, документов, изделий и др.). Часть продуктов (сырье, 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 производственных ресурсов. Для ресурсов задается: производительность; календарь работы; правила проведения планово-предупредительных ремонтов и обслуживания в зависимости от наработки или объемов 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 может быть установлено отношения «вложенности» одних групп в другие.

- 3) Задать технологические процессы получения продуктов, представляющие собой упорядоченный список операций. Для операций указываются предшествующие и последующие операции, к какому технологическому или бизнес-процессу она относится, нормативы времени выполнения: фиксированные или зависящие от объемов участвующей в преобразовании продукции и, наконец, необходимые для ее выполнения ресурсы (путем задания необходимых свойств, определяющих выбор оборудования, материалов и рабочих). Такая детальная спецификация – основа предлагаемого подхода, которая будет позволять агентам операций настраиваться на специфику предметной области. Время выполнения операции может зависеть от производительности выбранной линии.
- 4) Определить критерии, предпочтения и ограничения для адаптивного планирования заказов на ресурсы предприятия.
- 5) Сформировать перечень заказов, содержащих сведения об изготавливаемом продукте, его количестве и сроках выполнения.

Таким образом, каждому реальному предприятию будет поставлена в соответствие его онтологическая модель, отражающая текущее состояние его заказов и ресурсов, а также планы и показатели работы на любой горизонт времени, ограниченный сроками крайнего заказа.

На рисунке 2.6 представлен пример детальной спецификации одной из операций по сборке самолета МС-21. Программный агент операции сможет загрузить данное описание и настроить свое поведение исходя из указанных ограничений и требований. Степень детализации такого семантического описания операции может быть достаточно высокой, позволяя агенту операции найти нужных рабочих с требуемым разрядом или, при возникновении событий задержки, узнать, агента кокой операции следует предупредить о задержке.

В результате применения предлагаемого подхода расписание работы предприятия представляется в виде сложной сети семантически связанных между собой объектов, что позволяет не только учитывать специфику каждой задачи, но и использовать «топологию» расписания при принятии решений агентами, например, быстрее определять состав участников переговоров, существенно сокращая перебор вариантов и время вычислений



Рисунок 2.6 – Пример спецификации технологической операции сборки самолета МС-21

Таким образом, появляется возможность создать максимально универсального агента задачи, но полностью индивидуально настраивать его экземпляры, работающие в ходе планирования, на специфику предметной области предприятия.

В результате, ИКФС предприятия будет включать в себя следующие основные компоненты:

- в базе знаний предприятия будет храниться базовая онтология управления ресурсами, онтология предметной области и онтологическая модель предприятия, описывающая в виде семантической сети его структуру, изделия, технологические процессы (до уровня каждой операции), продукты и ресурсы;
- в мультиагентной подсистеме интеллектуальной системы управления ресурсами эта онтологическая модель будет «оживать» в том смысле, что будут создаваться экземпляры агентов для каждой сущности, которые будут использоваться для анализа конкретной ситуации, планирования заказов на ресурсы и контроля их исполнения, причем с адаптацией по событиям.

Пример формирования онтологической модели ЦД предприятия показан на рисунке 2.7.

Можно считать, что реальному предприятию на сервере системы при этом будет поставлена в соответствие его онтологическая модель («цифровой двойник»), которая обновляется данными о событиях и зеркально отражает состояние реальных подразделений в каждый момент времени.

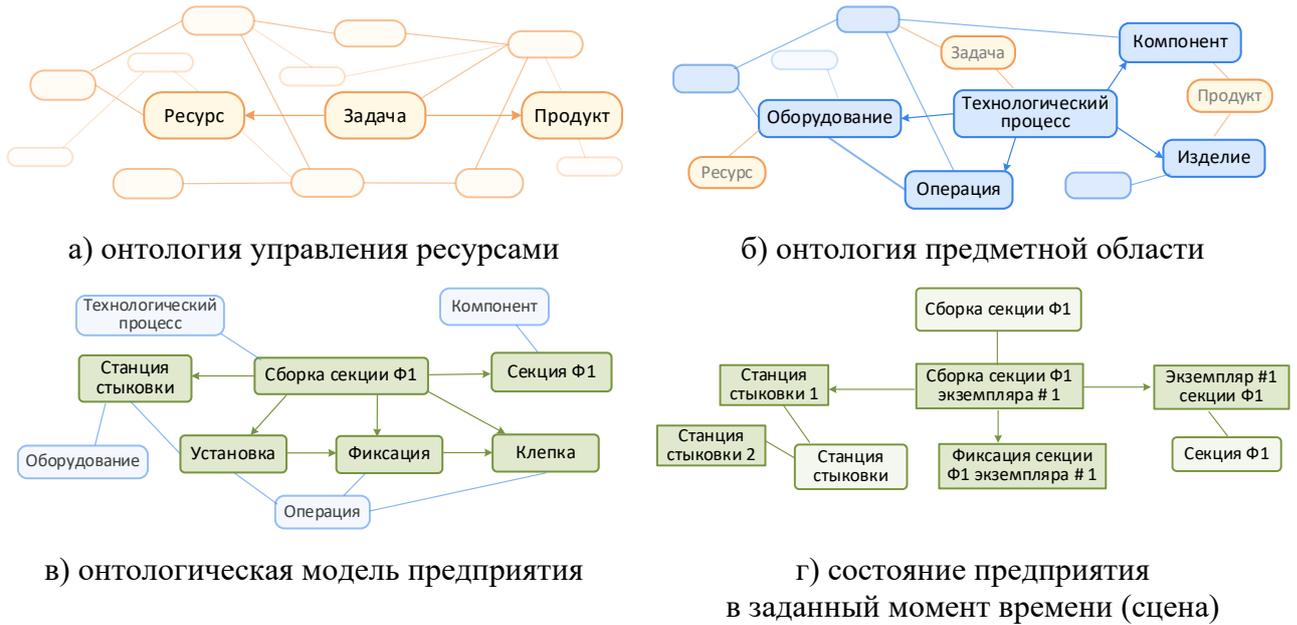


Рисунок 2.7 – Этапы формирования онтологической модели ЦД предприятия

Эта информация может быть использована не только для оперативного планирования, но и для моделирования работы предприятия, например, с целью определения эффекта от применения дополнительного оборудования, введения двухсменного режима работы и т.д. Такое опережающее моделирование может осуществляться на другом сервере, параллельно с работой интеллектуальной системы оперативного планирования.

Проведенный системный анализ и разработка предлагаемого базиса понятий и отношений для построения онтологии управления ресурсами и производных прикладных онтологий, а также функций семантической обработки, как будет показано в дальнейших разделах, позволяет создавать достаточно широкий класс онтологических моделей предприятий, которые могут загружаться и интерпретироваться относительно универсальной МАС, настраиваемой посредством онтологических моделей на специфику предприятия, за счет использования предложенной библиотеки онтологических исчислений для учета семантики предметной области.

Несмотря на то, что эта библиотека была разработана для решения задач управления ресурсами предприятий, представляется перспективным ее дальнейшее развитие и применение и для других предметных областей и задач, решаемых на основе мультиагентных технологий, таких как конструирование или инжиниринг сложных объектов, распознавание образов и другие.

## 2.6 Выводы

В рамках второй главы получены следующие результаты:

- 1) Показаны основные преимущества использования онтологий при решении задачи управления ресурсами предприятий: возможность накопления и интеграции разнородных сведений о производственных объектах и процессах в удобной для компьютерной обработки форме, возможность расширения и дополнения описания предметных областей разрабатываемых систем без перепрограммирования, наглядность и доступность представления информации пользователю.
- 2) Рассмотрены современные стандарты описания онтологий уровня представления на базе RDF и OWL. Предложено использовать эти стандарты при разработке онтологических моделей объекта планирования, расширив набор понятий, атрибутов и отношений в рамках онтологии верхнего уровня, используемой системой планирования.
- 3) Проведен анализ специализированных онтологий верхнего уровня, разрабатываемых для систем управления производственными ресурсами. На основе этого анализа, а также обобщенной постановки задачи управления ресурсами предприятия в реальном времени, определен базис из понятий и отношений онтологии управления ресурсами, который будет использован мультиагентной системой.
- 4) В качестве основных понятий этой онтологии выбраны: заказ, задача, ресурс и продукт, в качестве отношений – заказ требует создания продукта, задача использует ресурсы, потребляет или производит продукты, является частью групповой задачи, ресурс входит в группу ресурсов (исполнитель относится к подразделению) и некоторые другие.
- 5) В качестве принципиально нового элемента формирования онтологий, становящимся центром семантической сети и позволяющего сделать онтологии действенным инструментом планирования и оптимизации ресурсов для создания ЦД процессов управления предприятиями, предложено использовать понятие «задачи», состав требований к ресурсам которой может пополняться динамически. Для каждой задачи могут задаваться связи с другими задачами, входные и выходные объекты, требования к оборудованию и инструменту, требования к компетенциям рабочих и т.д.
- 6) Предложена методика построения онтологической модели ЦД предприятия в виде последовательности шагов по определению различных аспектов модели: номенклатуры производимых продуктов, состава используемых ресурсов, технологических процессов до уровня операций, перечня заказов, критериев, предпочтений и ограничений для планирования.

### 3 РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОГО МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ

#### 3.1 Мультиагентный подход к решению задачи планирования

Для решения задачи планирования предлагается использовать мультиагентный подход, в основе которого лежит сопоставление сущностям предметной области действующих от их лица программных агентов [87]. Будем определять каждого агента как машину состояний, способную воспринимать события, принимать решения и взаимодействовать с другими агентами через отправку сообщений (рисунок 3.1). Совокупность агентов образует мультиагентную систему (МАС). Поведение МАС не регулируется каким-либо централизованным алгоритмом, а, напротив, возникает из локальных взаимодействий образующих ее агентов. Каждый агент обладает набором поведений, определяющих его реакцию на сообщения от других агентов, либо на изменение внешних условий (событий). Как отмечается в [15], МАС является вычислительной программой, состоящей из автономных блоков решения задач, каждый из которых способен к гибким, автономным и социально организованным действиям, направленным на достижение заданных целей. Использование мультиагентного подхода наиболее оправданно при решении задач, характеризующихся большим количеством сущностей с различными, часто противоположными, целями. В этом случае МАС демонстрируют преимущества распределенного и конкурентного механизма поиска решений в том числе за счет реализации сложных протоколов взаимодействия между агентами.

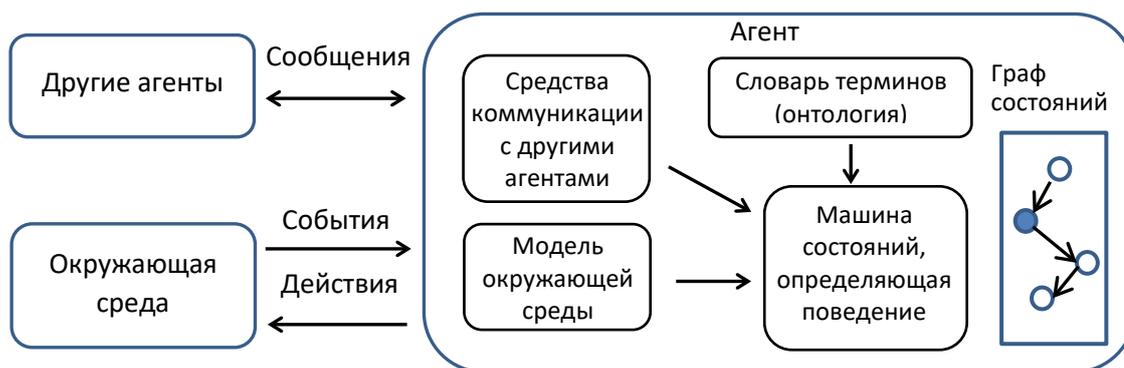


Рисунок 3.1 – Схема задания программного агента

В сравнении с традиционными объектно-ориентированными системами агентная парадигма предлагает делегировать контроль за поведением программных объектов самим объектам, наделив их возможностью реагировать на внешние сигналы и запретив напрямую вмешиваться в логику работы других объектов. При этом появляется возможность выделения агентам собственных потоков управления, обеспечивив возможность их параллельной работы в многопоточной среде. В общем случае мультиагентный подход определяет лишь базовые

принципы (парадигму) решения задачи, оставляя за скобками вопросы выбора конкретных типов агентов, а также определения протоколов их взаимодействия.

Для реализации мультиагентных систем планирования в работах В.А. Виттиха и П.О. Скобелева [6, 7] была предложена концепция сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей), а также построенный на ее основе метод компенсаций. В основе этого подхода лежит использование агентов потребностей и возможностей, постоянно ищущих соответствие между собой на виртуальном рынке системы. В случае успеха между агентами устанавливаются связи, которые в дальнейшем могут быть пересмотрены. При этом в случае ухудшения условий для одного из агентов, инициировавший разрыв связи агент выплачивает пострадавшему компенсацию. Результирующий план строится на основе виртуального рынка заказов и ресурсов как конкурентное равновесие, что далее позволяет агентам гибко перестраивать план при поступлении непредвиденных событий в ходе выявления и разрешения конфликтов путем переговоров и взаимных уступок (компромиссов), направленных на достижение консенсуса [20].

Целью настоящего исследования является развитие концепции ПВ-сети с целью создания набора базовых классов агентов, способных интерпретировать знания предметной области, представленные в онтологии объекта планирования.

Задача адаптивного планирования ресурсов предприятия может быть представлена в виде задачи достижения консенсуса между агентами системы при переходе от одного состояния – к другому при появлении очередного события.

Введем понятие состояния ЦД предприятия, представляющее собой композицию состояний  $s_i, i = \overline{1, n}$  объектов, участвующих в производственном процессе, к числу основных которых будем относить заказы, продукты, ресурсы и задачи):

$$S_{twin} = \{s_i\},$$

$$s_i = \{model_i, plan_i, kpi_i\},$$

где:  $model_i$ , – онтологическая модель объекта;  $plan_i$  – план работы объекта,  $kpi_i$  – показатели эффективности его работы.

Если обозначить как  $S_{real}$  состояние реального предприятия, то необходимо, чтобы состояние реального предприятия и состояние его ЦД в каждый момент времени  $k$  максимально совпадали:

$$D(S_{real}^{(k)}, S_{twin}^{(k)}) \rightarrow 0,$$

где  $D$  – функция, показывающая степень различия онтологической модели, планов и показателей объектов ЦД с реальным предприятием. Тогда при появлении нового события  $Event^{(k)}$  в

реальном предприятии, его ЦД должен максимально быстро перейти в новое состояние за счет переходного процесса по адаптивному перепланированию задач и ресурсов, задетых событием:

$$S_{twin}^{(k+1)} = F(S_{twin}^{(k)}, Event^{(k)}),$$

где  $F$  – функция, адаптивно перестраивающая план работы предприятия в ответ на поступившее событие, которую и должна реализовывать мультиагентная система.

Можно считать, что тем самым и будет обеспечиваться синхронизация состояний ЦД и реального предприятия

### 3.2 Базовые классы агентов

Каждому объекту  $s_i$ , из числа указанных выше, предлагается поставить в соответствие программного агента  $a_i$  реализующего описанный для его класса тип поведения при принятии решений на основе анализа состояния связанного с ним объекта.

Таким образом, в качестве базовых типов агентов выделены агенты заказов, задач, ресурсов, продуктов, а также агент системы (таблица 3.1).

Цели каждого агента определим через функцию удовлетворенности  $Y_i(plan_i)$ , представляющую собой взвешенную сумму  $M$  компонент, соответствующих различным критериям – показателям  $kpi_i$  и рассчитываемых на основе текущего плана работы  $plan_i$  связанного с агентом объекта:

$$Y_i = \sum_{j=1}^M w_{ij} y_{ij},$$

где:  $y_{ij}$  – компонент функции удовлетворенности по критерию  $j = \overline{1, M}$ ,

$w_{ij}$  – весовой коэффициент, такой что  $0 \leq w_{ij} \leq 1$  и  $\sum_{j=1}^M w_{ij} = 1 \forall i$ .

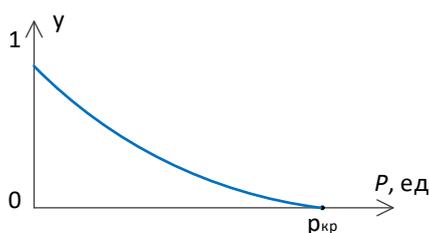
Таблица 3.1 – Цели, предпочтения и ограничения основных классов агентов

Тип	Цели и предпочтения	Ограничения
Агент заказа	Быть выполненным с минимальной задержкой ( $c$ ) и стоимостью ( $p$ ): $Y_i = w_1 \left(1 - \frac{c}{c_{кр}}\right) + w_2 \left(1 - \frac{p}{p_{кр}}\right)$	Сроки, объем, предельная стоимость
Агент задачи: <ul style="list-style-type: none"> <li>• групповой</li> <li>• атомарной</li> </ul>	Быть выполненным на подходящем ресурсе в указанные сроки за минимальное время ( $\tau_i = finish_i - start_i$ ): $Y_i = \begin{cases} 1, & \tau_i < \tau_{опт} \\ \frac{\tau_i - \tau_{кр}}{\tau_{опт} - \tau_{кр}}, & \text{иначе} \end{cases}$	Характеристики требуемых ресурсов и продуктов, сроки начала и окончания, взаимосвязи с другими задачами

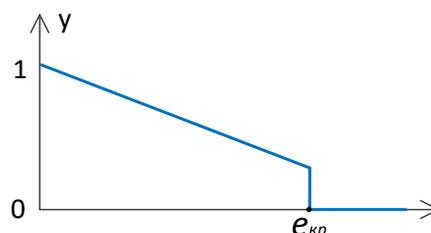
Продолжение таблицы 3.1

Агент ресурса	Быть максимально загруженным, минимизировать простои и переналадки: $Y_i = \begin{cases} 0, & u_i < u_{кр} \\ \frac{u_i - u_{кр}}{u_{опт} - u_{кр}}, & \text{иначе} \end{cases}$ где $u_i$ – утилизация ресурса $i$	Календарь работы, интервалы недоступности, правила обслуживания и переналадки, производительность
Агент продукта	Обеспечить свое хранение, минимизировать время между производством и потреблением ( $e$ ): $Y_i = 1 - \frac{e_i}{e_{кр}}$	Требования по хранению, время поставки или производства, время потребления
Агент системы (предприятия в целом)	Выявление «узких мест» в расписании, управление активностью агентов системы, взаимодействие с внешними системами	Время, отводимое на планирование, глубина цепочек перестановок в расписании

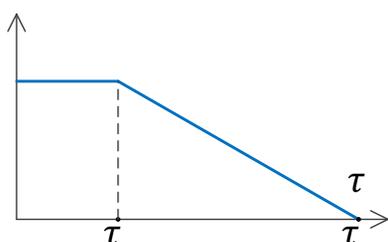
Примеры компонент функций удовлетворенности приведены на рисунке 3.2.



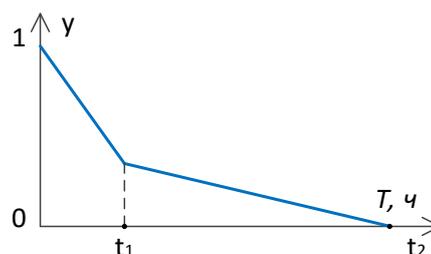
а) заказ (минимальная стоимость исполнения)



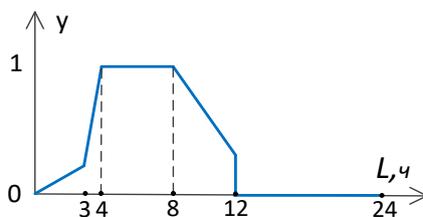
б) продукт (минимальное время хранения)



в) задача (минимальная продолжительность)



г) задача (максимальная оперативность)



д) ресурс (суточная загрузка)

Рисунок 3.2 – Компоненты функций удовлетворенности различных типов агентов

В качестве основы для принятия решений предлагается использовать «виртуальный рынок» системы, на котором агенты заказов могут покупать время ресурсов, и решать конфликтные ситуации, когда несколько заказов претендуют на использование одного и того же ресурса или продукта, посредством выплаты компенсаций за освобождение слота времени.

В зависимости от достигнутой удовлетворенности, агенту начисляется премия (штраф), размер которой определяется через заданную для него функцию бонусов и штрафов:  $B_i(Y_i)$ . Ожидаемый бонус и текущий бюджет могут быть потрачены агентом на выплату компенсаций агентам, которые согласились на уступки и чье состояние было изменено при перестройке расписания. Пример функции бонусов и штрафов показан на рисунке 3.3.

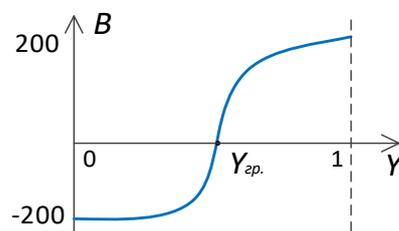


Рисунок 3.3 – Пример функции бонусов и штрафов

Функция удовлетворенности определяет чувствительность агента к изменению состояния связанного с ним объекта, а функция бонусов и штрафов – возможность агента перестроить расписание в угоду своих интересов (его «агрессивность» при достижении собственных целей).

Вид функций выбирается таким образом, чтобы приближение состояния агента к его идеалу показателей  $kpi_i$ , повышало удовлетворенность и размер бонуса агента (рисунок 3.4).

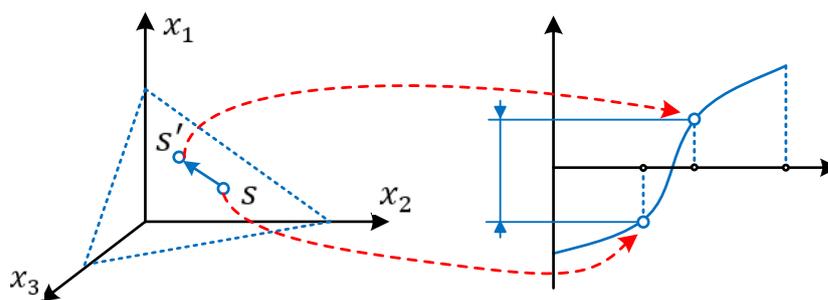
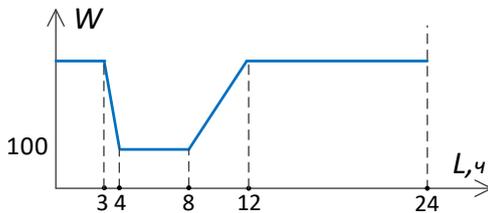


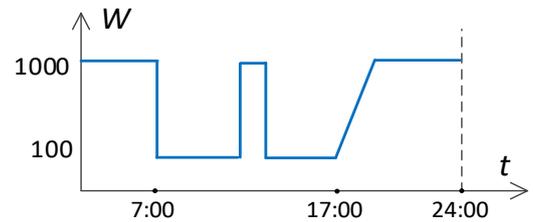
Рисунок 3.4 – Связь бонусов и штрафов с изменением состояния и удовлетворенности агентов при разрешении конфликта (переход  $s \rightarrow s'$  дает прирост  $\Delta B$ )

Агенты ресурсов дополнительно характеризуются функцией стоимости  $W_i(plan_i, kpi_i)$ , определяющей стоимость размещения задач (рисунок 3.5). Стоимость ресурса может зависеть как от графика его работы («предпочитаю работать в дневное время», «необходим технологический перерыв»), так и от предпочтений ресурса по загрузке (например, выполнять одиночный заказ может быть дороже). Такой подход позволяет реализовать концепцию

«разделяемой стоимости», делая более выгодным размещение на уже задействованных в это время ресурсах. В общем случае функции стоимости могут быть заданы через комбинацию из  $K$  компонент, а общая стоимость размещения будет складываться из всех надбавок и скидок, которые распространяются на данное предложение:  $W_i = \sum_j^K w_{ij}$ .



а) от дневной загрузки ( $L$  – загрузка за день)



б) от графика работы

Рисунок 3.5 – Стоимость размещения на ресурсе

Рассмотрим пример расчетов агентов по функциям удовлетворенности и функциям бонусов и штрафов в предлагаемом методе компенсаций:

- 1) Пусть удовлетворенность агентов заказов определяется временем их завершения, а удовлетворенность ресурсов – отношением длительности работы к длительности простоя. Функции бонусов и штрафов заданы линейными с областью значений  $[-100; 100]$  для заказов и  $[0; 100]$  для ресурсов.
- 2) В исходном состоянии  $S_0$  на ресурсе  $R_1$  выполняются заказы  $O_1$  и  $O_2$ . Заказ  $O_3$  не запланирован (рисунок 3.6).

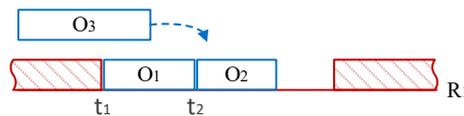


Рисунок 3.6 – Исходное размещение заказов на ресурсе

- 3) Агент  $O_3$  начинает поиск размещения с наиболее выгодного с точки зрения функции удовлетворенности варианта с началом выполнения в момент времени  $t_1$  (соответствует состоянию  $S_1$ , таблица 3.2), для чего отправляет запросы конфликтующим и мешающим занять это место агентам  $O_1$  и  $O_2$  с просьбой найти другое размещение и сообщить сумму своих суммарных потерь.

Таблица 3.2 – Удовлетворенность и бюджет агентов при различных состояниях

Агент \ Состояние	$S_0$		$S_1$		$S_2$	
	$Y$	$B$	$Y$	$B$	$Y$	$B$
$O_1$	1.0	100	0.5	0	1.0	100
$O_2$	0.7	40	0.0	-100	0.0	-100
$O_3$	0.0	-100	1.0	100	0.8	60
$R_1$	0.7	70	0.9	90	0.9	90

- 4) Рассмотрев этот запрос, агент  $O_1$  соглашается переместиться и начаться после завершения  $O_3$  при условии получения компенсации в 100 ед. (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Изменение бюджета агентов при переходе к различным состояниям

Агент	$S_0 \rightarrow S_1$	$S_0 \rightarrow S_2$
$O_1$	-100	0
$O_2$	-140	-140
$O_3$	200	160
$R_1$	20	20

- 5) Агент  $O_2$  не может найти нового размещения (на ресурсе нет места для выполнения трех заказов) и требует компенсацию за свое полное вытеснение (200 ед.).
- 6) Агент ресурса  $R_1$  сообщает, что в предлагаемом варианте готов компенсировать участникам переговоров 20 ед., которые будут получены им благодаря снижению времени простоя (заказ  $O_3$  выполняется дольше вытесняемого заказа  $O_2$ ).
- 7) При начале выполнения в момент времени  $t_1$  агент  $O_3$  получит премию 200 ед., однако, этого не хватает для того, чтобы компенсировать суммарные потери остальных агентов, равные 220 ед. Поэтому рассматриваемый вариант отбрасывается как недостижимый.
- 8) Агент  $O_3$  переходит к рассмотрению следующего варианта с размещением в момент  $t_2$  (состояние  $S_2$ ), при котором необходимо решить конфликт только с заказом  $O_2$ .
- 9) Получаемой в этом состоянии агентом  $O_3$  премии (160 ед.) достаточно для выплаты компенсации конфликтующему агенту (120 ед.). Решение о перестановке принимается, все участвующие агенты оповещаются о необходимости внести изменения в свои расписания (рисунки 3.7 – 3.8).



Рисунок 3.7 – Размещение заказов после осуществления перестановок

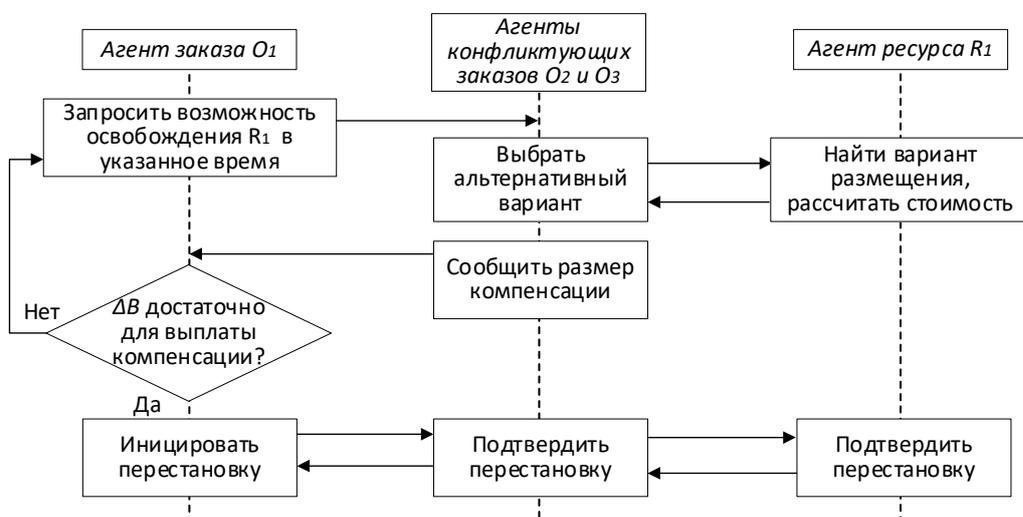


Рисунок 3.8 – Схема переговоров агентов

Таким образом, в ходе взаимодействия агентов над расписанием выполняются следующие типы базовых операций и расчетов:

$$\Delta B = \left\{ \begin{array}{l} - \text{ размещение задачи на свободном участке расписания:} \\ \qquad \qquad \qquad \Delta B_{task} + \Delta B_{resource} > 0; \\ - \text{ обмен задачами } task_1 \leftrightarrow task_2 \text{ между ресурсами } resource_1 \leftrightarrow resource_2: \\ \qquad \qquad \qquad \Delta B_{task_1} + \Delta B_{task_2} + \Delta B_{resource_1} + \Delta B_{resource_2} > 0; \\ - \text{ вытеснение менее выгодных задач из расписания:} \\ \qquad \qquad \qquad \Delta B_{task1} + \Delta B_{task2} + \Delta B_{resource} > 0; \\ - \text{ рекурсивная перестановка (сдвиг) задач при наличии конфликтов:} \\ \qquad \qquad \qquad \sum_{t \in \{tasks\}} \Delta B_t + \sum_{r \in \{resources\}} \Delta B_r > 0. \end{array} \right. \quad (*)$$

Предложенный выше подход по разрешению конфликтов может быть расширен на случай, когда у агентов не хватает средств на улучшение своего состояния, однако их размещение может положительно сказаться на интегральных показателях работы предприятия. В этом случае агент системы в целом может профинансировать улучшение положения каждого из агентов из выигрыша, получаемого на уровне предприятия.

### 3.3 Развитие и модификация модели ПВ-сети и метода компенсаций

В настоящем разделе предлагается модификация модели ПВ-сети и метода компенсаций, позволяющая использовать онтологическую модель предприятия в мультиагентной системе управления ресурсами, в которой эта модель будет «оживать» в том смысле, что для каждого экземпляра объекта онтологии будут создаваться экземпляры агентов, используемые для анализа сложившейся ситуации, планирования ресурсов и контроля за исполнением планов

При этом рекурсивно строится цепочка перестановок, в которой одна задача перемещает другую, а та, в свою очередь, может переместить еще одну и т.д. Допустимость перестановки оценивается исходя из финансовых возможностей агентов. В результате взаимодействия агентов посредством выявления конфликтов и проведения переговоров с уступками (путем обмена сообщениями по заданным регламентам) достигается допустимое локально-оптимальное решение, которое в дальнейшем адаптивно корректируется в «скользящем режиме» на рассматриваемом горизонте планирования:

- 1) В соответствии с текущим состоянием цифрового двойника  $S_{twin}$  создаются экземпляры агентов заказов, ресурсов и продуктов, которые получают разрешение от агента системы начать активность.

- 2) Агент активного заказа  $a_k$  считывает из базы знаний технологический процесс получения связанного с ним продукта и порождает агентов задач, соответствующих технологическому процессу и операциям выстроенных в иерархию, которые получают описанные в онтологической модели предприятия свойства и атрибуты.
- 3) Агент задачи верхнего уровня проверяет наличие используемых при выполнении задачи продуктов, оценивает требования по ресурсам и подбирает их комбинацию на основе оценки своей продолжительности и производительности ресурсов. Процедура поиска вариантов размещения включает анализ требуемых ресурсов, сопоставление требований задач и возможностей ресурсов, согласование времен доступности всех ресурсов, выбор лучшей комбинации исполнителей. При этом по мере подбора ресурсов определяется множество заказов  $\{a_i \mid i \neq k, plan'_k \cap plan_i \neq \emptyset\}$ , 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 родительской задачи верхнего уровня, который уточняет свое размещение или предлагает дочерним задачам найти размещение 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 версии плана) вариантом расписания. В результате определяется цепочка перестановок, рассчитываются потери агентов  $\Delta B_i$ , которых затронули изменения. Цепочка перестановок считается успешной, если агент заказа может компенсировать потери конфликтующим заказам благодаря достигаемому приросту функции бонусов и штрафов  $\Delta B_k$ :

$$\Delta B_k \geq \sum_{i \neq k}^n \Delta B_i$$

В этом случае происходит утверждение изменений в расписании, иначе – ищется другой вариант перестановок.

- 7) Агент заказа проверяет наличие связанных с ним отношений «Производится» продуктов и оповещает их агентов о сроках поставки на склад.
- 8) Процесс завершается, если достигнуто условие «конкурентного равновесия» (консенсуса), которое состоит в том, что для любого агента  $a_k$  больше не находится такого изменения плана работы  $plan'_k$ , которое привело бы к приросту удовлетворенности  $\Delta Y_k$  и, как следствие, увеличению значения функции бонусов и штрафов  $\Delta B_k$ , которое смогло бы компенсировать суммарные потери остальных агентов  $a_i$ , затронутых этим изменением и нашедших другой вариант размещения  $plan'_i$ , минимизирующий их потери и согласующийся с ранее принятыми изменениями:

$$\Delta B_k + \sum_{i \neq k}^n \Delta B_i < 0 \quad \forall_k \quad (**)$$

- 9) По достижению консенсуса или если вышло время, отводимое на построение расписания, мультиагентная система приостанавливает свою работу, выдает новый план исполнителям и переходит в режим ожидания новых событий.

Детальная спецификация требований к ресурсам позволяет сократить количество рассматриваемых вариантов и уменьшить число сообщений, передаваемых между агентами, ограничив их круг наиболее подходящими под требования задачи.

Существенным фактором, снижающим вычислительную сложность алгоритма, является использование направленного поиска вариантов перестановок в расписании, при котором взаимодействие происходит только между конфликтующими заказами. Так, если заказы обладают различными требованиями к ресурсам и продуктам, или слабо пересекаются по времени выполнения, то выбор размещения одного из них с меньшей вероятностью потребует пересмотра размещения другого, а соответствующая часть пространства решений будет отсечена.

Если принять за  $n$  общее число заказов, за  $m$  – среднее количество задач в рамках одного заказа, за  $p$  – число подходящих под требования ресурсов, продуктов и материалов, то оценка количества взаимодействий агентов составит  $O(n \cdot m \cdot p \cdot (1 + conflict\_count))$ , где  $conflict\_count$  – число конфликтов, возникающих при размещении заказа, в том числе при рекурсивной перестановке конфликтующих заказов. В практических задачах значение  $p$  существенно меньше общего числа ресурсов, а переменная  $conflict\_count$  ограничена размером компенсации, которую готов предложить агент за перестановку, в результате чего в конфликтное множество вовлекаются только «ближайшие в расписании» агенты. Дополнительно может быть

установлено предельное значение уровня вложенности конфликтов, при достижении которого, дальнейшее расширение конфликтного множества агентов будет остановлено.

Фрагмент предложенного модифицированного протокола взаимодействия агентов в процессе поиска и утверждения изменений в расписании показан на рисунке 3.9.

Агенты заказов отправляют запрос агенту системы о возможности начала переговоров по улучшению условий своего размещения в расписании. Агент системы в соответствии с заданной стратегией определения очередности активности заказов (1) отправляет разрешение на начало активности одному или нескольким агентам заказов. Если заказ уже размещен в расписании, то он освобождает все занятые ресурсы (2). Далее все связанные с заказом задачи проводят поиск размещения на подходящих для их выполнения ресурсах (3). Агент заказа предлагает всем конфликтующим с ним заказам провести поиск другого размещения и сообщить стоимость сопутствующих издержек. Процедура поиска нового размещения (0) является рекурсивным повторением процедуры активности заказа, с той лишь разницей, что начало ее выполнения инициируется не агентом сцены, а агентом другого заказа.

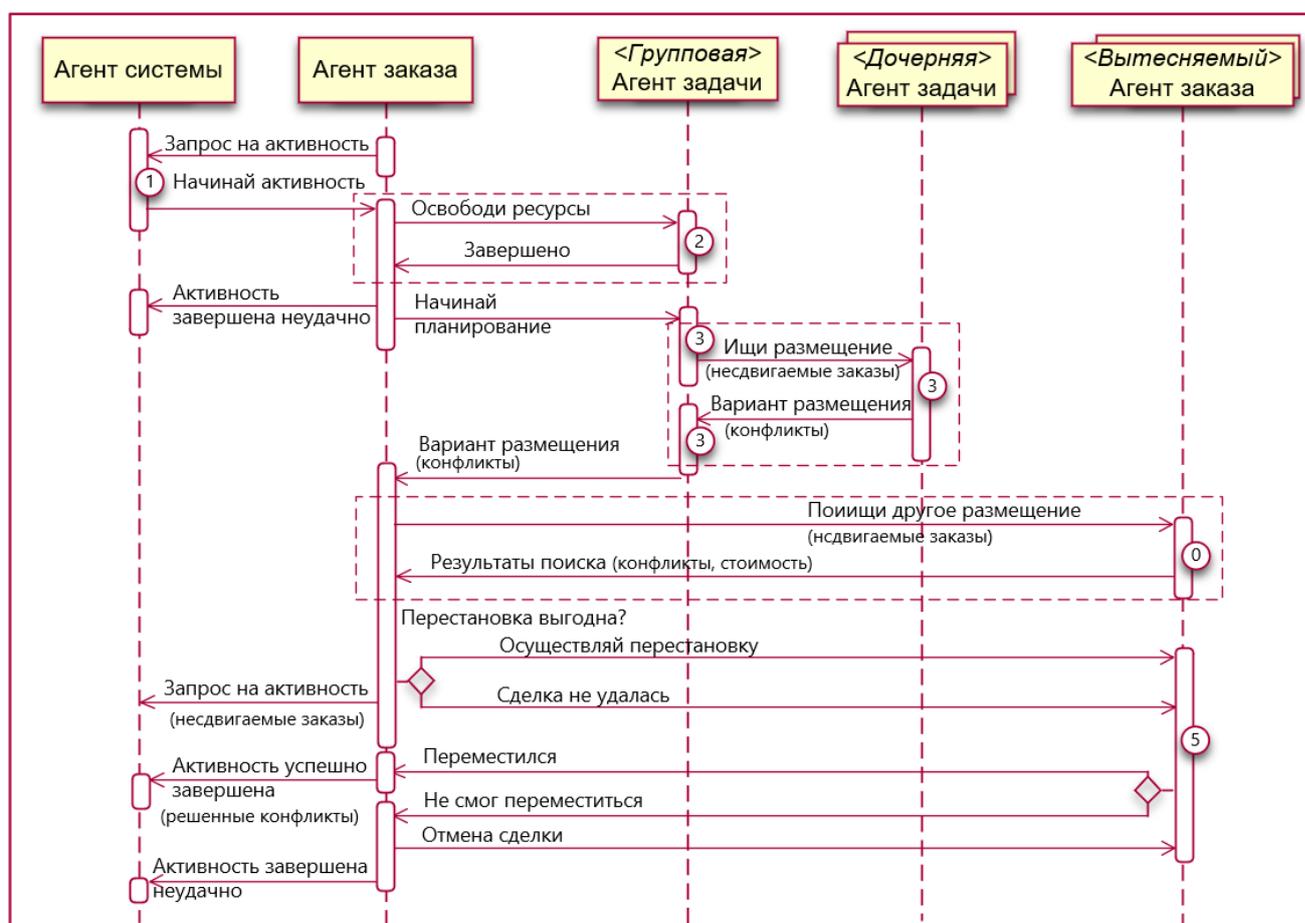


Рисунок 3.9 – Протокол переговоров агентов заказов

Подчеркнем, что свойства и атрибуты каждой сущности считываются из построенной на основе онтологии управления ресурсами базы знаний на этапе инициализации экземпляров агентов. Таким образом, типовая логика, формализованная в классе агента, многократно используется в каждом созданном экземпляре, при этом контекст ее применения определяется свойствами и отношениями, полученными из базы знаний.

Получив сведения о возможных перестановках от всех конфликтующих заказов, агент активного заказа принимает решение о целесообразности осуществления перестановок. Если перестановка не выгодна, то заказ оповещает все конфликтующие заказы об отмене договоренностей и обращается к агенту сцены с запросом на новую активность. При этом запоминаются заказы, чья перестановка наиболее дорогостоящая, при получении следующей активности заказ будет избегать конфликтов с ними. Если перестановки выгодны, то происходит утверждение изменений путем отправки сообщений всем участвующим в перестановках агентам.

Фрагмент протокола переговоров агентов задач и ресурсов при поиске размещения показан на рисунке 3.10. Логика поиска размещения инкапсулирована в поведении вспомогательного агента потребности, создаваемого агентом задачи. Первоначально проводится опрос подходящих под онтологическое описание ресурсов о доступных для размещения слотах времени. Далее выполняется процедура выбора лучшей комбинации ресурсов (4), алгоритм которой описан в разделе 3.7. Выбранным ресурсам отправляется запрос на размещение, при этом из расписания исключаются все конфликтующие заказы.

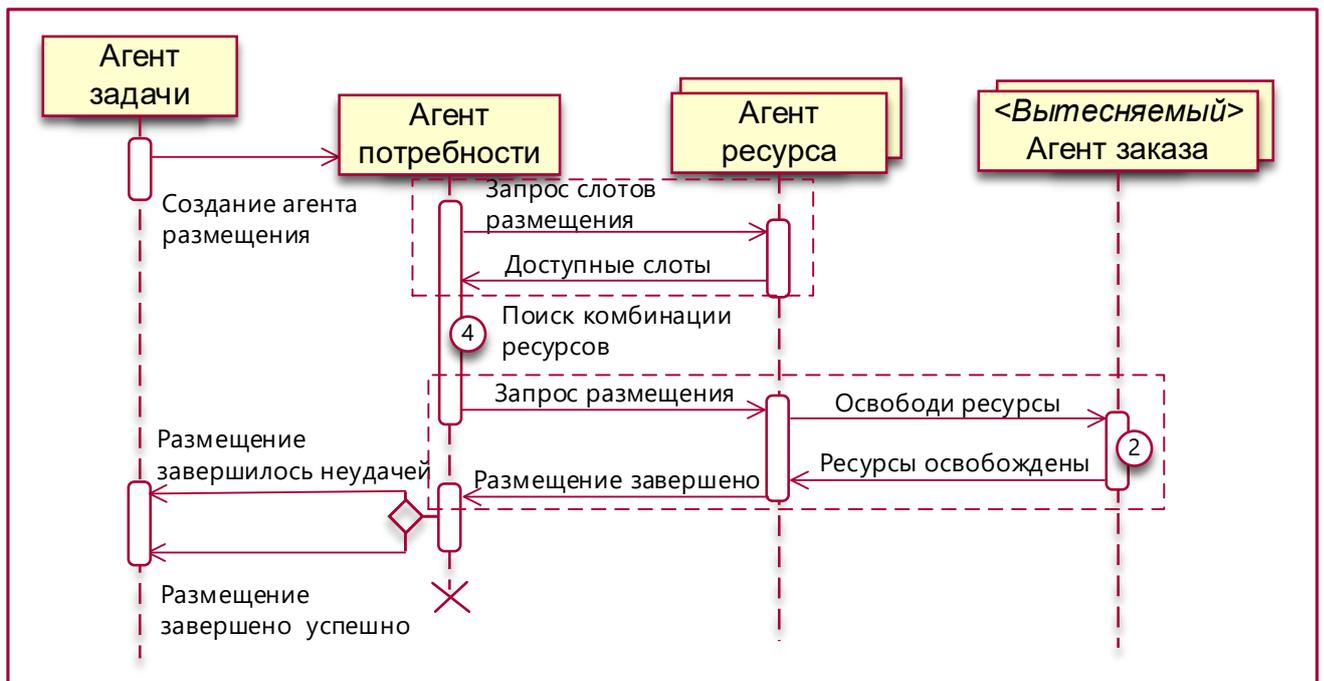


Рисунок 3.10 – Протокол переговоров агентов при поиске варианта размещения задачи

### 3.4 Алгоритм подбора комбинаций ресурсов

Для сопоставления концепта задачи и агента задачи в унифицированной МАС был разработан алгоритм подбора комбинаций ресурсов.

Для каждой задачи определена трудоемкость и границы размещения (интервал времени, в пределах которого необходимо найти размещение). Имеется набор позиций, каждая позиция имеет описатель с требованиями к ресурсу и список потенциально подходящих под них кандидатов, определяемых посредством поискового запроса к онтологической модели объекта планирования с целью выборки всех объектов, удовлетворяющих заданному набору требований.

В начале работы агент каждого кандидата по запросу сообщает набор доступных интервалов для размещения (как свободных, так и занятых другими задачами), находящихся в пределах границ размещения задачи.

Далее происходит поиск комбинации из кандидатов, полностью покрывающих все позиции, реализующий процедуру, близкую по своей логике методу ветвей и границ.

Для этого строится дерево поиска решений, каждый узел которого содержит:

- очередь еще не рассмотренных позиций, отсортированная в порядке «дефицитности» доступных под нее кандидатов (например, если на позицию подходит только один кандидат, целесообразно рассмотреть эту позицию первой);
- множество уже выбранных кандидатов;
- набор доступных для размещения интервалов (получен путем комбинирования интервалов доступности уже выбранных к этому шагу кандидатов);
- оценку перспективности этой ветки дерева (самое оптимистичное значение целевой функции агента задачи, достижимое в этой ветке);
- очередь из дочерних узлов, отсортированную по оценке перспективности каждого дочернего узла.

В корневом узле дерева ни одна из позиций еще не заполнена. В качестве ограничений передается набор доступных для размещения интервалов, полученный при выборе исполнителей для вышестоящих групповых задач. Выбор узлов для дальнейшего развертывания осуществляется с помощью функции оценки: в первую очередь разворачиваются наиболее перспективные. После достижения терминального узла дерева, вычисленное для него фактическое значение целевой функции может отсечь ряд еще не просмотренных «невыгодных» ветвей (тех, значение функции оценки которых меньше, чем значение целевой функции уже достигнутого на текущий момент решения).

Каждый дочерний узел получается из родительского выбором одного из кандидатов на очередную позицию. При этом, если на рассматриваемом участке расписания этого ресурса уже запланирована другая задача, то формируется дополнительная ветвь, в которой мешающая задача считается распланированной. Стоимость такого вытеснения на этом этапе принимается равной нулю (уже использованный ранее принцип оптимистичной оценки). Таким образом, количество дочерних узлов определяется числом кандидатов на позицию и необходимостью вытеснения размещенных на них задач. Каждый кандидат может быть назначен только на одну позицию, поэтому выбранные ранее кандидаты в дальнейшем ветвлении дерева не участвуют (рисунок 3.11).

После развертывания терминального узла, задаче становится окончательно известен состав исполнителей и интервалы времени, на которых она может быть выполнена. Однако, до окончательного размещения необходимо разобрать конфликты и проверить возможность компенсации проводимых при этом перестановок.

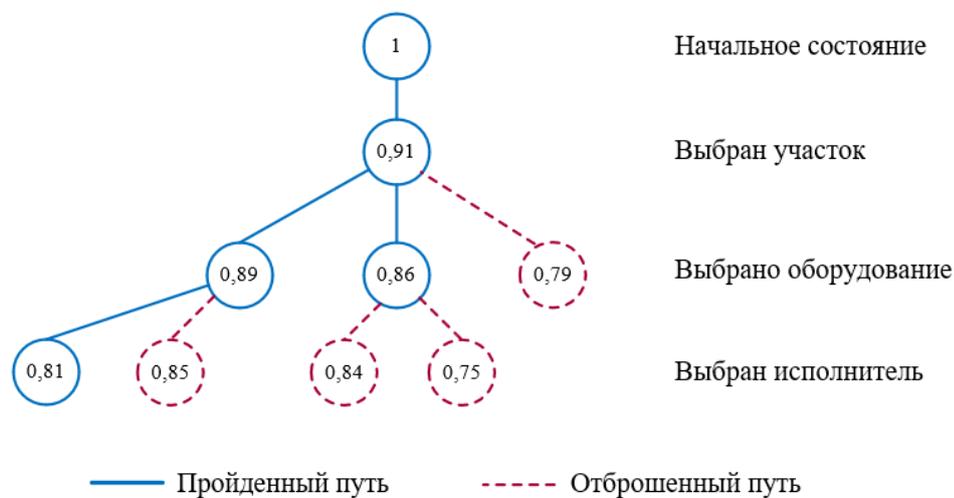


Рисунок 3.11 – Механизм подбора комбинаций ресурсов

Разработанный метод был исследован экспериментально и проверен в ряде приложений, описанных в разделе 5.

### 3.5 Выводы

В рамках третьей главы получены следующие основные результаты:

- 1) Рассмотрен мультиагентный подход к решению задачи планирования, обеспечивающий возможность распределенного решения сложных задач управления производством в режиме реального времени. За основу подхода взята концепция ПВ-сетей, а также

построенный на ее основе метод компенсаций, позволяющий добиться адаптивности решения задачи по событиям, поступающим в реальном времени.

- 2) Модифицированы базовые классы агентов ПВ-сети таким образом, чтобы обеспечить их онтологическую настройку на предприятие, описаны их цели и ограничения. В качестве базовых выбраны агенты заказов, процессов и задач, ресурсов и продуктов. Агент заказа стремится быть выполненным в указанные сроки в полном объеме и с минимальной стоимостью, агент ресурса – быть максимально загруженным, минимизировать время простоя и переналадки, агент продукта – обеспечить свое хранение и минимизировать время хранения, агент задачи – выполняться с максимальным качеством, а агент технологического процесса – вести перечень своих задач с максимальным качеством и в заданный срок. Определены функции удовлетворенности агентов, а также функции бонусов и штрафов. Для агентов ресурса введена функция стоимости размещения и предложен метод пересчета компенсаций.
- 3) Для настройки экземпляров агентов через онтологическую модель предприятия в базовые классы агентов введены функции работы с онтологиями, которые позволяют выполнять «исчисления», описанные в разделе 2. Например, для каждой задачи агент этой задачи может выбрать все отношения «требует» для выяснения, какие именно ресурсы нужны для исполнения задачи, чтобы дальше искать эти ресурсы в сцене мира предприятия. Новые требования могут при этом добавляться прикладными пользователями без останова и перекомпиляции базовой унифицированной МАС, что является принципиально новой важной возможностью.
- 4) Предложена модификация метода компенсаций за счет введения нового протокола взаимодействия агентов, обеспечивающего решение задачи поиска балансов интересов (консенсуса) агентов при возникновении событий рассогласования состояния ЦД и реального предприятия на основе соотношений (\*) и (\*\*). Допустимость перестановки конфликтующих задач оценивается исходя из финансовых возможностей агентов ресурсов. В результате взаимодействия агентов посредством выявления конфликтов и проведения переговоров с уступками достигается допустимое локально-оптимальное решение, которое позволяет адаптивно скорректировать текущее расписание.
- 5) Предложено использовать онтологическую модель предприятия для настройки основных классов агентов на заданную предметную область, когда по этой модели создаются экземпляры агентов соответствующих им сущностей, в своей совокупности формирующие действующего ЦД предприятия.

#### 4 РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦД ПРЕДПРИЯТИЙ

Разработанная методика построения онтологических моделей предприятий и метод взаимодействия агентов виртуального рынка для построения расписаний на основе компенсаций позволяют создать ЦД процессов управления предприятия в виде интеллектуальной киберфизической системы управления ресурсами предприятия (ИКФС).

Для реализации предложенного подхода был разработан комплекс инструментальных средств, предназначенный для автоматизации процесса создания ИКФС управления ресурсами, состоящий из конструктора онтологий и баз знаний (БЗ) предприятия, конструктора сцен, модуля мультиагентной системы управления ресурсами и интерфейса пользователя (рисунки 4.1 и 4.2).

Взаимодействие компонентов обеспечивается посредством очереди (шины) сообщений – специализированного модуля программного обеспечения, отвечающего за асинхронную передачу сообщений между различными программными процессами посредством механизма подписки на выбранные типы событий.

Конструкторы онтологий и сцены обеспечивают создание, редактирование и хранение цифровой модели объекта планирования, предоставляя программный интерфейс для доступа к имеющейся информации. Хранилище данных физически разделено на две части: онтологическую и реляционную. Онтологическая часть содержит описание всех используемых онтологий и моделей в виде триплетов, реляционная – данные о всех введённых 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.

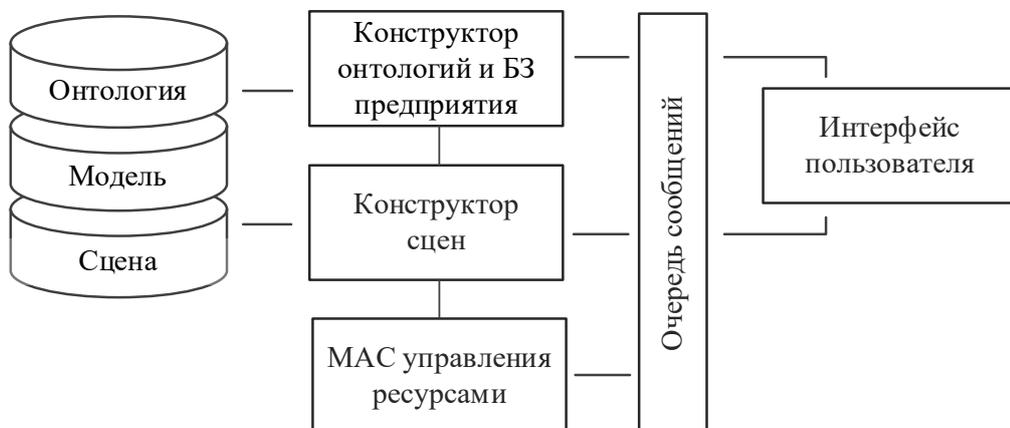


Рисунок 4.1 – Базовые компоненты комплекса инструментальных средств

Главной задачей модуля МАС управления ресурсами 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 веб-приложение, реализующее графический интерфейс для создания онтологической модели объекта планирования, ввода событий и просмотра построенных планов.

Схема применения и развертывания разработанного комплекса программных средств представлена на рисунке 4.2.

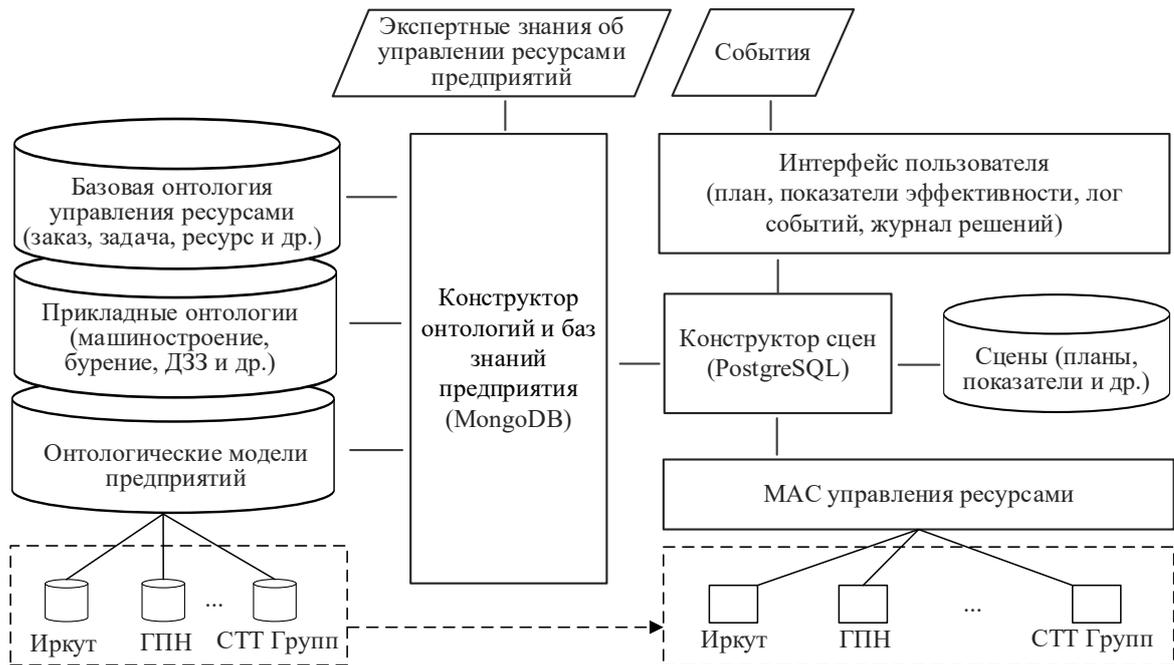


Рисунок 4.2 – Схема применения комплекса инструментальных средств

Здесь подчеркивается наличие разработанных онтологических моделей предприятий, подробно рассматриваемых в разделе 5, которые загружаются в унифицированную ИКФС, что существенно сокращает время разработки такого рода систем.

#### 4.1 Конструктор онтологий и баз знаний предприятия

Основное назначение модуля – формализация предметной области для предоставления всей необходимой информации системам, решающим прикладные задачи, в частности, по планированию и управлению ресурсами, путем агрегации знаний из различных информационных источников для предоставления максимально полной информации об объекте планирования.

Разработанный модуль обеспечивает создание, редактирование и хранение онтологий и моделей объектов, предоставляя программный и графический интерфейс для доступа к имеющейся информации. К основным функциональным возможностям модуля относятся:

- 1) Управление списком онтологий и онтологических моделей: создание, редактирование, удаление. При создании онтологии можно указать базовые онтологии, понятия и отношения из которых, автоматически добавляются в область видимости новой онтологии.
- 2) Наполнение онтологии содержимым: создание классов, отношений и атрибутов. Каждая онтология характеризуется набором понятий, отношений и атрибутов, состав и взаимосвязи между которыми можно редактировать. Для класса указывается его имя, базовый класс, список связанных с ним свойств: атрибутов и отношений. Для отношений и свойств-атрибутов – название, домен и диапазон. Домен определяет класс, к которому можно прикрепить это отношение, диапазон – на какие классы оно может указывать.
- 3) Наполнение онтологических моделей содержимым: создание, редактирование, удаление объектов. При описании (создании и редактировании) объекта предоставляются следующие возможности:
  - автоматически формируются поля для заполнения атрибутов, состав которых описан в классе объекта;
  - автоматически формируются поля для установления отношений с объектами на основе состава отношений, описанного в классе объекта;
  - при установлении отношения с другим объектом предоставляется возможность выбора соответствующего объекта, при этом список объектов, предоставляемый на выбор пользователю, ограничен классом, указанным в описании типа отношения;
  - добавление нового атрибута, который не указан в классе объекта, при этом пользователю предоставляются на выбор возможные классы атрибутов, описанные в онтологии;
  - добавление нового отношения, которое не указано в классе объекта, при этом пользователю предоставляются на выбор возможные классы отношений, описанные в онтологии;
- 4) Возможность просмотра содержимого базы знаний в табличном и семантическом представлении (рисунок 4.3). Для табличного представления настраивается класс объектов, а также перечень отображаемых атрибутов и отношений.
- 5) Возможность просмотра объекта в виде страницы с гиперссылками, которые позволят выполнять навигацию по связанным объектам.

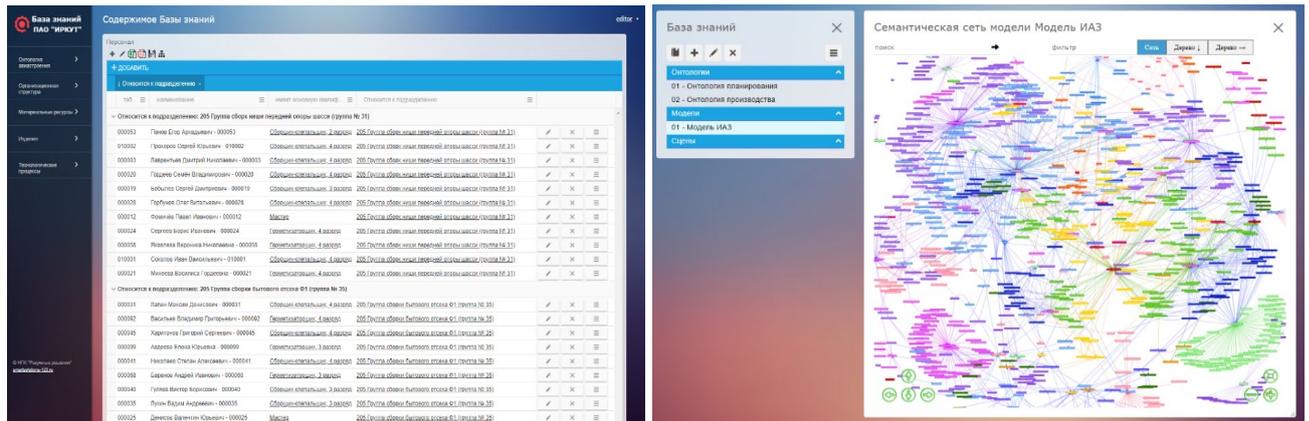


Рисунок 4.3 – Просмотр содержимого базы знаний

Для организации работы пользователя содержимое базы знаний сгруппировано по тематическим разделам, состав которых может изменяться и конфигурироваться администратором системы в зависимости от онтологии (т.е. при расширении онтологии новыми понятиями, можно создать соответствующий раздел для хранения информационных объектов, созданных на основе этих понятий). Для работы с объектами модели пользователю предоставляется возможность по каждому объекту открыть его страницу, на которой указаны все связанные с ним атрибуты и отношения. Для доступа к этой информации со стороны внешних модулей и систем реализован программный интерфейс на основе REST-сервиса, по запросу предоставляющего данные о содержимом онтологий и онтологических моделей:

- получение списка онтологий и онтологических моделей;
- получение списка классов онтологии;
- получение списка объектов онтологической модели;
- получение списка объектов определенного класса;
- получение информации по объекту – значения атрибутов объекта и отношения, установленные с другими объектами.

В целях упрощения процесса наполнения моделей объектами классов реализован механизм импорта данных из файла структурированного формата, пример которого приведен в приложении А.

## 4.2 Конструктор сцены

Конструктор сцены предназначен для описания объекта планирования путем создания экземпляров классов онтологии выбранной предметной области. Модуль позволяет настраивать перечень и параметры экземпляров ресурсов, продуктов и заказов, формировать связанные с ними события (рисунок 4.4).

Наименование	Дата рождения	Дата приема	Входит в подразделение	Имеет профессию
> Дорохов Сергей Петрович	13.08.1988	09.06.2011	Буровая бригада 1	Бурильщик
> Стеблев Михаил Сергеевич	14.05.1988	09.06.2011	Буровая бригада 1	Помощник бурильщика
> Истомин Дмитрий Сергеевич	14.05.1988	09.06.2011	Буровая бригада 1	Помощник бурильщика
> Крайнов Олег Алексеевич	10.01.1989	09.06.2011	Буровая бригада 2	Бурильщик
> Саблин Павел Сергеевич	11.02.1991	09.06.2011	Буровая бригада 2	Помощник бурильщика

Рисунок 4.4 – Перечень экземпляров базового класса «Обеспечивающий ресурс»

Экраны пользовательского интерфейса конструктора сцены соответствуют базовым классам онтологии планирования. Для создания экземпляра класса следует выбрать один из определенных на уровне онтологии предметной области подклассов, а также задать атрибуты и отношения, перечень и допустимые значения которых также специфицированы в онтологии (рисунок 4.5).

### Создание материала

Свойства

- ✖ Номинальный диаметр (мм)
- ✖ Длина (м)
- Внутренний диаметр (мм)
  - Толщина стенки (мм)**
  - Масса (кг/м)
  - Имеет тип обсадной трубы
- Количество

Труба обсадная: должно иметь обязательное поле "Количество"

Рисунок 4.5 – Создание экземпляра класса «Труба обсадная»

Диаграмма сущностных классов, используемых в реализации конструктора сцены показана на рисунке 4.6.

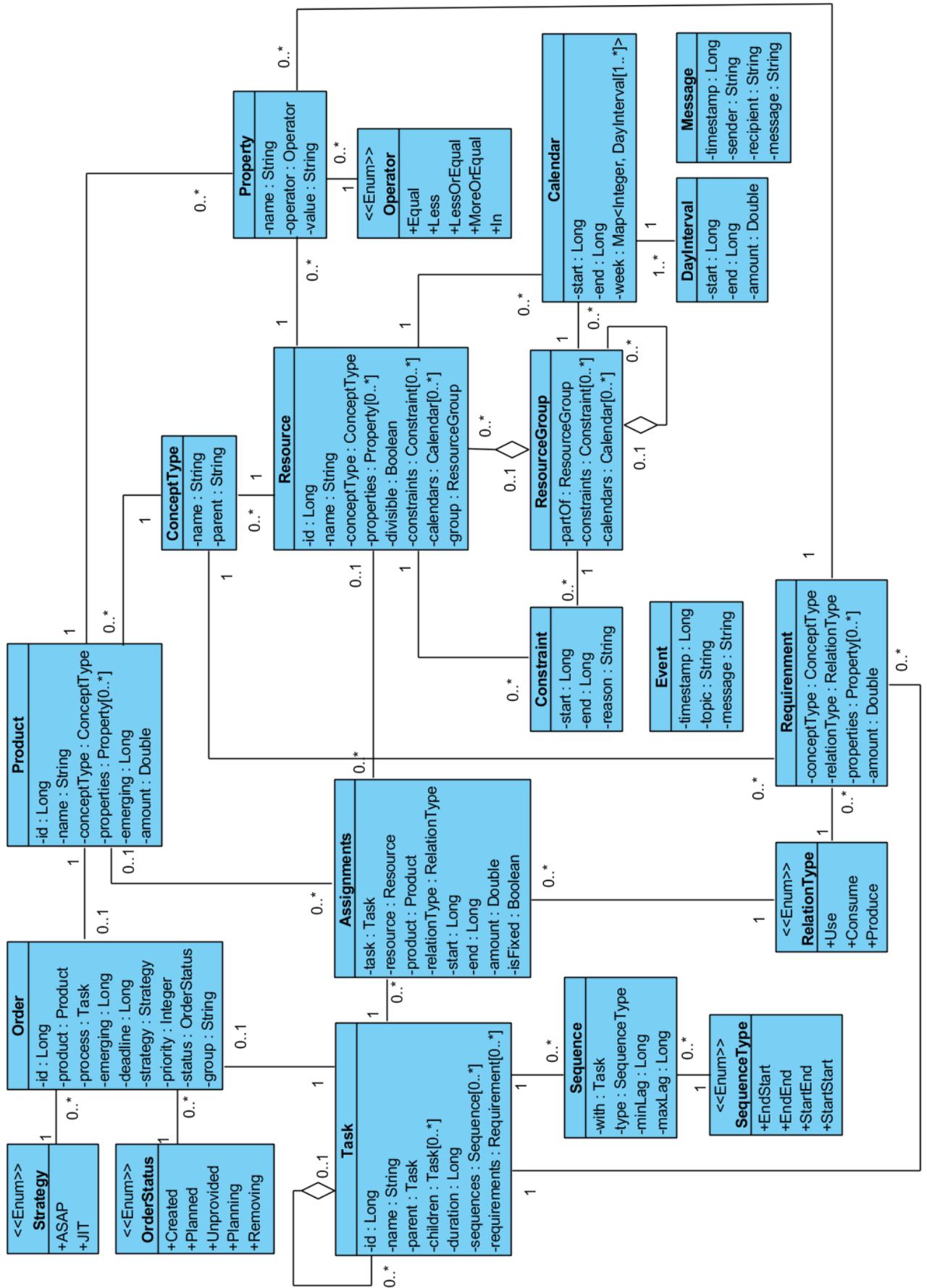


Рисунок 4.6 – Диаграмма сущностных классов конструктора сцены

Заказ представлен сущностью «Order», связанной с продуктом («Product») и технологическим процессом его получения (задается набором объектов класса «Task»). Помимо ограничений на время выполнения, для заказа задается приоритет и стратегия выполнения: «Just in time» (JIT) или «As soon as possible» (ASAP). В процессе планирования заказ меняет свой статус: создан, размещается, запланирован, не обеспечен, удаляется из расписания.

Задачи представлены сущностями «Task», для которых указано положение в иерархии (через ссылку на родительскую и дочерние задачи), связи с другими задачами («Sequence»), а также список требований («Requirement») к ресурсам и продуктам (как к производимым, так и потребляемым). Недоступность ресурсов или групп ресурсов («ResourceGroup») определяется через интервальные ограничения («Constraint»), а также календари («Calendar»), представляющие собой набор временных интервалов для каждого дня недели, в течение которых ресурс доступен для использования. Для ресурсов, продуктов и требований к ним определено поле «ConceptType», в котором содержится ссылка на класс онтологии предметной области, к которому принадлежит рассматриваемый объект. Значения атрибутов и отношений, связанных с объектом, хранятся в виде списка сущностей «Property», каждая из которых представляет собой триплет «имя – оператор – значение». Построенное расписание представляется в виде набора сущностей «Assignments», связывающих задачи, ресурсы и продукты между собой в определенный интервал времени. В целях регистрации списка событий и сообщений введены сущности «Event» и «Message».

### **4.3 Модуль МАС управления ресурсами**

Главной задачей модуля является формирование и адаптивная перестройка плана выполнения заказов с учетом ограничений на ресурсы. Базовым сущностям сцены (заказам, задачам, продуктам и ресурсам) ставятся в соответствие индивидуальные программные агенты, реализующие присущую их классу стратегию поведения, но в тоже время использующие семантический контекст тех объектов, интересы которых они представляют.

Модуль реализован на базе фреймворка «Акка», обеспечивающего низкоуровневый механизм диспетчеризации и обмена сообщениями между агентами. Ключевой синтаксической единицей этого фреймворка являются акторы – объекты, взаимодействующие между собой посредством асинхронного обмена сообщениями. Такое взаимодействие заменяет и исключает использование общих, разделяемых между программными потоками, данных. Жизненный цикл актора состоит в последовательной обработке сообщений, в ответ на которые он может изменить состояние, отправить сообщения одному или нескольким акторам, создать новых акторов или завершить свою работу. Диаграмма классов модуля планирования показана на рисунке 4.7.



Важным отличием выбранного фреймворка является возможность создания большого количества одновременно функционирующих акторов, число которых значительно превышает число доступных программных потоков. Это достигается за счет распределения акторов между пулом потоков с последующим квантованием времени, отводимого на выполнение связанных с ними вычислений.

Класс «AbstractActor» является частью фреймворка «Akka» и предоставляет базовые методы для взаимодействия с инфраструктурой фреймворка. На его основе реализован класс «Agent», предоставляющий высокоуровневые методы по отправке сообщений заданному агенту, отправителю обрабатываемого сообщения, агенту сцены или агенту, являющемуся родителем текущего агента. Все методы оперируют объектами абстрактного класса «Message», дочерние реализации которого содержат данные, передаваемые от одного агента другому (например, класс «PlacementRequest» представляет собой запрос на размещение задачи в указанные интервалы времени в расписании ресурса или продукта).

Класс «SceneAgent» реализует поведение агента системы, отвечающего за координацию процесса переговоров других агентов, маршрутизацию событий и сбор данных о построенном расписании для других модулей системы.

Диаграмма деятельности агента сцены приведена на рисунке 4.8.

Процесс переговоров разделен на независимые цепочки переговоров, связанные с проактивностью одного из агентов.

Агент сцены работает с очередью заявок на проактивность, выбирая из нее наиболее подходящих кандидатов. Важно отметить, что такая реализация упрощает процесс согласования планов, но при этом не исключает возможность параллельного запуска проактивностей нескольких агентов. В этом случае решения будут строиться независимо друг от друга и, в результате, могут конфликтовать между собой.

Окончательное решение о применении того или иного варианта расписания остается за агентом сцены.

Логика агента сцены использует ряд эвристик: первоочередной выбор наиболее неудовлетворенных агентов, приоритет применения событий над запуском новых проактивностей (нет смысла улучшать текущее расписание, если еще не применены накопленные за предыдущий период события), первоочередное применение тех вариантов перестановок, которые обеспечивают больший прирост КРІ системы.

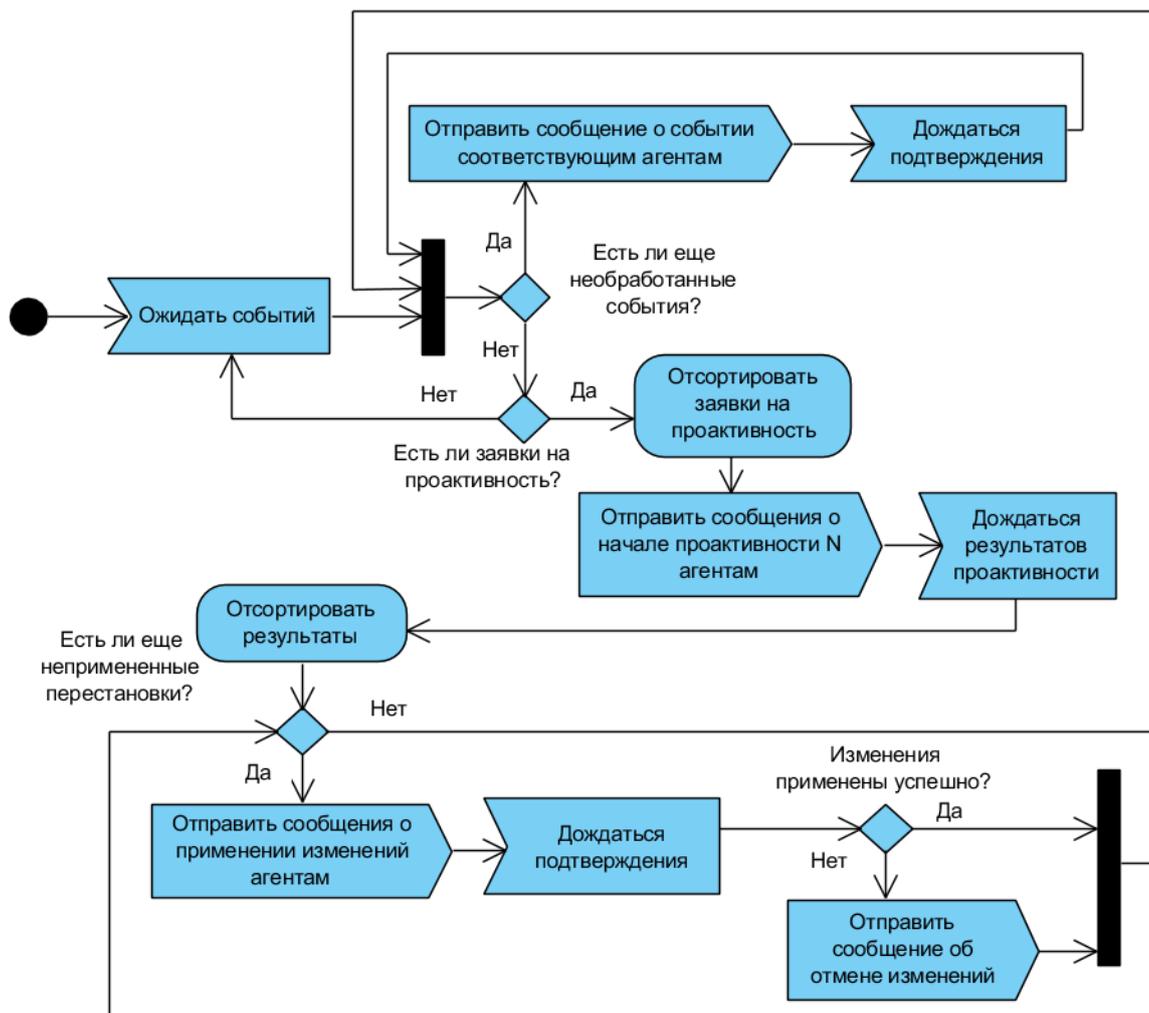


Рисунок 4.8 – Диаграмма деятельности агента сцены

Агенты взаимодействуют в рамках виртуальной сцены, состоящей из множества объектов, заказов, продуктов, ресурсов и задач. Их состояние инкапсулировано в объектах классов «Order», «Product», «Resource» и «Task». Помимо исходной, неизменяемой модулем планирования информации, полученной из конструктора сцены, в каждом объекте сцены хранится связанный с ним фрагмент расписания. Так, расписание задачи представляет собой коллекцию временных интервалов со ссылкой на используемые ресурсы и продукты, расписание продукта – коллекцию точек на временной шкале, в которых изменяется его количество (рисунок 4.9), а расписание ресурса – набор интервалов со ссылкой на запланированные на них задачи. Для повышения эффективности работы с расписанием ресурсов используется структура данных, построенная на основе бинарного интервального дерева и обеспечивающая выполнение операции поиска пересечений на заданном временном интервале за время пропорциональное  $R \cdot \log_2 N$ , где  $R$  – число найденных пересечений,  $N$  – число интервалов в расписании ресурса.

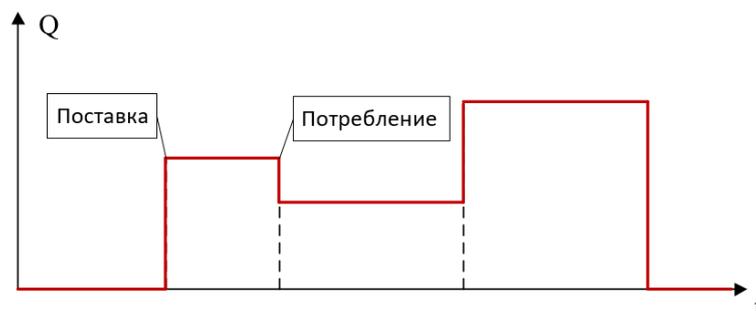


Рисунок 4.9 – Представление расписания продукта в виде графика потребления

Классы агентов, соответствующих основным сущностям сцены («OrderAgent», «ProductAgent», «ResourceAgent» и «TaskAgent»), реализованы на основе класса «InstanceAgent», обеспечивающего механизм переключения между копиями состояния агента в зависимости от того, сообщение из какой цепочки переговоров он обрабатывает в данный момент времени. При переходе к обработке сообщения из другой цепочки переговоров, текущее состояние сохраняется, а указатель переключается на новое состояние (рисунок 4.10).

Принадлежность сообщения к цепочке переговоров определяется через уникальный идентификатор (содержится в базовом для всех сообщений классе «Message»).

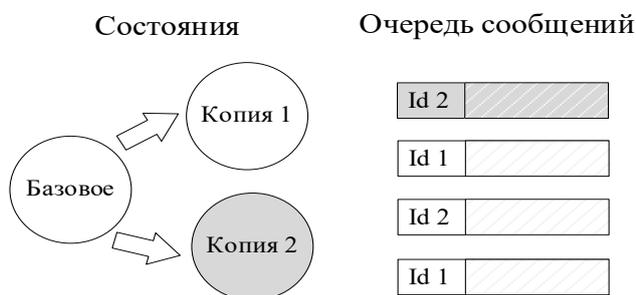


Рисунок 4.10 – Переключение состояния агента в зависимости от идентификатора обрабатываемого сообщения

В любой момент времени среда исполнения агентов предприятия и сцена его данных, используемые для управления в реальном времени, могут быть скопированы в отдельную версию МАС на другом сервере для перехода к режиму моделирования «что будет, если ...», чтобы с опережением предсказать реакцию ЦД на события, которые вероятны, но еще не случились (приход нового заказа, ввод в действие новых ресурсов и т.д.).

#### 4.4 Выводы

В рамках четвертой главы получены следующие результаты:

- 1) Сформулирована задача построения ЦД, предложена архитектура ЦД и разработан комплекс инструментальных средств для автоматизации процесса создания

программных компонент ЦД предприятий на основе онтологий и мультиагентных технологий, имеющий в своем составе конструктор онтологий и баз знаний, конструктор сцен, мультиагентный модуль управления ресурсами предприятия, базовые средства взаимодействия с пользователем и визуализации расписания.

- 2) Основное назначение конструктора онтологий и баз знаний – формализация предметной области для создания ЦД процессов управления предприятиями и предоставления всей необходимой информации о предприятии системам, решающим прикладные задачи, в частности, по планированию и управлению ресурсами. При этом в отличие от известных производственных онтологий здесь появляется возможность работы с концептом «задача», детально специфицируя особенности каждой задачи в технологическом или бизнес-процессе (входные и выходные объекты, предшествующие, последующие и вложенные задачи, требования к ресурсам в виде машин или оборудования и компетенций сотрудников и т.д.), что позволяет использовать унифицированный состав агентов для решения различных прикладных задач.
- 3) Модуль МАС управления ресурсами создан как унифицированный, т.е. не требующий перепрограммирования при переходе к новой предметной области и новому предприятию. В этих целях этот модуль обеспечивает загрузку необходимой информации онтологической модели предприятия из конструктора онтологий, создание, наполнение и настройку виртуального мира агентов под выбранную онтологическую модель, формирует среду исполнения агентов системы, очередь поступающих событий и обеспечивает интерфейс для предоставления доступа к результатам планирования.
- 4) Реализованы основные модули комплекса в среде Java, обеспечивающие работу с онтологиями и базами знаний, а также применение мультиагентных технологий для решения задач планирования ресурсов предприятий и эффективного хранения в сцене элементов сложных расписаний.
- 5) Созданный комплекс позволяет создавать ЦД различных предприятий технологическим образом, существенно сокращая сроки и стоимость разработки, а также поддержки эксплуатации системы за счет исключения процесса перепрограммирования при модификации процессов управления или возникновении новых факторов, влияющих на качество принимаемых решений.

## **5 ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО КОМПЛЕКСА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦД ПРЕДПРИЯТИЙ**

### **5.1 Разработка прототипа ЦД агрегатно-сборочного производства на авиастроительном предприятии**

#### **5.1.1 Постановка задачи**

Агрегатная и окончательная сборка является одним из завершающих и наиболее ответственных этапов производства самолета, трудоёмкость которого для современного самолета может составлять порядка 40% от общей трудоёмкости изготовления всего изделия. Уровень технического и организационного совершенствования сборочного производства в значительной степени определяет себестоимость самолета и экономическую эффективность предприятия [19]. Наиболее сложным с точки зрения планирования является период между созданием первого образца и началом массового производства. В случае сборки самолета, такой период длится около двух-трех лет, но может занять и более продолжительное время. Типичными проблемами, проявляющимися на этом этапе, являются сбои в поставках комплектующих, выявление ошибок и несоответствия в производственных процессах, брак при производстве изделий вследствие недостаточного опыта исполнителей.

Особенности агрегатно-сборочного производства на авиастроительном предприятии во многом обусловлены спецификой летательных аппаратов как объектов производства:

- многодетальностью конструкции (до 1500-2000 деталей на одну тонну массы);
- большим количеством соединений и разнообразием их конструктивного исполнения;
- значительным объемом ручных операций;
- высокими требованиями к качеству сборки [19].

В рассматриваемой задаче объектом планирования является процесс сборки пассажирского самолета МС-21 в цехах агрегатно-сборочного производства и цехе окончательной сборки. Производственное расписание включает работы по сборке всех технологических сборочных единиц (ТСЕ) каждого экземпляра самолета (около 1000 на один экземпляр самолета), изготавливаемых на заданном горизонте планирования (до 72 в год) с декомпозицией до уровня технологических переходов (до 1 млн. на один экземпляр самолета). Агрегатная и окончательная сборка самолетов МС-21 выполняется на сборочной линии, состоящей из специализированных сборочных станций, на которых выполняется сборка панелей, отсеков, фюзеляжа и всего самолета в целом. Фрагменты будущего самолета – технологические сборочные единицы – перемещаются от одной станции к другой по заранее определенному 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 ТСЕ из сборочной оснастки. Этот процесс должен быть синхронизирован на всех станциях, поскольку задействует общие ресурсы цеха. Последовательность выполнения операций сборки в ряде случаев допускает вариативность, ограниченную конструктивно-технологическими факторами. Рационально построенная последовательность сборки может оказать решающее влияние на эффективность использования производственных ресурсов.

Управление производственным расписанием целесообразно вести на нескольких уровнях: межцеховом (стратегическом) и цеховом (оперативном). На стратегическом уровне формируется расписание работы группы цехов агрегатно-сборочного производства с горизонтом планирования от одного квартала до нескольких лет. В качестве ограничений при выполнении заказов здесь учитываются сведения о пропускной способности оборудования и общем числе сотрудников определенной категории. Планирование ведется с заданной степенью детализации: на основе моделей изготовления изделий и ТСЕ формируется иерархически организованная структура задач произвольного уровня вложенности, позволяющая описать технологический процесс изготовления изделия вплоть до переходов. На оперативном уровне ведется детальное планирование работ в каждом цехе агрегатно-сборочного производства с горизонтом планирования в один месяц. При этом используется детальная информация о ресурсах цеха, включая особенности технологических процессов, состав и характеристики оборудования и персонала. Рассматриваемые на этом уровне технологические процессы могут отличаться большей детализацией и дополнительными требованиями к характеристикам оборудования и компетенциям сотрудников.

При формировании производственного расписания используется:

- данные о производственных заказах;
- технологические процессы изготовления изделий;
- данные о доступности ресурсов (рабочие, оборудование);
- данные о датах поступления необходимых компонентов на склад.

Для каждого заказа установлены ограничения на время выполнения (предельная дата начала и окончания, желаемая дата начала и окончания). Для изделия задан технологический процесс его получения в виде последовательности операций. Для операций указаны необходимые детали и сборочные единицы, требования по оборудованию, инструментам, оснасткам, персоналу, с указанием характеризующих их свойств (признаков, качеств,

квалификаций и т.п.). Перечень таких свойств заранее неизвестен и подлежит изменению в процессе функционирования системы. Операции могут быть упорядочены между собой посредством отношений предшествования. Продолжительность каждой операции определяется ее трудоемкостью. Допускается возможность наличия альтернативных вариантов выполнения операции с использованием различного состава ресурсов и различной продолжительностью.

Ставится задача определения порядка и сроков начала и окончания технологических операций и распределения необходимых для их выполнения ресурсов. Результатом планирования является:

- расписание выпуска каждого изделия со сроками сдачи всех входящих в его состав сборочных единиц и агрегатов;
- расписание задействования производственных ресурсов (оборудования и сборочных станций) по каждому цеху;
- расписание задействованных рабочих каждого цеха на заданном периоде.

При формировании структуры производственного расписания должны учитываться следующие особенности:

- после выполнения сборочных операций на станции, ТСЕ не может быть перемещен на следующую станцию по потоку изготовления до тех пор, пока она не освободится;
- технологическая сборочная единица может храниться в буфере-накопителе – контейнере или площадке, которые обеспечивают хранение разных ТСЕ в суммарном количестве/объеме, не превышающем емкость буфера накопителя;
- после операции контроля дальнейшее выполнение процесса может потребовать задержки для устранения замечаний (в том числе выполнение операций по доработке), после которой следует дальнейшее выполнение операций, или списание в брак;
- возможно изменение продолжительности выполнения работ за счет изменения количества одновременно работающих специалистов;
- комплектующие и материалы для выполнения операций поступают со склада или с других станций, или буферов-накопителей;
- доставка комплектующих на станции должна осуществляться по мере необходимости.

В качестве критериев планирования рассматриваются:

- минимизация задержки выполнения заказов;
- минимизация количества используемых ресурсов (оборудования и персонала);
- равномерность или максимизация загрузки ресурсов.

Построенное расписание должно адаптивно перестраиваться при возникновении следующих событий: приход новых срочных заказов, например, по доработанным техпроцессам, исправляющим брак, или непредвиденные события с участков сборки, такие как, выход из строя оборудования, поломка инструмента, невыход на работу рабочего, отсутствие необходимых комплектующих, наличии брака или потерь, невыполнение запланированных операций.

Вследствие сильной зависимости элементов расписания между собой, задержка при выполнении операции может привести к остановке других операций и в результате увеличить время сборки всей ТСЕ. Это, в свою очередь, повлияет на планы других станций и даже цехов, участвующих в технологическом маршруте изготовления изделия, так как они будут вынуждены ждать исправление возникшей проблемы. Очевидно, что работники, первоначально назначенные на эти операции, должны быть переназначены на другие задачи. Таким образом, реакция на событие может потребовать координации планов нескольких производственных подразделений.

Помимо стратегии остановки производства до устранения проблемы, возможен перенос выполнения ряда операций на последующие этапы сборки изделия. Например, если необходимый для сборки компонент будет доступен только через несколько дней, то использующие его операции, при наличии технологической возможности, могут быть отложены, а сама сборочная единица перенесена на следующую станцию. При этом дополнительно необходимо решить, силами какого из смежных подразделений следует выполнять перенесенные операции.

### **5.1.2 Функциональные возможности системы**

Система предназначена для решения следующего комплекса функциональных задач:

- формирование производственного расписания процесса сборки самолета в цехах агрегатно-сборочного производства и цеха окончательной сборки в зависимости от объемов выпуска, располагаемых ресурсов с учетом начальных и граничных условий, решения оптимизационных задач по эффективному использованию ресурсов;
- контроль выполнения производственного расписания;
- оперативное адаптивное управление сборкой самолета в реальном времени.
- оценка и прогноз возможности выполнения графиков производства при имеющихся производственных ресурсах;
- выявление узких мест, проведение анализа пропускной способности и загрузки производственных ресурсов, длительности цикла изготовления продукции;
- поиск оптимального сценария производственного расписания путем сравнения различных вариантов при различных начальных и граничных условиях.

### 5.1.3 Особенности архитектуры системы

Для решения задачи базовая структура комплекса программных средств была дополнена модулем интеграции с внешними системами и модулем сквозного планирования (рисунок 5.1). Кроме этого, для каждого цеха АСП и ЦОС был развернут собственный экземпляр модуля управления ресурсами, работающий с моделью и сценой этого цеха.

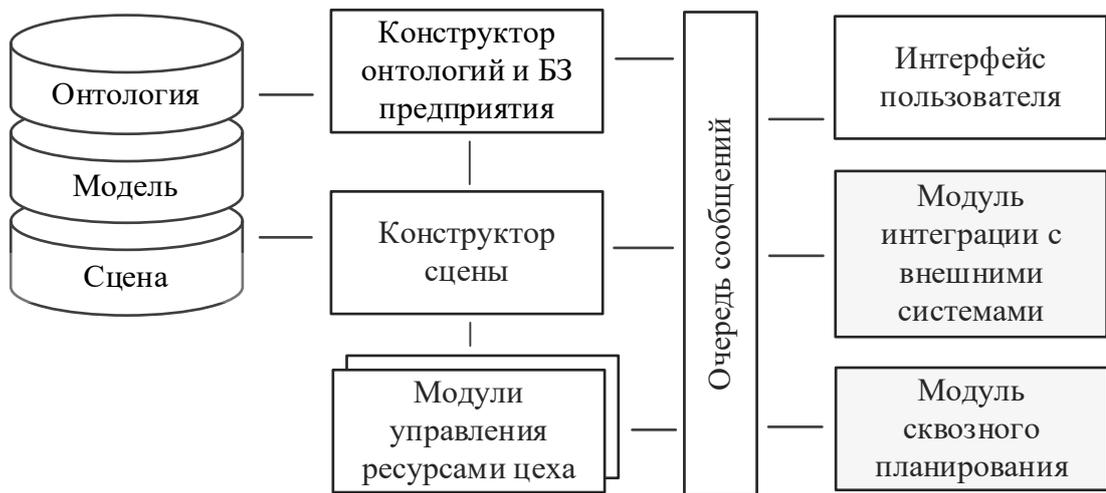


Рисунок 5.1 – Схема архитектуры системы

Модуль сквозного планирования обеспечивает построение производственного плана для всей цепочки цехов агрегатной и окончательной сборки на горизонте времени от одного квартала до нескольких лет, и позволяет определять загрузку предприятия и оценивать сроки, а также потенциальную возможность выполнения заказов. Данный модуль не является частью рассматриваемого комплекса программных средств и служит для согласования работы модулей планирования цехов. Для этого построенный модулем сквозного планирования укрупненный план разбивается на отдельные заказы, которые последовательно, с учетом связей в производственной цепочке, передаются модулям планирования цехов с указанием сроков их выполнения, где декомпозируются и уточняются до уровня до уровня сменно-суточных заданий рабочих. Экземпляры модулей планирования цехов являются функционально идентичными и отличаются лишь сценой, с которой они работают. Использование двухуровневой сети планировщиков позволяет существенно снизить вычислительную сложность построения общего плана работы смежных цехов за счет декомпозиции задачи.

Модуль интеграции с внешними системами обеспечивает чтение и конвертацию данных, необходимых для работы системы: сведения о запланированных производственных заказах, модели изготовления самолета и ТСЕ, технологический состав изделия, организационную структуру цехов, данные об оборудовании, сборочной оснастке и их доступности, наличие на складе материалов и комплектующих. Необходимость интеграции обусловлена тем, что

разрабатываемая система должна быть встроена в уже существующую интегрированную информационную систему управления завода, не заменив существующие сервисы, а лишь расширив их возможности.

#### 5.1.4 Сценарии использования

**Ввод новых заказов.** Перед началом планирования необходимо сформировать перечень заказов – создав их вручную, либо загрузив список из внешнего источника (например, из модуля сквозного планирования или структурированного файла). При добавлении заказа указывается номер экземпляра самолета, для которого производится изделие, наименование самого изделия, дата начала и окончания планового периода, в который они должны быть выполнены, а также технологический процесс его производства (рисунок 5.2).

Номер заказа	Начало планового периода	Окончание планового периода	Время выполнения	Изделие	Тех. процесс	Номер экземпляра	Статус	Действия
001	25.09.2017 06:30	18.10.2017 08:00	17 октября 15:04	МС21.TCE.5702	205.02188.14.5702.00052	2443	запланирован	Запустить Удалить
002	25.09.2017 06:30	12.10.2017 08:00	11 октября 16:38	МС21.TCE.5802	205.02188.14.5802.00044	2443	запланирован	Запустить Удалить
003	25.09.2017 06:30	04.10.2017 08:00	03 октября 17:00	МС21.TCE.5902	205.02188.14.5902.00040	2443	запланирован	Запустить Удалить
004	25.09.2017 06:30	15.12.2017 08:00	11 декабря 11:23	МС21.TCE.5608	205.02188.14.5608.00060	2443	запланирован	Запустить Удалить
005	02.10.2017 06:30	29.10.2017 08:00		МС21.TCE.5702	205.02188.14.5702.00052	2444	размещен в ERP	Добавить
006	02.10.2017 06:30	20.10.2017 08:00		МС21.TCE.5802	205.02188.14.5802.00044	2444	размещен в ERP	Добавить
007	02.10.2017 06:30	11.10.2017 08:00		МС21.TCE.5902	205.02188.14.5902.00040	2444	размещен в ERP	Добавить
008	02.10.2017 06:30	25.12.2017 08:00		МС21.TCE.5608	205.02188.14.5608.00060	2444	размещен в ERP	Добавить

Рисунок 5.2 – Перечень заказов

При этом система на основе содержащихся в онтологии сведений проводит поиск доступных технологических процессов с учетом их применимости к выбранному ТСЕ и экземпляру конечного изделия.

После того, как заказ размещен в расписании, на диаграмме Ганта можно увидеть детализацию его выполнения в виде последовательности операций (рисунок 5.3). У пользователя есть возможность перемещать отдельные операции для интерактивной доработки построенного плана: его действия будут интерпретироваться как директивное указание зафиксировать выбранную операцию и перепланировать связанные с ней фрагменты расписания с учетом новых ограничений.

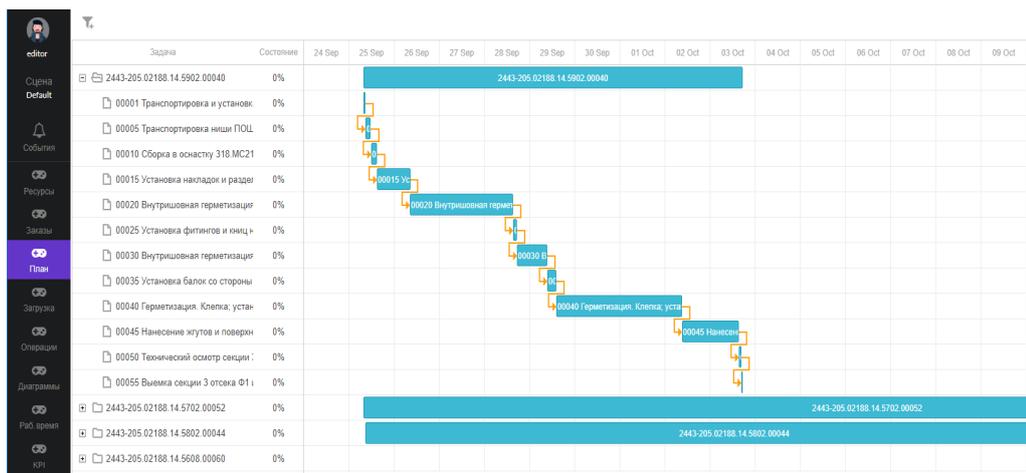


Рисунок 5.3 – Диаграмма Ганта

**Изменение доступности ресурсов.** Расписание работы производственных ресурсов на выбранном интервале времени визуализируется посредством отдельной диаграммы (рисунок 5.4). Здесь каждому ресурсу поставлена в соответствие временная шкала, на которой показаны задачи, над выполнением которых будет занят указанный ресурс в соответствующий интервал времени. При назначении задачи учитывается календарь работы ресурсов. Так, в представленном на рисунке 5.4 примере рабочие доступны в дневное время с перерывом в середине дня. В моменты недоступности ресурса выполнение операции прерывается.

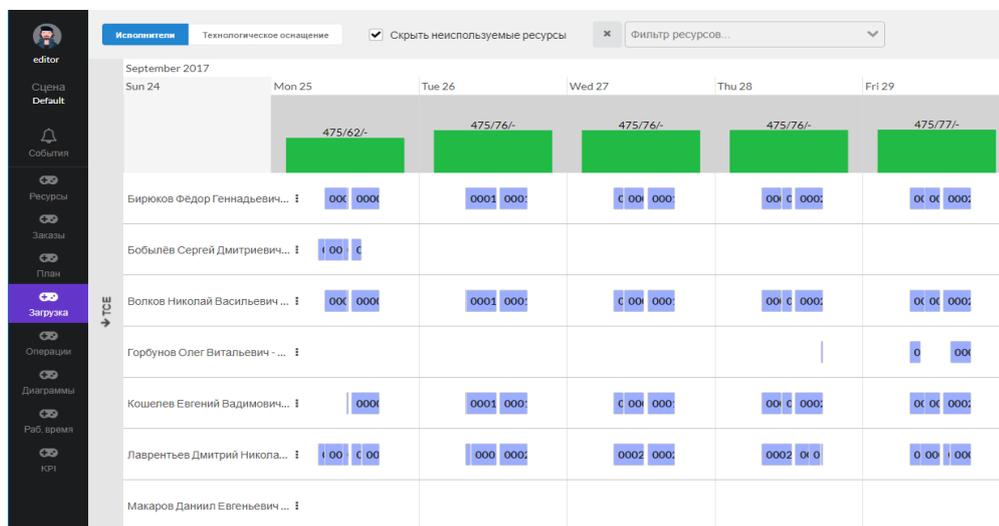


Рисунок 5.4 – Загрузка рабочих

Аналогичную информацию можно увидеть и для оборудования. В отличии от рабочих, сборочные станции резервируются на весь технологический процесс целиком (рисунок 5.5). Очередность и сроки выполнения заказов определяются так, чтобы минимизировать их опоздание относительно директивных сроков завершения. При планировании учитывается

потребность не только в ресурсах, но и в комплектующих. При этом сами комплектующие могут производиться в ходе выполнения других заказов.

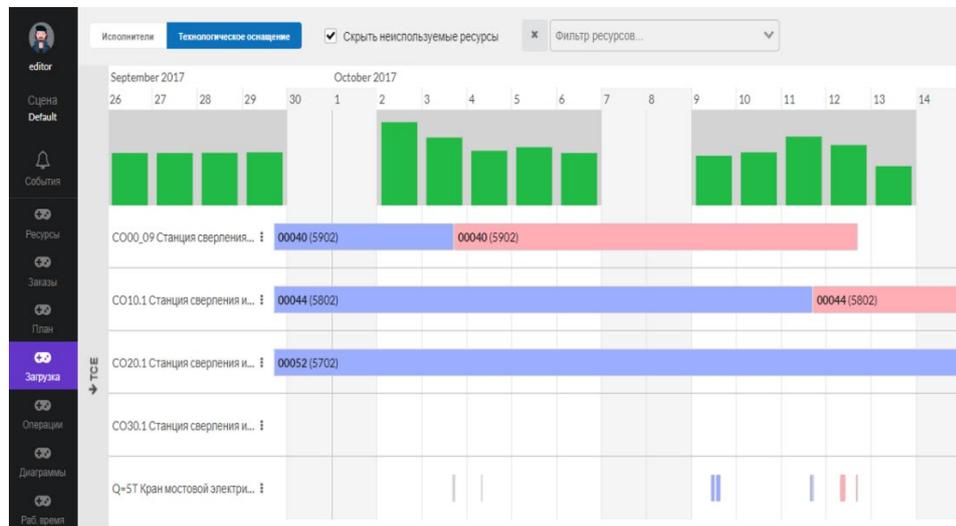


Рисунок 5.5 – Диаграмма загрузки оборудования

Между операциями могут возникать конфликты за общие ресурсы. Так, в приведенном на рисунке 5.6 примере, производство двух ТСЕ могло бы начинаться одновременно, однако, первые операции соответствующих технологических процессов требуют использования единственного в цехе мостового крана. Из-за этого конфликта одна из операций вынуждена начаться после завершения другой, очередность при этом будет определена в ходе переговоров агентов путем сравнительного анализа потерь их функций бонусов и штрафов (в данном примере основную роль будут играть сроки выполнения конкурирующих заказов, так как с точки зрения ресурса порядок выполнения операций не будет оказывать влияние на его целевую функцию).

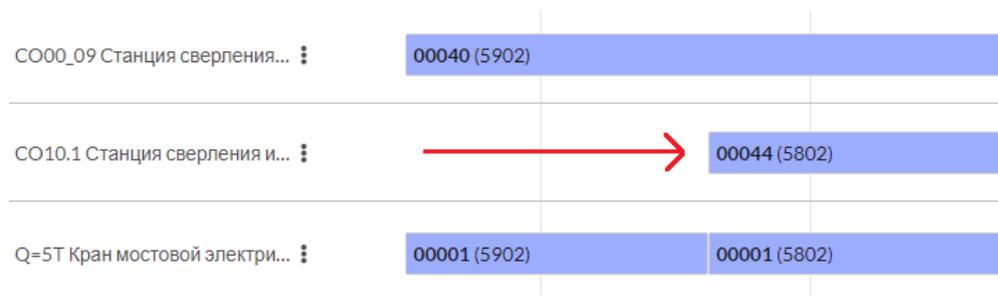


Рисунок 5.6 – Конфликт за использование общего ресурса

Для выбранного ресурса можно добавить ограничение на его доступность, например, по причине технического обслуживания (рисунок 5.7). Задачи, выполнение которых было запланировано в указанный период времени, будут размещены на других ресурсах, либо выполнены в другое время, если ресурс является уникальным или другие доступные ресурсы с подходящими характеристиками не могут предложить лучшее время (с учетом возможности вытеснения одних задач другими).



Рисунок 5.7 – Недоступность ресурса

**Расчет показателей эффективности.** Основными критериями в рассматриваемой задаче являются минимизация задержки выполнения заказов относительно директивного срока завершения, а также критерий максимизации загрузки ресурсов. Эти показатели можно оценить на соответствующих диаграммах (рисунок 5.8).

Общие показатели



Загрузка ресурсов

Участок 1 → Бекрешев С. В. → Посев с удобрением... 16 ч

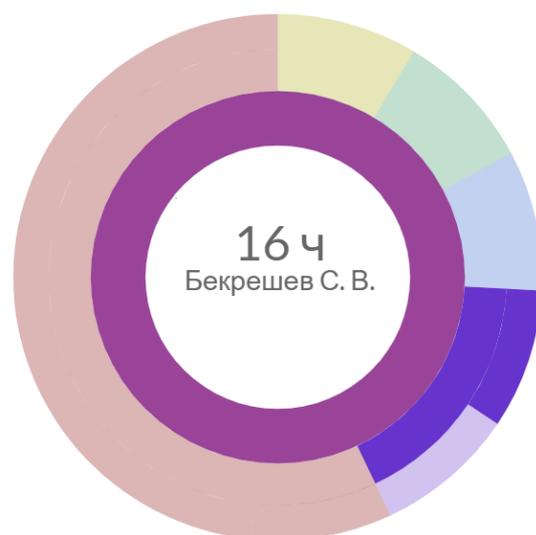


Рисунок 5.8 – Диаграммы показателей эффективности

На рисунке 5.9 приведены графики изменения удовлетворенности и виртуальной прибыли агентов в процессе построения расписания, зафиксированные на каждом шаге изменения расписания (шаг соответствует успешно завершившейся проактивности агента).

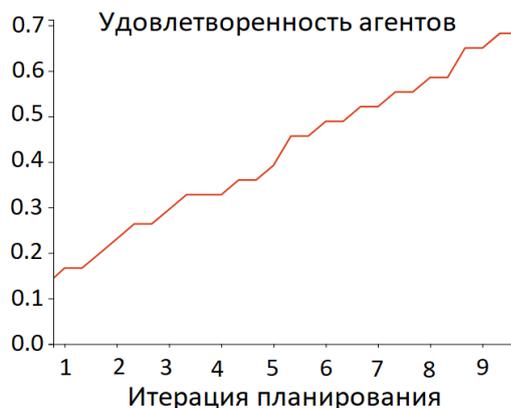


Рисунок 5.9 – График изменения удовлетворенности агентов

На рисунке 5.10 приведен пример изменения суммарной виртуальной прибыли агентов. В начальный момент времени ни один из заказов не запланирован, поэтому значение лежит в отрицательной области графика, далее, на каждом следующем шаге, происходит размещение одного или нескольких заказов, что вызывает рост их удовлетворенности и, как следствие, повышение виртуальной прибыли.



Рисунок 5.10 – График виртуальной прибыли агентов

Засечками на графиках показаны события, связанные с изменением состояния одного или нескольких агентов, для каждой точки графика можно увидеть какие из агентов участвовали в перестановках на этом шаге планирования с указанием приростов/потерь в удовлетворенности и прибыли. Так на выделенном шаге планирования было изменено состояние четырех заказов: заказ 2 смог потеснить заказы 3 и 6 за счет большего прироста удовлетворенности и виртуальной прибыли. Еще одним участником перестановки стал заказ 8, но произошедшие изменения никак не отразились на значении его функции удовлетворенности. Представленные графики показывают внутреннюю работу виртуального рынка системы, на котором происходят «торги» агентов заказов, задач, продуктов и ресурсов за свободные и занятые слоты времени с выявлением конфликтов и поиском компромиссов путем взаимных уступок с компенсациями.

## 5.2 Разработка прототипа ЦД сборки грузовых электромобилей

### 5.2.1 Постановка задачи

Рассматривается задача управления гибким производством, в рамках которой требуется создать ИКФС сборки электрических грузовых автомобилей, обеспечивающий адаптивное изменение плана выполнения технологического процесса в условиях недетерминированной производственной среды, с возможностью быстрой реконфигурации системы для выпуска новых моделей изделий.

Ключевыми отличиями гибкого производства являются:

- преимущественно мелкосерийное производство различных изделий по индивидуальным заказам;
- необходимость доработки изделий для учета индивидуальных требований;
- универсальное оборудование, способное выполнять широкий спектр операций;
- широкое использование промышленных роботов;
- динамические маршруты обработки изделий внутри цеха;
- частое обновление моделей машин, оборудования, технологий, поставщиков и т.д.
- возможность перенастройки производственного оборудования на выпуск новых видов продукции с минимальными затратами и без останова производства.

Таким образом, предполагается что фабрика сможет производить различные виды продукции за счет перенастройки производственных процессов. Причем небольшие изменения в конфигурации продукции должны происходить без остановки выполнения текущих заказов, а стоимость производства переменной продукции с учетом перенастроек должна быть сравнимой со стоимостью обычного массового производства.

Процесс сборки изделия представлен в виде последовательности операций: от сборки шасси до установки дверей кабины (рисунок 5.11).

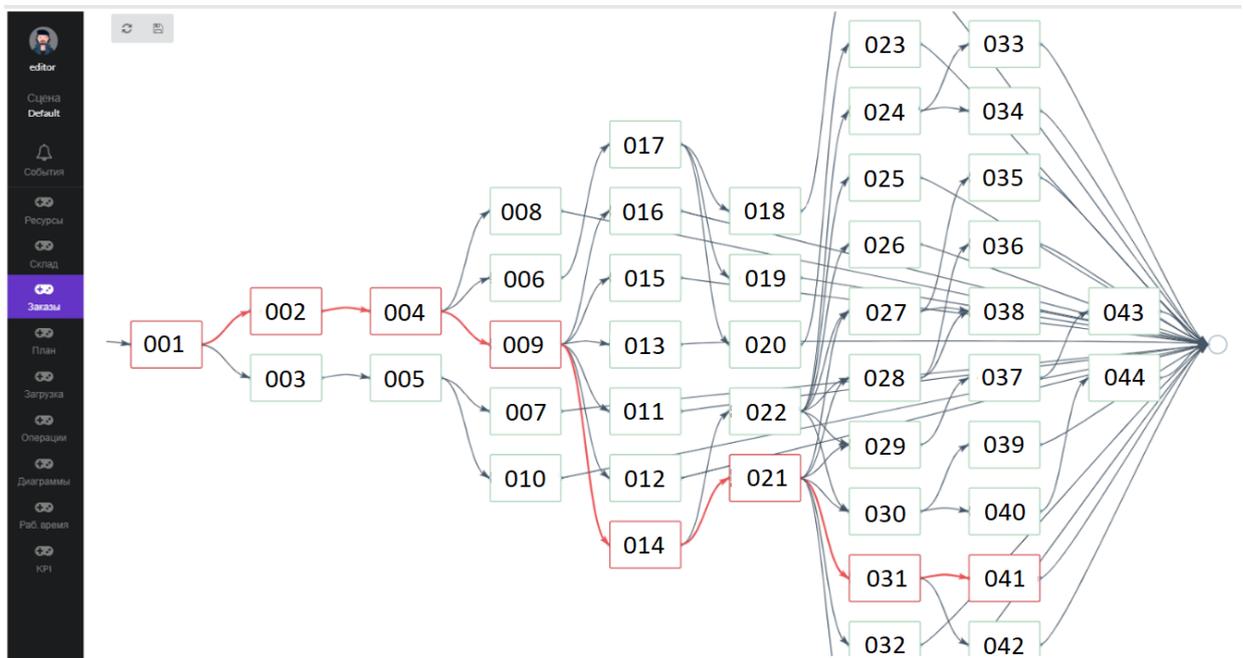


Рисунок 5.11 – Экран технологического процесса сборки грузового автомобиля

Оборудование фабрики включает роботы-манипуляторы со сменной оснасткой, фрезеровочные станки с числовым программным управлением (CNC – Computer Numerical Control), мобильные роботы для перемещения деталей и грузов (AGV – Automated Guided Vehicle).

Сборка шасси осуществляется полностью в роботизированном режиме из алюминиевых пластин и батарейных отсеков, изготовленных вне фабрики, а также деталей из композитного материала, которые изготавливаются на фабрике посредством отдельного технологического процесса. При сборке выполняются различные операции: захват и перемещение детали, резка, склейка, сгибание, скрепление болтами, транспортировка, вставка детали в защелкивающийся разъем (например, при монтаже шлейфа для батарейных блоков). В работе используется CNC-машина, а также несколько роботов-манипуляторов. Выдачу материалов со склада, а также прием готовых шасси на станции зарядки осуществляют операторы, транспортировка заготовок и деталей осуществляется с помощью AGV. Изготовленные шасси перемещаются на сборочные участки, на которых происходит монтаж элементов кузова и кабины. Сборка изделий на разных участках может вестись параллельно, однако при планировании операций требуется учитывать доступность рабочих и оборудования, заранее незакрепленных за конкретным участком и разделяемых между ними в зависимости от текущей загрузки.

Ряд используемых при сборке компонентов поставляются со смежных предприятий, другие – могут быть изготовлены прямо 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.

Некоторые этапы производства предполагают вариативность за счет 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. Система планирования должна поддерживать замещение ресурсов и технологических процессов: используемые на первом этапе ручные операции в перспективе могут быть заменены на роботизированные.

План выполнения операций должен меняться динамически при поступлении событий выхода ресурсов из строя (машины, робота или человека), возвращения ресурса в работу, изменения сроков поставки комплектующих, поступления новых заказов или отмены старых. Система должна позволять планировать производство нового продукта без перезапуска, после минимального конфигурирования онтологической модели предприятия.

### **5.2.2 Функциональные возможности системы**

Система предназначена для решения следующих функциональных задач:



машиностроения, что позволяет рассматривать экземпляры роботов-манипуляторов как еще один вид ресурсов фабрики (рисунок 5.13).

Articulated Robot

**KR 270 R2700 ULTRA F**

Редактировать

Представление



Articulated 6-axis robot for handling, palletizing, pick-and-place, packaging, loading, cutting, welding, finishing, inspection, assembly, unloading. The KR Quantec ultra is the most powerful, stiff and precise robot in the KR Quantec series. It offers maximum power in every position and is as dynamic, streamlined and efficient as the other family members. The KR Quantec ultra is also the ultimate in high-performance shelf-mounted robots.

Атрибуты

Maximum reach	Number of axes	Payload	Pose repeatability	Weight	краткое наименование	обозначение СТО
2700	6	270	0.06	1170	Robot KR 270	КУКА KR 270

Отношения

Produced by [КУКА](#) имеет тип СТО [Manufacturing equipment](#)

Рисунок 5.13 – Описание экземпляра класса «робот-манипулятор»

Фрагмент загружаемой модели предприятия приведен приложении А.

Используемый подход позволяет быстро настраивать систему на различные изделия (грузовики, автобусы и др.) и конфигурации производств (от ручной – до роботизированной сборки).

**Изменения графика поставки комплектующих.** Пусть в начальный момент времени в расписании были размещены заказы на сборку трех грузовых автомобилей «Truck T4», отличающиеся директивными сроками завершения (рисунок 5.14), в остальном же – идентичные.

<input type="checkbox"/>	Номер заказа	Начало планового периода	Окончание планового периода	Время выполнения	Изделие	Тех. процесс
<input type="checkbox"/>	<a href="#">001</a>	01.04.2020 08:00	03.04.2020 18:00	03 апреля 16:54	Truck T4	Assembly T4
<input type="checkbox"/>	<a href="#">002</a>	01.04.2020 08:00	05.04.2020 08:00	04 апреля 10:06	Truck T4	Assembly T4
<input type="checkbox"/>	<a href="#">003</a>	01.04.2020 08:00	06.04.2020 08:00	06 апреля 02:06	Truck T4	Assembly T4

Рисунок 5.14 – Список размещенных заказов

Первая операция технологического процесса сборки каждого грузовика требует наличия батарейного отсека «Battery Module», поставки которых заданы последовательно, с шагом в один день (рисунок 5.15).

<input type="checkbox"/>	Артикул	Наименование	Размер партии	Конечное изделие	Дата поставки
<input type="checkbox"/>	01	Battery Module	1 ед.	Любое	<b>ср 1 апр. 00:00</b>
<input type="checkbox"/>	01	Battery Module	1 ед.	Любое	<b>чт 2 апр. 00:00</b>
<input type="checkbox"/>	01	Battery Module	1 ед.	Любое	<b>пт 3 апр. 00:00</b>

Рисунок 5.15 – Экран склада с первоначальными сроками поставок комплектующих

При сборке используются общие ресурсы и комплектующие, поэтому заказы не могут быть выполнены одновременно, не смотря на одинаковые сроки начала работ. Построенное расписание учитывает директивные сроки завершения заказов, распределяя комплектующие и ресурсы таким образом, чтобы пропустить вперед тех из них, кто наиболее ограничен по времени выполнения (рисунок 5.16). Так, даже если в ходе первоначального размещения первым будет запланирован заказ 3, то в ходе последующих переговоров он будет вытеснен заказами 1 и 2.

	01 Apr	02 Apr	03 Apr	04 Apr	05 Apr
<input type="checkbox"/> 1-Assembly T4		1-Assembly T4			
<input type="checkbox"/> 2-Assembly T4			2-Assembly T4		
<input type="checkbox"/> 3-Assembly T4				3-Assembly T4	

Рисунок 5.16 – Фрагмент построенного расписания в первоначальных условиях

Изменим сроки поставки батарейных отсеков, объединив две последние поставки в одну, и сдвинув на один вперед время ее осуществления (рисунок 5.17).

<input type="checkbox"/>	Артикул	Наименование	Размер партии	Конечное изделие	Дата поставки
<input type="checkbox"/>	01	Battery Module	1 ед.	Любое	<b>ср 1 апр. 00:00</b>
<input type="checkbox"/>	01	Battery Module	2 ед.	Любое	<b>сб 4 апр. 00:00</b>

Рисунок 5.17 – Экран склада с измененными сроками поставок комплектующих

В результате заказы 2 и 3 будут перемещены вправо в соответствии с новой датой поставки второй партии батарейных отсеков, при этом заказ 3 получит приоритет над заказом 2, так как в

этом случае, даже в новых условиях, он успеет закончиться раньше своего директивного срока (рисунок 5.18).

	01 Apr	02 Apr	03 Apr	04 Apr	05 Apr	06 Apr
+ 1-Assembly T4	1-Assembly T4					
+ 3-Assembly T4				3-Assembly T4		
+ 2-Assembly T4				2-Assembly T4		

Рисунок 5.18 – Фрагмент построенного расписания в измененных условиях

Указанные примеры показывают высокую адаптивность системы и возможность определять процесс планирования через «цифрового двойника» предприятия на основе онтологий.

### 5.3 Разработка прототипа ЦД бурения скважин

#### 5.3.1 Постановка задачи

Рассматривается задача построения плана бурения нефтедобывающей скважины и его последующей актуализации на основе данных о фактическом исполнении операций и вносимых в онтологию правил, модифицирующих технологический процесс бурения при выполнении заданных условий (извлеченных уроков). Требуется определить состав, последовательность и время выполнения технологических операций бурения скважины с учетом ограничений по оборудованию, материалам, инструментам, исполнителям и их специализациям таким образом, чтобы минимизировать общий срок выполнения работ.

Процесс бурения представляется в виде последовательности этапов, на каждом из которых выполняется обустройство одной из секций скважины. Этапы, в свою очередь, могут быть декомпозированы на операции, отражающие повторяющуюся последовательность действий: бурение на заданном интервале, промывку, спуск обсадных колонн, цементирование, подъем используемого оборудования. Число таких операций определяется протяженностью секции. Кроме этого, процесс может включать операции, зависящие от конструктивных особенностей скважины, например, в случае бурения глубоких скважин требуется дополнительная сборка свечей (частей бурильной колонны, неразъемных во время спускоподъемных операций).

Таким образом, состав операций задается в онтологии с помощью типового, параметризованного шаблона технологического процесса бурения, который должен быть модифицирован при создании заказа исходя из параметров конкретной скважины: конструкции, диаметра, глубины и 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 безостановочными или прерываемыми. Технологический процесс может быть скорректирован в процессе выполнения работ, например, в случае выявления нештатной ситуации или отклонения от намеченного графика.

В качестве входных данных используется следующая информация:

- концептуальные сведения о процессе бурения скважин, необходимые для описания моделей конкретных ситуаций: характеристики скважин, шаблоны планов бурения, номенклатура используемого оборудования и материалов, компетенции сотрудников;
- характеристики строящейся скважины, план бурения, имеющееся оборудование, материалы и исполнители;
- сведения о фактических параметрах выполненных работ: длительность исполненных операций;
- извлеченные уроки, содержащие информацию о характеристиках скважины, определяющую границы его применимости, и вносимых в план бурения изменениях (состав, порядок, длительность и безопасность операций, используемое оборудование).

Главной особенностью данного прототипа стала возможность накопления и учета «лучших практик», собранных при бурении предшествующих скважин, позволивших скорректировать технологический процесс с учетом специфики месторождения.

Для предметной области бурения расширение базовой онтологии потребовало введения 85 классов понятий и отношений. Данная область существенно отличается от области машиностроения, и разработка прототипа позволила проверить расширяемость базовой онтологии планирования.

### **5.3.2 Функциональные возможности системы**

Прототип предназначен для решения следующего комплекса функциональных задач:

- ведение онтологии бурения: создание, удаление и редактирование классов, отношений и атрибутов, отображение онтологии в виде семантической сети;
- ввод извлеченных уроков и размещение содержащейся в них информации в базе знаний;
- создание и изменение сцены: ввод и редактирование заявки на проведение бурения, состава имеющихся ресурсов (оборудования и исполнителей), изменение приоритета критериев планирования, а также сроков поставок материалов и комплектующих;

- автоматическое планирование выполнения операций на основе шаблона плана бурения, требований к ресурсам и материалам;
- адаптивное перестроение плана при возникновении следующих событий:
  - изменение онтологии (шаблонов планов, в части состава, порядка, длительности операций, а также требований к ресурсам),
  - изменение доступности ресурсов,
  - изменение сроков поставки материалов,
  - появление новых извлеченных уроков,
  - изменение фактических параметров исполнения операций;
- демонстрация итогов формирования и адаптации плана бурения (логирование происходящих событий и отправляемых агентами сообщений, формирование диаграммы Ганта, графика использования ресурсов, сведения о длительности выполнения заявки);
- выгрузка построенного расписания в структурированном формате;
- ввод данных о фактических параметрах исполнения операций.

### 5.3.3 Сценарии использования

**Планирование бурения скважины.** Для скважины указываются характеризующие признаки: наименование месторождения, тип буровой установки, тип скважины, а также ее конструкция (рисунок 5.19). Список признаков является расширяемым и определяется исходя из заданных в онтологии атрибутов и отношений.

Тип буровой установки

БУ 5000/320ЭК-БМЧ

Конструкция

Секция	Метод бурения	Забой (м)	Диаметр скважины (мм)	Диаметр ОК (мм)	
Направление	Роторный	50	660	630	
Кондуктор	Забойный винтовыми двигателем	460	393	324	
Техническая колонна	Забойный винтовыми двигателем	1122	295	245	
Эксплуатационная колонна	Забойный турбобуром	2346	220	178	
Хвостовик	Роторный	3744	152	114	

Добавить Отменить

Рисунок 5.19 – Создание заявки на бурение скважины

На основе шаблона технологического процесса и конструкции скважины формируется необходимая для строительства скважины последовательность операций, которая затем разворачивается на временной шкале с учетом ограничений по исполнителям и материалам (рисунки 5.20–5.21).

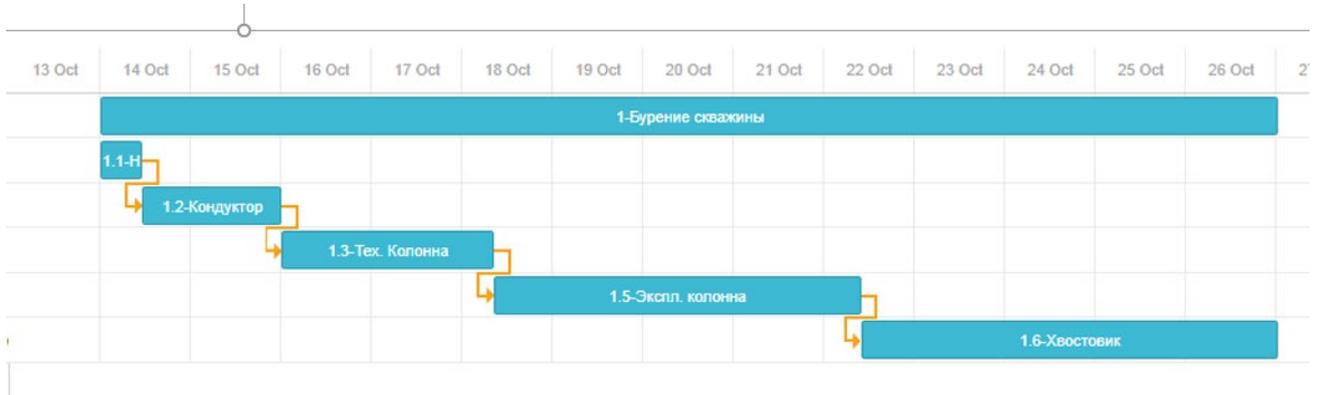


Рисунок 5.20 – Укрупненный план бурения



Рисунок 5.21 – Фрагмент плана бурения с детализацией по операциям

Формируется график использования ресурсов (рисунок 5.22).

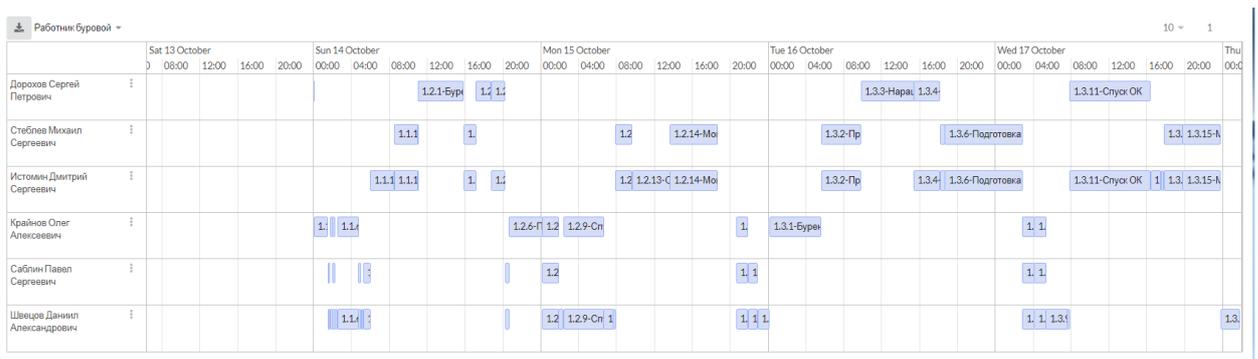


Рисунок 5.22 – Фрагмент графика использования ресурсов

На основе плана бурения рассчитывается график изменения достигнутой при строительстве глубины по дням, на котором отслеживаются как плановые, так и фактические результаты. При вводе данных о фактическом исполнении операций план адаптивно перестраивается и приводится в соответствие с актуальными сроками (рисунок 5.23).

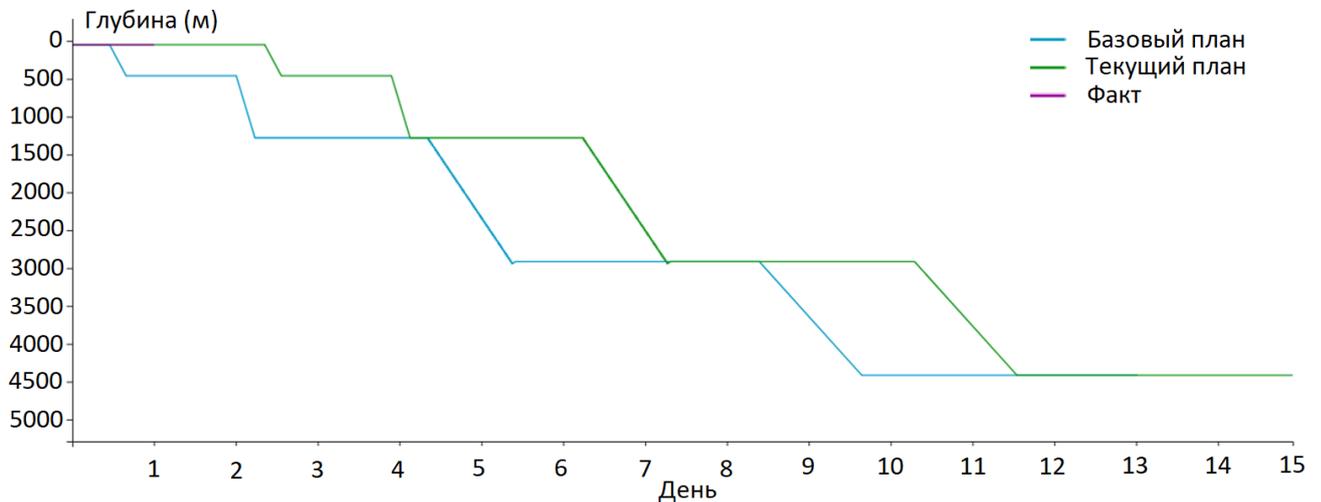


Рисунок 5.23 – График строительства скважины

**Изменение календаря работы ресурсов.** Строительство скважины может вестись в несколько смен. Для этого работники буровой с помощью отношения «Входит в подразделение» распределяются по нескольким бригадам (рисунок 5.24).

Наименование	Дата рождения	Дата приема	Входит в подразделение	Имеет профессию
> Дорохов Сергей Петрович	14.08.1988	09.06.2011	Буровая бригада 1	Бурильщик
> Стеблев Михаил Сергеевич	15.05.1988	09.06.2011	Буровая бригада 1	Помощник бурильщика
> Истомин Дмитрий Сергеевич	15.05.1988	09.06.2011	Буровая бригада 1	Помощник бурильщика
> Крайнов Олег Алексеевич	10.01.1989	09.06.2011	Буровая бригада 2	Бурильщик
> Саблин Павел Сергеевич	11.02.1991	09.06.2011	Буровая бригада 2	Помощник бурильщика
> Швецов Даниил Александрович	22.05.1990	09.06.2011	Буровая бригада 2	Помощник бурильщика

Рисунок 5.24 – Список работников буровой

Для подразделения или конкретного работника задается календарь работы – набор временных интервалов, соответствующих определенным дням недели (рисунок 5.25).

Название

1 смена

	Понедельник	Вторник	Среда	Четверг	Пятница	Суббота	Воскресенье
07:00							
08:00	08:00 - 20:00 x	08:00 - 14:00 x	08:00 - 14:00 x				
09:00							
10:00							
11:00							
12:00							
13:00							
14:00							
15:00							
16:00							
17:00							
18:00							
19:00							
20:00							
21:00							

Применить Отменить

Рисунок 5.25 – Редактирование календаря работы ресурсов

Агенты ресурсов используют собственный календарь, а при его отсутствии – календари подразделений, в которые они входят, для определения доступного для выполнения операции времени. В случае возникновения события, изменяющего календарь работы ресурса, назначенные на это время операции будут распланированы, после чего затронутые изменением агенты получают возможность улучшить свое состояние, предложив набор перестановок в расписании с учетом произошедших изменений.

**Применение извлеченных уроков.** Для учета опыта, накопленного при строительстве других скважин, в онтологию бурения введено понятие «Извлеченный урок», связанное отношением с понятием «Изменение технологического процесса». Определен базовый, поддерживаемый на уровне бизнес-логики, набор производных классов изменений, таких как добавление или удаление операций, изменение связанных с операциями атрибутов и отношений. Каждое изменение задает точку в шаблоне технологического процесса бурения относительно которой будут внесены правки, а также сам список правок. Для описания модифицируемых операций, а также вносимых корректировок могут использоваться любые атрибуты и отношения, характеризующие операции в онтологии бурения – таким образом достигается возможность динамического расширения числа признаков, которыми могут оперировать извлеченные уроки. Дополнительно через отношение «Применим для скважины» могут быть указаны параметры скважин, для которых необходимо использовать этот извлеченный урок.

При этом процесс построения расписания был дополнен следующими шагами:

- 1) Агенты заказов определяют какие из извлеченных уроков могут быть применены к рассматриваемой скважине.

- 2) Агенты операций, анализируют шаблон технологического процесса и проверяют дочерние операции на соответствие заданному в извлеченных уроках описанию (рисунок 5.26).

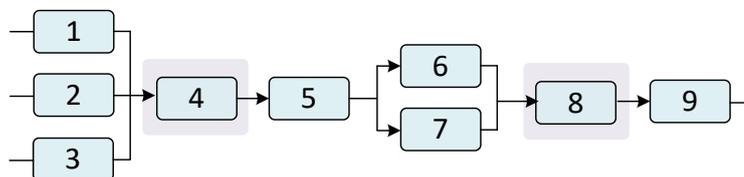


Рисунок 5.26 – Исходный технологический процесс

- 3) При каждом совпадении в шаблон технологического процесса вносятся указанные в извлеченном уроке изменения (например, вставляется дополнительная операция – рисунок 5.27):

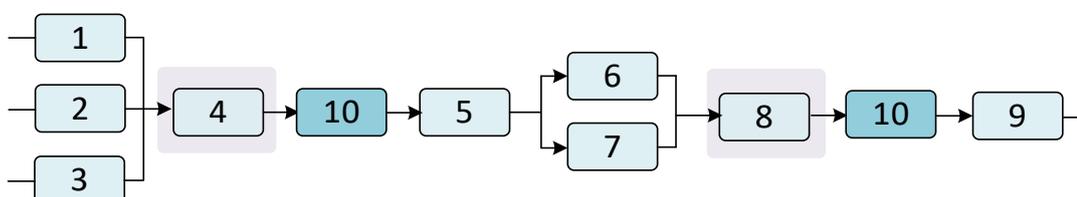


Рисунок 5.27 – Модифицированный технологический процесс

Данный пример особенно наглядно показывает значение онтологической модели предприятия, когда новые знания, выявленные в ходе работы буровой, могут быть «на лету» включены ЦД без перепрограммирования системы.

## 5.4 Разработка прототипа ЦД посевов растений для решения задач точного земледелия

### 5.4.1 Постановка задачи

Рассматривается задача создания ЦД посевов растений на полях, позволяющего в целях точного земледелия определить сроки и прогнозируемые показатели развития сельскохозяйственных культур при заданных условиях внешней среды.

Разрабатываемая система является частью ИКФС сельскохозяйственным предприятием [58], разрабатываемой по проекту Минобрнауки РФ по контракту №075-15-2019-1691 (уникальный номер RFMEFI60419X0224).

Целью работы системы является детальное планирование стадий развития растения на каждом поле и непрерывная оценка будущей урожайности культуры, что используется далее интеллектуальной системой управления техникой для обеспечения своевременности выполнения операций, позволяя реализовать точное земледелие не только по «месту», но и по времени.

Внедрение системы ЦД посевов позволяет снижать сложность и трудоемкость управления предприятием точного земледелия, повышать качество продукции растениеводства, а также снижать зависимость бизнеса от компетенций агронома и минимизировать риски потери урожая.

В основе реализации ЦД посевов лежит онтологический подход к представлению знаний предметной области, позволяющий построить базу знаний стадий развития различных сортов растений в виде семантической сети экземпляров классов понятий и отношений. В дальнейшем эти знания могут дополняться и уточняться из опыта, накопленного специалистами в ходе выращивания той или иной культуры.

Процесс развития растений описывается через последовательность сменяющих друг друга стадий с заданными правилами определения их длительности и расчета показателей развития растений. Если одна из стадий развития растения задерживается или на ее выходе наблюдаются низкие значения контролируемых показателей, то прогноз развития растения по следующим стадиям должен быть адаптивно пересчитан, что, в свою очередь, повлияет на план проведения будущих агротехнических мероприятий, например, по внесению удобрений или уборке урожая.

Правила расчета длительности стадий и показателей развития растений строятся на основе упрощенной математической модели, задающей диапазоны значений параметров среды на каждой стадии: при нормальной траектории развития растения, а также при возникновении опасных погодных явлений (например, заморозков, продолжительного отсутствия осадков и др.) и выходе за критические границы. Если величина параметра находится в пределах допустимых значений, то используется линейный закон изменения длительности стадии и начисления штрафов на контролируемые показатели растения, например, урожайность. При выходе за допустимые границы назначается максимально возможный штраф. Помимо пороговых значений для правил расчета показателей задается зависимость штрафов от продолжительности выхода параметра за установленные границы. Эффекты от различных параметров могут накладываться друг на друга с помощью различных стратегий агрегации: вычисления суммы или произведения, выбора минимального или максимального значения.

Изменение параметров внешней среды (например, погоды или почвы) на любой стадии должно вызывать адаптивный перерасчет длительности и показателей развития растения на данной и последующих стадиях.

Главной особенностью прототипа стала возможность динамического расширения списка культур и технологий их выращивания, добавления новых показателей развития растений и параметров среды, а также правил, устанавливающих зависимость между ними на основе использования онтологии растениеводства, расширяющего базовую онтологию управления ресурсами.

Применение мультиагентной технологии позволяет создавать агента каждой стадии и вводить события, влияющие на эту стадию, которые запускают цепочку согласованных пересчетов по всей цепи стадий развития растений.

По сравнению с другими описанными выше применениями разработанного комплекса программных средств, в рассматриваемой постановке агент задачи (стадии развития растения) имеет возможность динамически пересчитывать свою длительность в зависимости от сложившихся внешних условий (например, погоды или состояния почвы).

#### **5.4.2 Расширение базовой онтологии управления ресурсами**

На рисунке 5.28 приведен фрагмент онтологии развития растений, построенной на основе базовой онтологии управления ресурсами.

Ключевым понятием является посев (унаследовано от базового класса «Заказ» онтологии управления ресурсами), результатом которого является получение урожая («Производимого продукта»). Для достижения результата растению необходимо пройти последовательность стадий («Задач»). Для стадий дополнительно определены правила расчета длительности и достигаемых значений параметров создаваемого продукта (например, оценки урожайности посева). Выполнение правил зависит от параметров внешней среды (температуры, влажности и др.), данные о которых предоставляются сторонними сервисами. Каждый сервис реализует интерфейс, предоставляющий доступ к значениям указанного параметра для выбранного поля на заданном интервале времени. Система маршрутизирует запросы на получение данных, направляя их тем сервисам, которые зарегистрировали себя в качестве поставщиков запрошенного параметра. Состав параметров определен в базе знаний, внутренняя же реализация конкретного сервиса может использовать различные источники данных. Например, «сервис погоды», входящий в состав прототипа, выгружает исторические и прогнозные данные из файлов структурированного формата и связывает их с описанными в онтологии параметрами, такими как температура, влажность воздуха, облачность и т.п.

С правилами расчета длительности может быть связан набор условий, определяющих ограничения на значения заданного параметра. Параметры среды привязаны к определенным полям («Локациям») на которых размещаются посевы («Заказы»), что позволяет задавать для каждого из них собственную внешнюю среду.

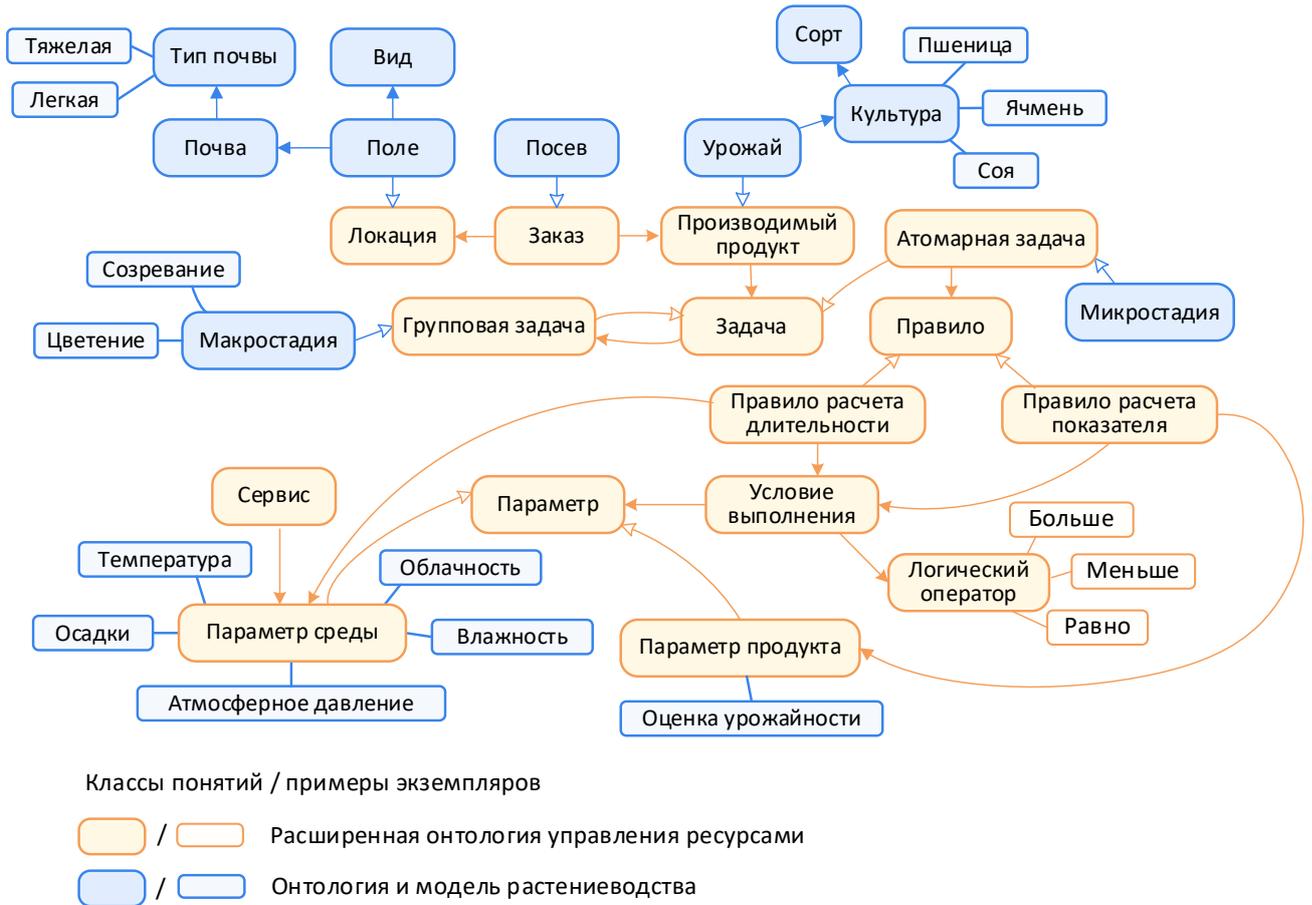


Рисунок 5.28 – Фрагмент онтологии ЦД растения

Пример правила расчета длительности стадии «Прорастание» на основе суммы параметра «Температура воздуха» показан на рисунке 5.29: длительность стадии равна количеству дней с температурой воздуха более 10 градусов, сумма температур которых превышает 110 градусов.

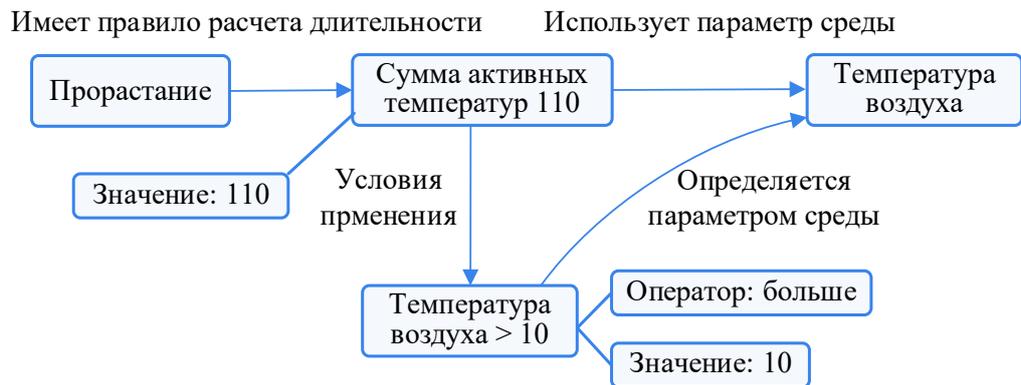


Рисунок 5.29 – Пример правила расчета длительности стадии

Пример правила расчета показателя приведен на рисунке 5.30. Значение показателя «Оценка урожайности» корректируется на основе функции штрафов в зависимости от наблюдаемых в период стадии «Колошение» значений параметра среды «Влажность воздуха».

Величина штрафа зависит от продолжительности выполнения указанного условия: чем дольше наблюдалась низкая влажность, тем больший ущерб будет нанесен урожайности.

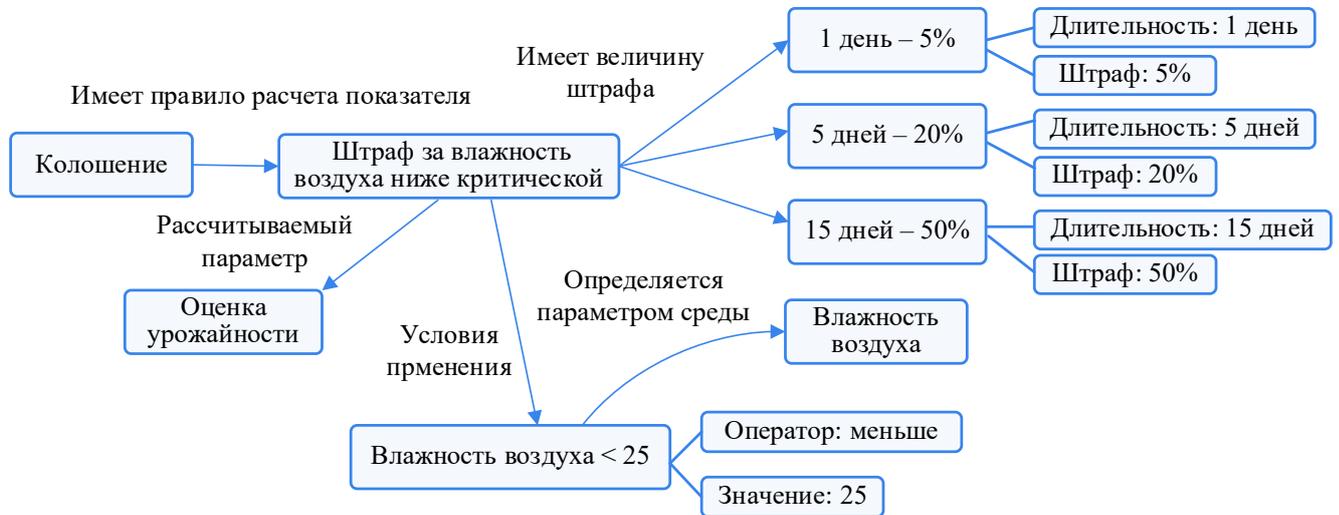


Рисунок 5.30 – Пример правила расчета показателя развития растения

#### 5.4.3 Функциональные возможности системы

Прототип предназначен для решения следующего комплекса функциональных задач:

- ведение онтологии растениеводства: создание, удаление и редактирование классов, отношений и атрибутов, отображение онтологии в виде семантической сети;
- создание и изменение сцены: ввод и редактирование данных о полях, посевах, и условиях внешней среды;
- прогнозирование сроков начала и завершения стадий, а также показателей развития растений в зависимости от условий внешней среды;
- адаптивное перестроение плана и показателей развития растений при возникновении следующих событий:
  - изменение онтологии (технологий выращивания культур, в части состава, порядка и детализации стадий, зависимостей от параметров внешней среды),
  - изменение сроков и параметров посевов,
  - изменение условий внешней среды,
  - ввод фактических данных о состоянии растений;
- демонстрация итогов результатов планирования (логирование происходящих событий и отправляемых агентами сообщений, формирование диаграммы Ганта);
- ввод данных о фактическом состоянии растений.

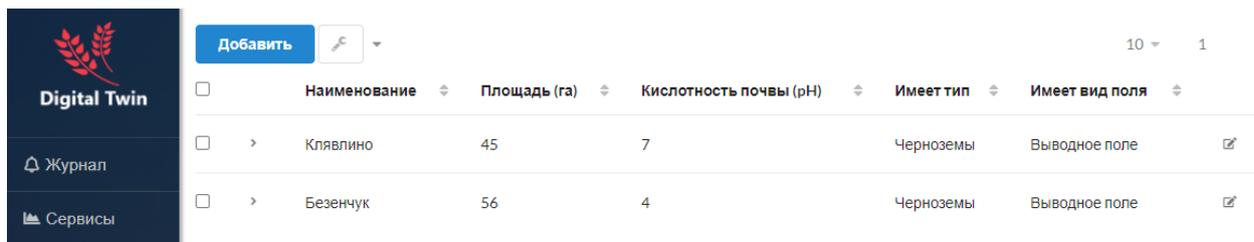
Предусматриваются следующие режимы функционирования:

- режим моделирования – позволяет получить оценку показателей развития растений и сроков вегетации при различных внешних условиях;
- режим управления в реальном времени – в этом режиме прототип адаптивно корректирует построенный план развития растения на основе актуальных погодных данных и результатов осмотров состояния растений агрономами.

#### 5.4.4 Сценарии использования

Рассмотрим сценарий использования прототипа ЦД растений на примере расчета длительности созревания и оценки урожайности озимой пшеницы.

**Ввод данных о полях и условиях внешней среды.** Добавим поля на севере (Клявлино) и юге (Безенчук) Самарской области (рисунок 5.31). При создании поля указываются заданные в онтологии отношения и атрибуты, например кислотность и тип почвы.



<input type="checkbox"/>	Наименование	Площадь (га)	Кислотность почвы (рН)	Имеет тип	Имеет вид поля	
<input type="checkbox"/>	> Клявлино	45	7	Черноземы	Выводное поле	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	> Безенчук	56	4	Черноземы	Выводное поле	<input type="checkbox"/>

Рисунок 5.31 – Список полей

Для каждого поля загрузим данные о среднесуточной температуре, влажности воздуха и количестве выпавших осадков. Значения параметров среды отображаются в виде графика на временной шкале (рисунок 5.32).



Рисунок 5.32 – График изменения параметров среды

Фрагмент данных, показывающий различия в температуре воздуха на заданных полях приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Среднесуточная температура на заданных полях

Дата	05.09	05.11	05.01	05.03	05.05	05.07
Клявлино (север)	11.5	2.5	-1.4	-0.6	18.7	22.2
Безенчук (юг)	12.2	4.5	0.1	0.8	19.8	26.1

**Ввод данных о посевах.** Разместим на каждом поле посевы озимой пшеницы с одинаковыми сроками и технологией выращивания (рисунок 5.33).

Имя	Поле	Дата посева	Является культурой	Имеет сорт	Процесс
Безенчук	Безенчук	01.09.2019 04:00:00	Пшеница	Базис	Технология выращивания пшеницы
Клявлино	Клявлино	01.09.2019 04:00:00	Пшеница	Базис	Технология выращивания пшеницы

Рисунок 5.33 – Список посевов

При создании посева каждой стадии развития растения ставится в соответствие свой программный агент задачи. Агент задачи анализирует связанные с ним правила, запрашивает у агента сцены данные о параметрах внешней среды того поля, на котором он расположен, рассчитывает длительность стадии, оценивает показатели развития растения, после чего отправляет результаты агентам связанных задач.

Результаты планирования отображаются в виде диаграммы Ганта (рисунок 5.34). Вследствие различия погодно-климатических условий, наблюдается различие в сроках развития посевов: посев в южной части региона созревает за 324 дня, а в северной – за 345 дней. Можно сравнить длительность развития растений по стадиям (на основе правила накопления температуры): уже на первой стадии на южном поле наблюдается опережение развития пшеницы.

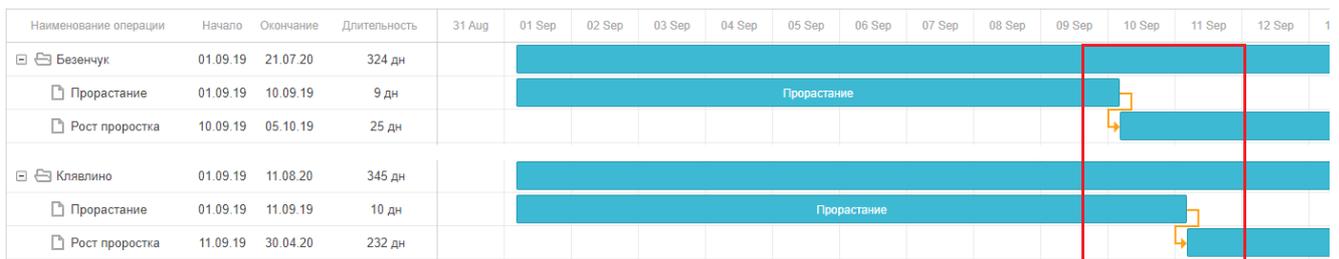


Рисунок 5.34 – Сравнение длительности созревания посевов по стадиям

**Ввод событий изменения условий внешней среды.** Добавим событие повышения температуры в сентябре на южном поле (рисунки 5.35 и 5.36).

### Новое событие

Поле  
Безенчук

Параметр  
Дневная температура (C)

Дата  
24 Сен 2019

Значение  
15

Применить Отменить

Рисунок 5.35 – Добавление события изменения условий внешней среды

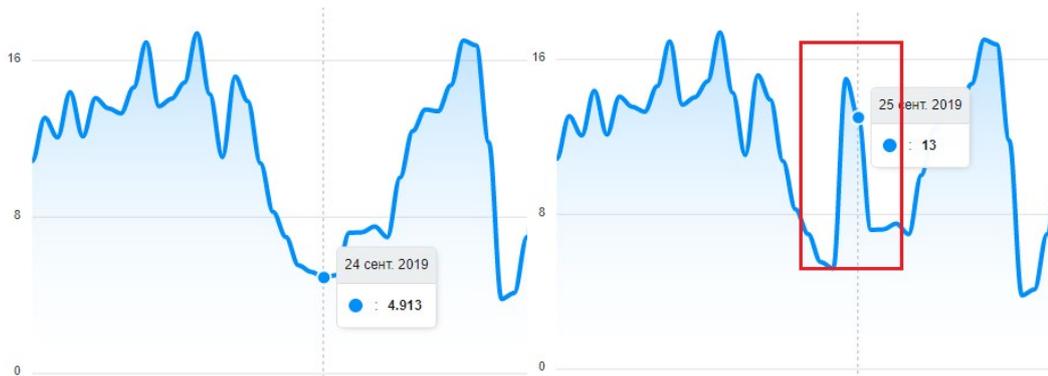


Рисунок 5.36 – Уточнение фактического значения температуры воздуха

На вкладке «План» можно видеть, что после применения события созревание посева произошло на один день раньше за счет сокращения стадии «Рост проростка» (рисунок 5.37), в соответствии с описанным в онтологии правилом.

Наименование операции	Начало	Окончание	Длительность	Наименование операции	Начало	Окончание	Длительность
Безенчук	01.09.19	21.07.20	324 дн	Безенчук	01.09.19	20.07.20	323 дн
Прорастание	01.09.19	10.09.19	9 дн	Прорастание	01.09.19	10.09.19	9 дн
Рост проростка	10.09.19	05.10.19	25 дн	Рост проростка	10.09.19	04.10.19	24 дн

Рисунок 5.37 – Изменение длительности стадий развития растений

Изменение оценки урожайности в соответствии с правилами расчета, использующими функции «бонусов и штрафов», можно наблюдать на вкладке «Показатели» (рисунок 5.38). График показывает постепенное снижение оценки урожайности вследствие накладываемых штрафов, причем для посевов на разных полях может наблюдаться различная динамика изменения урожайности.

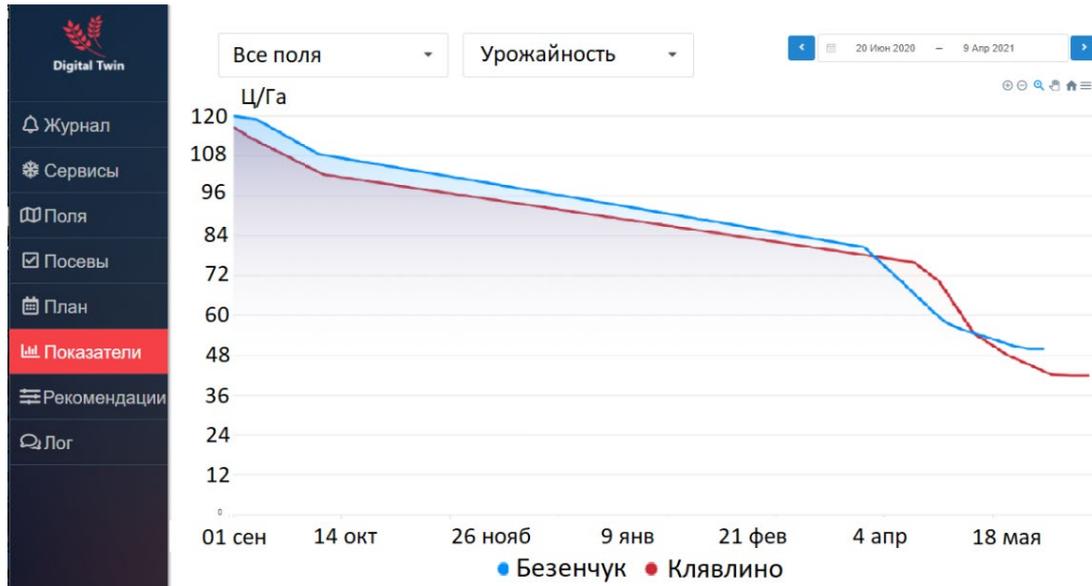


Рисунок 5.38 – Оценка урожайности

Для каждой стадии доступна детальная информация о примененных на ней штрафах урожайности (рисунок 5.39)

## Штрафы

### Урожайность

Параметр	Ограничение	Длительность	Штраф
Влажность воздуха (%)	ниже оптимального уровня = 65	3 дн.	0,28%
Гидротермический коэффициент	ниже оптимального уровня = 0,9	10 дн.	0,27%
Температура воздуха (С)	ниже оптимального уровня = 14	5 дн.	0,48%
Штраф после агрегации: 1,03%			

Рисунок 5.39 – Штрафы урожайности

Результаты разработки ЦД посевов растений опубликованы в работе [76].

## 5.5 Разработка прототипа ЦД целевого применения группировки космических аппаратов ДЗЗ

### 5.5.1 Постановка задачи

Современные комплексы дистанционного зондирования Земли – это сложные технические системы, отличающиеся разнообразием используемых средств, целевой аппаратуры, режимами и условиями ее применения [24]. Снижение стоимости и габаритов космических аппаратов позволяет создавать орбитальные группировки КА, обслуживание которых возможно только с помощью сети территориально распределенных пунктов приема информации.

Развитие рынка дистанционного зондирования сопровождается повышением требований к объему, качеству и оперативности предоставления данных. В частности, происходит переход от сырых снимков к созданию информационных продуктов с высокой степенью обработки, требующих проведения серии съемок наземных объектов в различные моменты времени.

Целевое применение группировки КА ДЗЗ заключается в совместном выполнении программы съемки наземных объектов и передачи полученных данных на наземные пункты приема информации. Методика планирования целевого применения должна учитывать технические ограничения оборудования, внешние условия, интересы эксплуатирующих организаций и потребителей целевой информации, а также системные эффекты, возникающие при совместном использовании орбитального и наземного сегментов космической системы [9]. Требования к экономической эффективности обуславливают необходимость формирования таких планов наблюдения, реализация которых обеспечит максимальную ценность информации о снятых наземных объектах в условиях ограниченных возможностей бортового информационного комплекса КА по ее сбору, хранению и передаче.

Для спецификации задачи необходимо задать состав имеющихся в системе КА, пунктов приема информации и заявок на съемку районов наблюдения. Для каждого КА и ППИ указывается перечень характеристик, определяющих возможность выполнения тех или иных операций. Так, космические аппараты способны проводить съемку и передачу данных, а ППИ – прием данных, без возможности пересечения отдельных операций во времени. Для КА дополнительно задаются параметры орбиты и ограничения на объем памяти. Для пунктов приема информации – географические координаты и характеристики каналов связи, для районов наблюдения – географические координаты.

Процесс обслуживания заявки представляется в виде последовательности операций по съемке, хранению, передаче, и приему информации (рисунок 5.40).

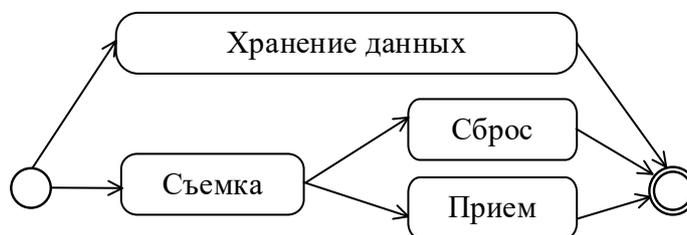


Рисунок 5.40 – Процесс обслуживания заявки

Сформированы модели, позволяющие определить:

- время прохождения космического аппарата над зонами видимости с ППИ и районами наблюдения;

- разрешение и стоимость снимка каждого района, попавшего в полосу обзора космического аппарата;
- объем информации, записываемой в бортовое запоминающее устройство при съемке;
- продолжительность выполнения операций по съемке и передаче информации [22].

Наличие нескольких КА увеличивает количество потенциально возможных съемок наземных объектов, что приводит к увеличению числа альтернативных вариантов съемки объектов различными космическими аппаратами. При ограниченном количестве пунктов приема информации становится возможной ситуация, когда несколько КА претендуют на передачу данных на один и тот же пункт приема информации. Из-за технических ограничений при составлении расписания работы бортовой аппаратуры дополнительно появляется задача устранения конфликтов между различными режимами функционирования.

Каждой заявке сопоставлен набор критериев  $\bar{r}$ : время доставки информации, разрешение в заданном диапазоне спектра, стоимость выполнения и др. Для каждого критерия указан диапазон допустимых значений  $(r_{min}, r_{max})$ , а также идеальное (оптимальное) значение  $r_{id}$ . На основе этих критериев формируются целевая функции размещения заявки, представляющая собой свертку функций по каждому критерию  $L^{(r)}$ , общий вид которых показан на рисунке 5.41.

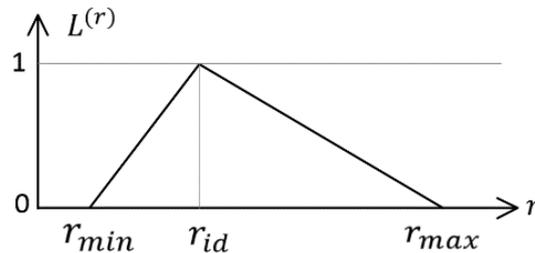


Рисунок 5.41 – Общий вид компонента целевой функции размещения заявки

Требуется сформировать план целевого применения космической системы, обеспечивающий максимизацию суммарной удовлетворенности заявок на съемку районов наблюдения (в соответствии с их критериями), а также производительности ресурсов космической системы. Полученное расписание должно удовлетворять следующим ограничениям:

- наличие видимости между КА и районом наблюдения при съемке;
- наличие видимости между космическим аппаратом и ППИ при передаче информации;
- наличие свободного места в бортовом запоминающем устройстве спутника;
- согласованность времени съемки, передачи и приема информации;
- заданным требованиям по недопустимости наложения режимов работы различных видов аппаратуры.

Важной особенностью задачи является необходимость учета динамически возникающих событий, к числу которых относятся поступление новой задачи или изменение ее параметров, выход из строя ресурса КА или средств связи, погрешность или сбой в получении результатов съемки и т.д.

### **5.5.2 Функциональные возможности системы**

ИКФС целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли предназначена для составления расписания работы космической системы на интервале от 1,5 до 10 суток, при заданном составе технических характеристик космической системы, показателей эффективности, технических параметров и ограничений по логике работы систем КА, модели целевой обстановки и внешней среды.

Система обеспечивает выполнение следующих функций:

- ввод состава и параметров космической системы, а также заявок на съемку объектов;
- оперативное планирование работы группировки космических аппаратов с учетом их технического состояния и возможностей бортовых систем;
- оперативное планирование сеансов связи для передачи информации ДЗЗ с космических аппаратов на пункты приема информации;
- адаптивная корректировка построенного плана при возникновении непредвиденных событий (изменение технических характеристик КА, ограничений, критериев, состава орбитальной группировки и пунктов приема информации);
- визуализация полученных в ходе планирования результатов на трехмерной сцене, а также с помощью диаграмм и графиков [22].

Система может быть использована для автоматизации процессов планирования, оптимизации и контроля согласованного использования целевой аппаратуры орбитальной группировки КА при решении задач дистанционного зондирования Земли, а также для оценки реализуемости основных целевых показателей проектируемых космических систем.

### **5.5.3 Особенности архитектуры системы**

Архитектура системы приведена на рисунке 5.42. Помимо базовых, рассмотренных в главе 4, модулей были добавлены модули для расчета баллистики, моделирования и визуализации работы группировки космических аппаратов:

- 1) модуль баллистики – формирует интервалы прохождения космических аппаратов через зоны видимости с районами наблюдения и ППИ, определяет разрешение снимков в конкретных условиях наблюдения;

- 2) модуль моделирования и визуализации – позволяет визуализировать процесс выполнения дистанционного зондирования Земли на заданном горизонте времени с помощью трехмерной модели Земли.



Рисунок 5.42 – Архитектура системы

Опыт разработки ЦД показывает, что для каждого нового предприятия в архитектуру ЦД могут включаться новые прикладные модули, но общая архитектура ЦД остается неизменной.

#### 5.5.4 Сценарии использования

**Ввод данных о космической системе и целевой обстановке.** Состав группировки КА и сети ППИ редактируется на вкладке «Ресурсы космической системы». При добавлении космического аппарата указываются параметры его орбиты (такие как высота орбиты, наклонение, эксцентриситет и др.), а также параметры целевой аппаратуры, такие как объем бортового запоминающего устройства и скорость передачи данных. Для ППИ помимо широты и долготы указывается угол места, определяющий область радиовидимости пролетающих над ним космических аппаратов. Для ввода заявки на съемку объектов наблюдения достаточно указать точку на карте на экране «Целевая обстановка», после чего уточнить ее параметры в открывшемся диалоговом окне.

На основе введенных данных системой будет проведен расчет положения КА, ППИ и районов наблюдения на заданном интервале времени, сами объекты будут отображены на трехмерной модели и развертке поверхности Земли. Орбиты и положение космических аппаратов соответствуют текущему модельному времени и будут динамически обновляться в соответствии с установленной скоростью моделирования (рисунок 5.43).

Любое изменение исходных данных рассматривается системой как внешнее событие, будь то появление новой заявки на съемку, выход из строя космического аппарата или перерыв в

работе пункта приема информации. Все события фиксируются на экране «Очередь событий» в хронологическом порядке.

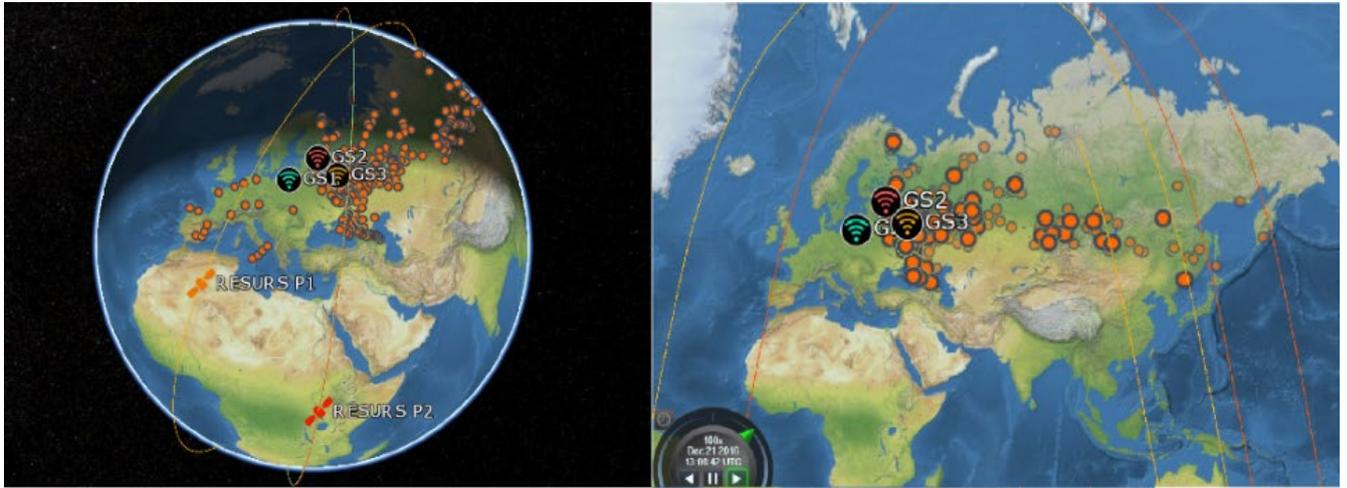


Рисунок 5.43 – Экран моделирования космической системы

События об изменении состояния космической системы или целевой обстановки передаются модулю планирования в уже обработанной форме: в виде задач и ресурсов с заданными ограничениями по времени размещения операций, соответствующим интервалами видимости. План действий выбранного космического аппарата можно увидеть на экране «План целевого применения группировки КА». Здесь показаны видимости космических аппаратов со всеми районами и пунктами приема информации, а также план выполнения операций по съемке и сбросу информации, построенный на десять суток вперед. В целях демонстрации ограничения по памяти, здесь также показан график наполнения запоминающего устройства (рисунок 5.44).

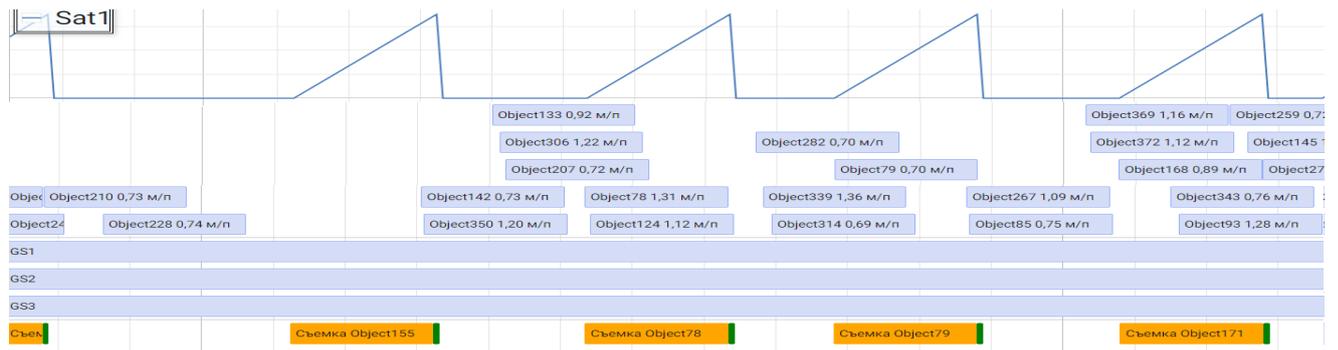


Рисунок 5.44 – План целевого применения группировки КА

Экран «Мир агентов» схематично отображает отношения, устанавливающиеся между агентами космических аппаратов, районов наблюдения и пунктов приема информации в процессе построения расписания. Все агенты показаны кружками, цвет которых плавно изменяется от красного к зеленому пропорционально их удовлетворенности. Под удовлетворенностью понимается степень достижения целей агентов, выраженных в их целевых функциях. Связи устанавливаются между районами наблюдения и космическими аппаратами,

когда данный район наблюдения снимается данным КА, и районами наблюдения и пунктами приема информации, когда снимок данного района сбрасывается на данный ППИ. Связи динамически изменяются в течение планирования. При образовании новой связи, районы наблюдения изменяют свой цвет и притягиваются с периферии к центру экрана. После окончания процесса планирования сущности группируются, более наглядно отображая структуру построенных связей (рисунок 5.45).

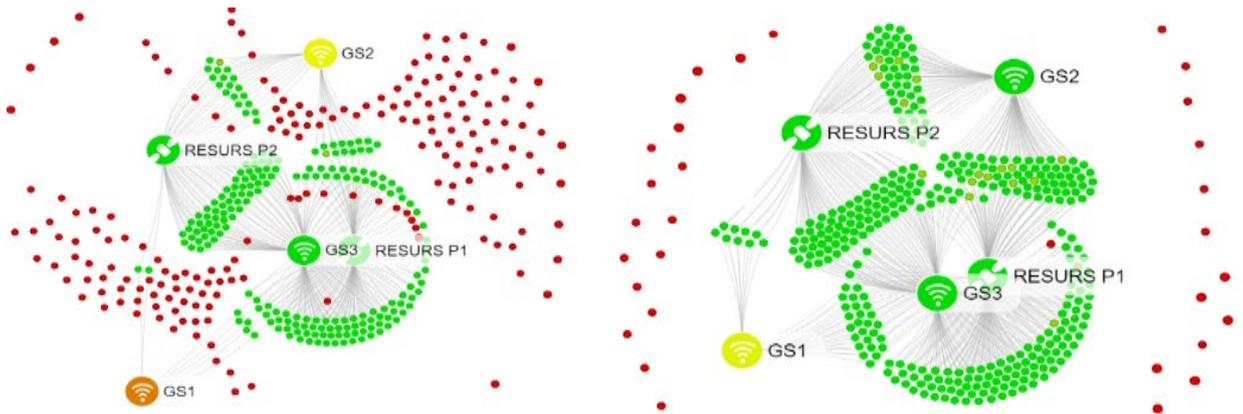


Рисунок 5.45 – Экран «Мир агентов»

Экран «Показатели эффективности» содержит диаграммы, показывающие, как в процессе планирования изменялось качество расписания. Здесь расположен график изменения целевой функции системы, диаграммы, отражающие изменение числа снимков, снятых каждым КА и полученных каждым ППИ (рисунок 5.46).

**Изменение состава космической системы.** Изменим состав космической системы, удалив несколько пунктов приема информации и космических аппаратов. Удаление ресурсов приводит к тому, что связи между заявками и удаляемыми ресурсами на экране «Мир агентов» разрываются. Агенты оказавшихся незапланированными заявок пытаются найти вариант размещения на других ППИ и КА. Процесс итерационной перестройки расписания можно проследить на экране «Показатели эффективности» (рисунок 5.46). На этом экране видно, что множественные события постоянно разрушали построенное расписание, снижая средний уровень удовлетворенности агентов. Однако системе удавалось парировать происходящие изменения, частично или полностью отыгрывая произошедший спад путем перераспределения заявок на оставшиеся в строю ресурсы. В обозначенных условиях наиболее ценной становится способность системы оперативно восстанавливать поврежденное расписание, повышая гибкость, масштабируемость и живучесть космической системы.

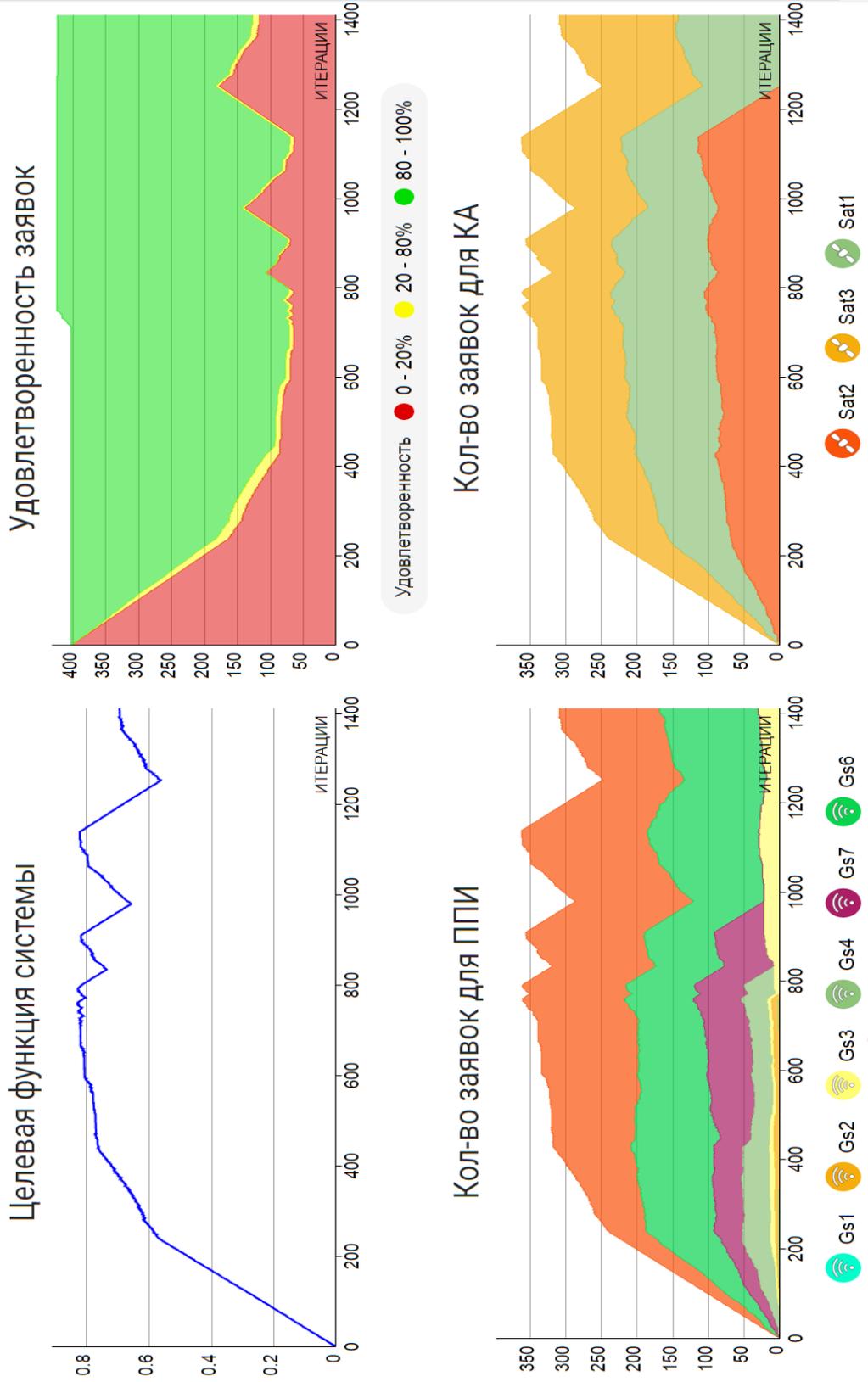


Рисунок 5.46 – Экран «Показатели эффективности»

**Оценка качества и эффективности решения.** Оценка метода проводилась на задаче планирования группировки КА ДЗЗ, в качестве ресурсов рассматривались 3 КА и 7 ППИ, число заявок на съемку увеличивалось с 50 до 500 с шагом в 50. Результаты показали, что при небольшой потере качества метод и средства позволяют ускорить поиск решения, обрабатывать большее число заявок, причем по событиям (рисунок 5.47).

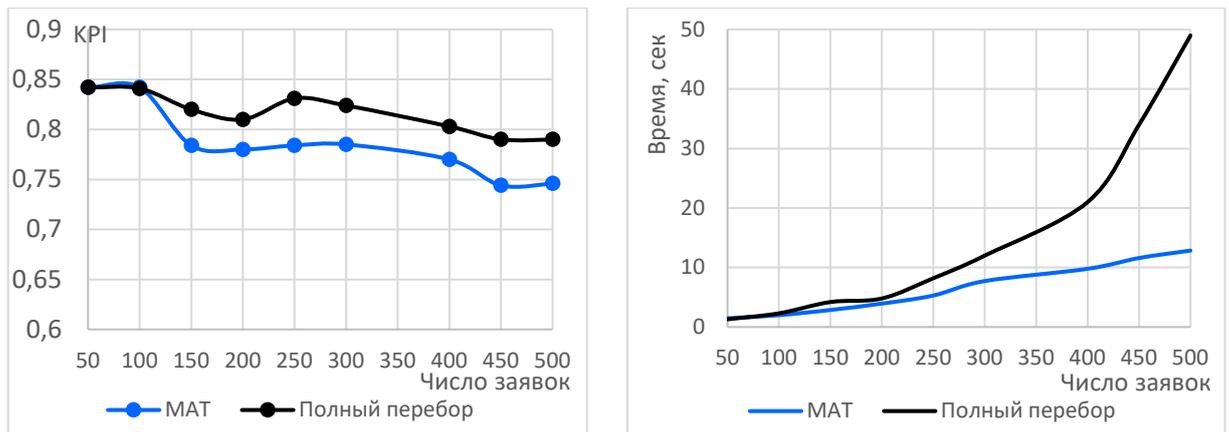


Рисунок 5.47 – Оценка качества и эффективности решения в сравнении с комбинаторным поиском

Таким образом, в настоящем разделе показана возможность создания весьма различных приложений на базе унифицированных методов и средств создания ЦД, позволяющих сочетать преимущества онтологических моделей предприятий и мультиагентных технологий для управления ресурсами.

## 5.6 Выводы

Несмотря на существенные различия в постановках, приведенные выше задачи были решены с помощью единого комплекса инструментальных средств с некоторыми доработками, связанными, в первую очередь, с визуализацией предметно-зависимых процессов, таких как диаграммы загрузки ресурсов по цехам, график «глубина-день» при бурении скважины или экран моделирования космической системы ДЗЗ. При этом все изменения в модуле планирования «не привязывались» к конкретной предметной области и лишь наращивали его общие возможности, что позволяет сделать вывод о постепенной стабилизации комплекса, который в дальнейшем может предлагаться системным интеграторам как сервис, открытый для расширения возможностей и гибко настраиваемый на специфику работы предприятий.

При этом предложенные методы и средства позволили существенно снизить сроки и стоимость создания указанных прототипов ЦД за счет построения систем на основе онтологий, без сложного и трудоемкого процесса разработки «с нуля» в новой предметной области.

В каждом случае использовалась базовая онтология управления ресурсами, на основе которой создавались предметно-ориентированные онтологии и онтологические модели предприятий. В случае агрегатной сборки грузовиков удалось переиспользовать и онтологию машиностроения, расширив ее на частный случай робототехнических средств. Параллельно, исходя из возникающих при решении прикладных задач потребностей, происходило наращивание базовой онтологии управления ресурсами, синхронно с которой модифицировалась и логика работы агентов. Общие сведения о количестве сущностей в базе знаний, агентов в МАС управления ресурсами, а также примерных сроках доработки комплекса инструментальных средств приведены в таблице 5.2 (число агентов зависит от количества введенных заказов, в таблице приведены усреднённые значения).

Из полученных результатов видно, что базовая онтология управления ресурсами сформирована из примерно 60 классов основных понятий и отношений. Прикладные онтологии расширяют состав понятий и отношений примерно в 2 – 3 раза. На этой основе построены онтологические модели предприятия с числом экземпляров от 236 – до 925, которые были загружены в МАС, где позволили автоматически создать требуемое число агентов для каждого ЦД. Трудоемкость доработки унифицированной МАС для каждого из указанных применений составила в среднем 2-3 месяца, что по экспертным оценкам позволяет в 3–4 раза сократить сроки и стоимость создания ЦД в сравнении с традиционным подходом.

Таблица 5.2 – Общие сведения применения комплекса инструментальных средств создания ЦД для решения прикладных задач

Прикладная задача	Число классов понятий и отношений			Количество агентов	Время на разработку (чел/м)	
	$O_{plan}$	$O_{domain}$	$M$		БЗ	МАС
Сборка самолетов	61	152	925	> 350	3	3.5
Сборка грузовиков		89	382	> 520	1	2
Бурение скважин		85	441	> 5000	2	3
ЦД посевов растений		42	236	> 100	1	1
Группировка КА ДЗЗ		112	304	> 450	1	4

На основании проведенного анализа можно выделить следующие основные преимущества разработанного подхода и созданного комплекса:

- позволяет существенно уменьшить сложность и трудоёмкость создания МАС для управления ресурсами;

- позволяет бороться с «редукционизмом» и наращивать число факторов для принятия решений, например, вводя кран-балку как ресурс для планирования;
- позволяет настраивать логику работу МАС без привлечения программистов;
- позволяет сократить расходы на создание и поддержку рассматриваемых систем;
- позволяет привлекать к разработке программистов с более низкой квалификацией;
- позволяет 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.

Все рассмотренные системы использованы в ходе коммерческих проектов по созданию промышленных ЦД процессов управления предприятиями, которые в настоящее время находятся в процессе промышленного внедрения, эксплуатации или дальнейшего развития.

В рамках пятой главы получены следующие результаты:

- 1) На основе разработанного комплекса инструментальных средств созданы прототипы ЦД для решения задач управления ресурсами промышленных предприятий различного класса: агрегатно-сборочного производства на авиастроительном предприятии; сборочного производства грузовых электромобилей, бурения нефтедобывающих скважин, выращивания посевов растений, а также целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.
- 2) Проведена практическая апробация разработанных методов и средств у заказчиков в ходе реализации рассмотренных прототипов ЦД процессов управления предприятиями.
- 3) Для каждого из прототипов описаны функциональные возможности и особенности архитектуры ЦД, рассмотрены сценарии использования и результаты применения.
- 4) Показан существенный выигрыш в сокращении трудоемкости разработки ЦД процессов управления предприятиями за счет применения комплекса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной диссертационной работы были получены следующие результаты:

- 1) Предложена методика построения ЦД процессов управления предприятиями в виде ИКФС на основе онтологий и мультиагентных технологий.
- 2) Выполнен системный анализ сложных задач и процессов управления производственными ресурсами, формализована и построена базовая онтология управления ресурсами для построения прикладных онтологий и онтологических моделей ЦД для учета специфики управления предприятиями.
- 3) Формализована постановка задачи поиска баланс интересов (консенсуса) программных агентов ЦД предприятия для реакции на события, нарушающие планы, в реальном времени.
- 4) Модифицирована модель ПВ-сети предприятия: введены новые классы онтологически-настраиваемых агентов и протоколы их взаимодействия, позволяющие применять создаваемые онтологические модели предприятий и наращивать учитываемые факторы предметной области в ходе разработки и применения ЦД предприятий.
- 5) Разработан комплекс инструментальных средств для автоматизации процесса создания программных компонент ЦД предприятий на основе онтологий и мультиагентных технологий.
- 6) Созданы ЦД предприятий для управления агрегатно-сборочным производством на авиастроительном предприятии; производством грузовых электромобилей, бурения нефтяных скважин, выращивания посевов растений и целевым применением группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.
- 7) Показано существенное (в 3 – 4 раза) сокращение сроков и стоимости разработки ЦД предприятий, получаемое за счет использования онтологических моделей предприятий для настройки систем рассматриваемого класса на особенности предметной области.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ЦД – цифровой двойник

КФС – кибер-физическая система

ИКФС – интеллектуальная кибер-физическая система

МАС – мультиагентная система

ПВ-сеть – сеть потребностей и возможностей

КА – космический аппарат

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

ППИ – пункт приема информации

БЗ – база знаний

ТСЕ – технологическая сборочная единица

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Амелин, К.С. Применение алгоритма локального голосования для достижения консенсуса в децентрализованной сети интеллектуальных агентов / К.С. Амелин, Н.О. Амелина, О.Н. Граничин, А.В. Корвяко // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение.* – 2012. – № 11. – С. 39-47.
2. Безняков, А.М. Методика оптимального планирования применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в обзорном режиме / А.М. Безняков, В.И. Горбулин, Д.Л. Каргу, А.С. Фадеев, В.И. Щербаков // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета.* – 2013. – № 1 (39). – С. 39-45.
3. Боровков, А.И. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А.И. Боровков, А. Прохоров, М. Лысачев. – Москва, 2020. – 404 с.
4. Бурков, В.Н. Теория активных систем: состояние и перспективы / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков. – М: Синтег, 1999. – 128 с.
5. Васильев, А.Н. Методы создания цифровых двойников на основе нейросетевого моделирования / А.Н. Васильев, Д.А. Тархов, Г.Ф. Малыхина // *Современные информационные технологии и ИТ образование.* – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 521-532.
6. Виттих, В.А. Метод сопряжённых взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени / В.А. Виттих, П.О. Скобелев // *Автометрия.* – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 78-87.
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. 177-185.
8. Гаврилова, Т.А. Инженерия знаний. Модели и методы: Учебник / Т.А. Гаврилова, Д.В. Кудрявцев, Д.И. Муромцев. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 324 с.
9. Гончаров, А.К. Планирование сеансов приёма информации с космических аппаратов орбитальной группировки при ограниченном количестве приёмных комплексов / А.К. Гончаров, А.А. Чернов // *Космонавтика и ракетостроение.* – 2014. – №1 (74). – С. 180-189.
10. Городецкий, В.И. Поведенческие модели кибер-физических систем и групповое управление, Основные понятия / В.И. Городецкий // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2019. – № 1 (203).

– С. 144-160.

11. Добров, Б.В. Онтологии и тезаурусы. Модели, инструменты, приложения. Учебное пособие / Б.В. Добров, В.В. Иванов, Н.В. Лукашевич, В.Д. Соловьев. – Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 176 с.

12. Клейменова, Е.М. Мультиагентная технология адаптивного планирования для управления проектами НИР и ОКР в аэрокосмических приложениях / Е.М. Клейменова, П.О. Скобелев, В.Б. Ларюхин, И.В. Майоров, Д.С. Косов, Е.В. Симонова, А.В. Царев, А.Л. Феоктистов, Е.В. Полончук // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 5. – С. 58-63.

13. Лазарев, А.А. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы / А.А. Лазарев, Е.Р. Гафаров. – М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), 2011. – 222 с.

14. Лахин, О.И. Метод адаптивного планирования грузопотока российского сегмента Международной космической станции на основе мультиагентной технологии / О.И. Лахин, И.В. Майоров // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16, № 12. – С. 847-852.

15. Люгер, Д. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Д. Люгер. – М: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864 с.

16. 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.

17. Новиков, Д.А. Классификации систем управления / Д.А. Новиков // Проблемы управления. – 2019. – № 4. – С. 27-42.

18. Пантелеев, М.Г. Интеллектуальные агенты и многоагентные системы / М.Г. Пантелеев, Д.В. Пузанков. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 216 с.

19. Пекарш, А.И. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов / А.И. Пекарш, Ю.М. Тарасов, Г.А. Кривое, А.Г. Громашев, В.А. Матвиенко, Г.В. Грубич, В.Н. Быченко, Б.Н. Марьин, Ю.А. Воробьев. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.

20. Ржевский, Г.А. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания сложных систем управления предприятиями / Г.А. Ржевский, П.О. Скобелев. – Самара: Офорт, 2015. – 290 с.

21. 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.
22. Скобелев, П.О. Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием мультиагентных технологий / П.О. Скобелев, В.К. Скимунт, Е.В. Симонова, В.С. Травин, А.А. Жилиев // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 10(171). – С. 60-70.
23. Скобелев, П.О. Разработка интеллектуальной системы управления сборными грузовыми перевозками в реальном времени / П.О. Скобелев, А.Н. Лада, С.С. Кожевников, Д.С. Рыбак, И.А. Пустовой, А.В. Царев // *Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки»*. – 2013. – № 3(39). – С. 65–74.
24. Соллогуб, А.В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли / А.В. Соллогуб, Г.П. Аншаков, В.В. Данилов. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.
25. Танаев, В.С. Введение в теорию расписаний / В.С. Танаев, В.В. Шкурба. – М.: Наука, 1975. – 256 с.
26. Таха, Х.А. Введение в исследование операций / Х.А. Таха. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
27. Хорошевский, В.Ф. Проектирование систем программного обеспечения под управлением онтологий: модели, методы, реализации / В.Ф. Хорошевский // *Онтология проектирования*. – 2019. – Т. 9, № 4. – С. 429-448.
28. Adams, J. The Shifting Bottleneck Procedure for Job Shop Scheduling / J. Adams, E. Balas, D. Zawack // *Management Science*. – 1988. – Vol. 34. – P. 391-401.
29. Amelina, N. Approximate Consensus in Stochastic Networks with Application to Load Balancing / N. Amelina, A. Fradkov, Y. Jiang, D.J. Vergados // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 2015. – Vol. 61(4). – P. 1739-1752.
30. 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.
31. Bao, Q. Ontology-based modeling of part digital twin oriented to assembly // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2020. – P. 1-13.

32. Barricelli, B.R. A Survey on Digital Twin : Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications / B.R. Barricelli, E. Casiraghi, D. Fogli // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 167653-167671.
33. Bechhofer, S. OWL Web Ontology Language Reference / S. Bechhofer, F. Van Harmelen, J. Hendler, I. Horrocks, D.L. McGuinness, P.F. Patel-Schneider, L.A. Stein // W3C Recommendation. – 2004. – Vol. 10. – P. 1-80.
34. Bonnet, J. Multi-satellite Mission Planning Using a Self-Adaptive Multi-agent System / J. Bonnet, M.P. Gleizes, E. Kaddoum, S. Rainjonneau, G. Flandin // International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, SASO. – 2015. – Vols. 2015-Octob. – P. 11-20.
35. Borgo, S. Foundations for a Core Ontology of Manufacturing / S. Borgo, P. Leitão // Ontologies. – P. 751-775.
36. Bouzini-Hassini, S. A Multi Agent Scheduling Integrating Planning and Maintenance for Generalized Floor Shops / S. Bouzini-Hassini, F. Benbouzid-Sitayeb, S. Aknine // Preceedings of the international Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists. – 2012. – Vol. II. – P. 211-217.
37. Brucker, P. A branch and bound algorithm for the cyclic job-shop problem with transportation / P. Brucker, E.K. Burke, S. Groenemeyer // Computers and Operations Research. – 2012. – Vol. 39(12). – P. 3200-3214.
38. Cândido, G. A mutliagent control system for shop floor assembly / G. Cândido, J. Barata // Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. – 2007. – P. 293-302.
39. Chandrasegaran, K. The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design / 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.
40. 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.
41. Dishan, Q. A dynamic scheduling method of earth-observing satellites by employing rolling horizon strategy / Q. Dishan, H. Chuan, L. Jin, M. Manhao // The Scientific World Journal. – 2013. – Vol. 2013.
42. Elmi, A. A simulated annealing algorithm for the job shop cell scheduling problem with intercellular moves and reentrant parts / A. Elmi, M. Solimanpur, S. Topaloglu, A. Elmi // Computers & Industrial Engineering. – 2011. – Vol. 61(1). – P. 171-178.

43. Gabor, T. A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems // IEEE International Conference on Autonomic Computing. – IEEE, 2016. – P. 374-379.
44. Gao, K. Multi-Satellite Observation Scheduling Based on a Hybrid Ant Colony Optimization / K. Gao, G. Wu, J. Zhu // Proceedings of the 2nd International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation. – 2013. – № February. – P. 675-678.
45. Giovannini, A. Ontology-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.
46. Gist - minimalist upper ontology [Электронный ресурс]. URL: <https://semanticarts.com/gist> (дата обращения: 02.02.2021).
47. Glaessgen, E.H. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles // 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. – 2012. – P. 1818-1832.
48. Globus, A. Application of Techniques for Scheduling Earth Observing Satellites // Proceedings of the 16th conference on Innovative applications of artificial intelligence. – 2004. – P. 836-843.
49. Grieves, M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches. – 2017. – P. 85-113.
50. Gruber, T. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing? / T. Gruber // International journal of human-computer studies. – 1995. – Vol. 43(5-6). – P. 907-928.
51. Gruninger, M. The process specification language (PSL) theory and applications / M. Gruninger, C. Menzel // AI Magazine. – 2003. – Vol. 24(3). – P. 63-74.
52. Iacopino, C. How ants can manage your satellites / C. Iacopino, P. Palmer, N. Policella, A. Donati, A. Brewer // Acta Futura. – 2014. – Vol. 9. – P. 57-70.
53. 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.
54. Kang, S.G. Multi-Agent Based Beam Search for Real-Time Production Scheduling and Control / S.G. Kang, S.H. Choi. – London: Springer London, 2013.
55. Karapetyan, D. Satellite downlink scheduling problem: A case study / D. Karapetyan, S. Mitrovic

- Minic, K.T. Malladi, A.P. Punnen // *Omega (United Kingdom)*. – 2015. – Vol. 53. – P. 115-123.
56. Kurdi, M. An effective new island model genetic algorithm for job shop scheduling problem / M. Kurdi // *Computers and Operations Research*. – 2016. – Vol. 67. – P. 132-142.
57. Ladj, A. A knowledge-based Digital Shadow for machining industry in a Digital Twin perspective / A. Ladj, Z. Wang, O. Meski, F. Belkadi, M. Ritou, C. Da Cunha // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2021. – Vol. 58. – P. 168-179.
58. Laryukhin, V. The multi-agent approach for developing a cyber-physical system for managing precise farms with digital twins of plants / V. Laryukhin, P. Skobelev, O. Lakhin, S. Grachev, V. Yalovenko, O. Yalovenko // *Cybernetics and Physics*. – 2019. – Vol. 8(4). – P. 257-261.
59. 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.
60. Li, Y. Rescheduling of observing spacecraft using fuzzy neural network and ant colony algorithm / Y. Li, R. Wang, M. Xu // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2014. – Vol. 27(3). – P. 678-687.
61. Liu, X. Multi satellites scheduling algorithm based on task merging mechanism / X. Liu, B. Bai, Y. Chen, Y. Feng // *Applied Mathematics and Computation*. – 2014. – Vol. 230. – P. 687-700.
62. Marik, V. Multi-Agent Technology for Industrial Applications: Barriers and Trends // *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. – IEEE Xplore® Digital Library, 2020. – P. 1980–1987.
63. Merdan, M. Workflow scheduling using multi-agent systems in a dynamically changing environment / M. Merdan, T. Moser, W. Sunindyo, S. Biffel, P. Vrba // *Journal of Simulation*. – 2012. – Vol. 7(3). – P. 144–158.
64. Minhas, S. Ontology Based Environmental Knowledge Management - A System to Support Decisions in Manufacturing Planning // *6th International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development*. – 2014. – P. 397-404.
65. Miyashita, K. Multiagent coordination for controlling complex and unstable manufacturing processes / K. Miyashita, G. Rajesh // *Expert Systems with Applications*. – 2010. – Vol. 37(3). – P. 1836-1845.
66. Орепсус [Электронный ресурс]. URL: <http://www.orencys.com> (дата обращения: 02.02.2021).

67. Panetta, K. Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019 [Электронный ресурс] / K. Panetta. URL: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/> (дата обращения: 02.02.2021).
68. Pinedo, M. Scheduling Theory, Algorithms, and Systems / M. Pinedo. – Springer, 2008. – 672 p.
69. Qi, Q. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison / Q. Qi, F. Tao // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 3585-3593.
70. Rojko, A. Industry 4.0 Concept: Background and Overview / A. Rojko // International Journal of Interactive Mobile Technologies. – 2017. – Vol. 11(5). – P. 77-90.
71. Sandholm, T. Leveled-commitment contracting: a backtracking instrument for multiagent system / T. Sandholm, V. Lesser // AI Magazine. – 2002. – Vol. 23(3). – P. 89-89.
72. Shen, L. A tabu search algorithm for the job shop problem with sequence dependent setup times / L. Shen // Computers and Industrial Engineering. – 2014. – Vol. 78. – P. 95-106.
73. Shen, W. Implementation of genetic algorithms in agent-based manufacturing scheduling systems / W. Shen // Computer-Aided Engineering. – 2002. – Vol. 9(3). – P. 207–218.
74. Shen, Z.M. Digital Twin : What It Is , Why Do It , Related Challenges , and Research Opportunities for Operations Research [Электронный ресурс] / Z.M. Shen, L. Wang, T. Deng. URL: [https://www.researchgate.net/publication/348804775\\_Digital\\_Twin\\_What\\_It\\_Is\\_Why\\_Do\\_It\\_Related\\_Challenges\\_and\\_Research\\_Opportunities\\_for\\_Operations\\_Research](https://www.researchgate.net/publication/348804775_Digital_Twin_What_It_Is_Why_Do_It_Related_Challenges_and_Research_Opportunities_for_Operations_Research) (дата обращения: 02.02.2021).
75. Shoham, Y. Multiagent systems : algorithmic, game-theoretic, and logical foundations / Y. Shoham, K. Leyton-Brown. – Cambridge University Press, 2009. – 483 p.
76. Skobelev, P. Development of models and methods for creating a digital twin of plant within the cyber-physical system for precision farming management / P. Skobelev, I. Mayorov, E. Simonova, O. Goryanin, A. Zhilyaev, A. Tabachinskiy, V. Yalovenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2020.
77. Skobelev, P. Disruptions Are the Norm: Cyber-Physical Multi-agent Systems for Autonomous Real-Time Resource Management / P. Skobelev, D. Trentesaux. – 2017. – P. 287-294.
78. 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.
79. Stanford-Clark, A. What are digital twins? [Электронный ресурс] / A. Stanford-Clark, E. Frank-Schultz, M. Harris. URL: <https://developer.ibm.com/technologies/iot/articles/what-are-digital-twins/>

(дата обращения: 02.02.2021).

80. Suggested Upper Merged Ontology [Электронный ресурс]. URL: <http://www.adampease.org/OP/>  
(дата обращения: 02.02.2021).

81. 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 // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 94. – P. 3563-3576.

82. Towards a Digital Twin for Cyber-Physical Production Systems : A Multi-Paradigm Modeling Approach in the Postal Industry // *Proceedings of the 23rd ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems: Companion Proceedings*. – 2020. – P. 1-7.

83. 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.

84. Valckenaers, P. MAS coordination and control based on stigmergy / P. Valckenaers, Hadeli, B. Saint Germain, P. Verstraete, H. Van Brussel // *Computers in Industry*. – 2007. – Vol. 58(7). – P. 621-629.

85. Vrba, P. Semantic Extension of Agent-Based Control: The Packing Cell Case Study / P. Vrba, M. Radakovič, M. Obitko, V. Mařík. – 2009. – P. 47-60.

86. Wenqi, H. An improved shifting bottleneck procedure for the job shop scheduling problem / H. Wenqi, Y. Aihua // *Computers and Operations Research*. – 2004. – Vol. 31(12). – P. 2093-2110.

87. Wooldridge, M. *An Introduction to Multiagent Systems* / M. Wooldridge. – England: John Wiley and Sons Ltd, 2002. – 348 p.

88. Wooldridge, M. Intelligent agents: Theory and practice / M. Wooldridge, N. Jennings // *The Knowledge Engineering Review*. – 1995. – Vol. 10(2). – P. 115-152.

89. Xhafa, F. Genetic algorithms for satellite scheduling problems / F. Xhafa, J. Sun, A. Barolli, A. Biberaj, L. Barolli // *Mobile Information Systems*. – 2012. – Vol. 8(4). – P. 351-377.

90. Xia, K. A digital twin to train deep reinforcement learning agent for smart manufacturing plants: Environment, interfaces and intelligence / K. Xia, C. Sacco, M. Kirkpatrick, C. Saidy, L. Nguyen, A. Kircaliali, R. Harik // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2021. – Vol. 58. – P. 210-230.

91. Yan, Y. Application of multiagent systems in project management / Y. Yan, T. Kuphal, J. Bode // *International Journal of Production Economics*. – 2000. – Vol. 68(2). – P. 185-197.

92. Zhou, G. Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing / G. Zhou, C. Zhang, Z. Li, K. Ding, C. Wang // International Journal of Production Research. – 2020. – Vol. 58(4). – P. 1034-1051.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРИМЕР ЗАГРУЖАЕМОЙ МОДЕЛИ ПРЕДПРИЯТИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ  
СБОРКИ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ**

Изделия

<b>Ontology</b>	<a href="http://www.kg.ru/tramodel">http://www.kg.ru/tramodel</a>			
<b>TypeUri</b>	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#Product">http://www.kg.ru/manufacture#Product</a>			
uri	<a href="http://www.kg.ru/planning#part">http://www.kg.ru/planning#part</a>	<a href="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#comment">http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#comment</a>	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#ratedPayload">http://www.kg.ru/manufacture#ratedPayload</a>	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#producedBy">http://www.kg.ru/manufacture#producedBy</a>
id	PartNumber	comment	ratedPayload	<a href="#">technologicalProcessId</a>
1	Truck T4	Four tonne electric truck	4000	1

Технологические процессы

<b>Ontology</b>	<a href="http://www.kg.ru/tramodel">http://www.kg.ru/tramodel</a>			
<b>TypeUri</b>	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#ProcessTechnology">http://www.kg.ru/manufacture#ProcessTechnology</a>			
uri	<a href="http://www.kg.ru/planning#number">http://www.kg.ru/planning#number</a>	<a href="http://www.kg.ru/planning#produce">http://www.kg.ru/planning#produce</a>	<a href="http://www.kg.ru/planning#produce">http://www.kg.ru/planning#produce</a>	<a href="#">componentId</a>
id	processNumber	<a href="#">productid</a>		
1	Assembly T4	1		
2	Assembly Battery Module	TP-02	1	

Модели оборудования

<b>Ontology</b>	<a href="http://www.kg.ru/tramodel">http://www.kg.ru/tramodel</a>			
<b>TypeUri</b>	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#EquipmentTool">http://www.kg.ru/manufacture#EquipmentTool</a>			
uri	<a href="http://www.kg.ru/SmartOntologyEditor#shortName">http://www.kg.ru/SmartOntologyEditor#shortName</a>	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#equipmentToolMarkingCode">http://www.kg.ru/manufacture#equipmentToolMarkingCode</a>	<a href="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#comment">http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#comment</a>	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#hasEquipmentToolType">http://www.kg.ru/manufacture#hasEquipmentToolType</a>
id	name	marking	comment	<a href="#">equipmentType</a>
2	CNC-Zimmermann FZ33 VH30	Zimmermann FZ33 VH30	The FZ 33 is ready to perform 3	
3	AGV-Robotnik	Robotnik	Automatic Guided Vehicle w/	1
4	FLT-Doosan B30	Doosan B30	Electric Counterbalance Fork	1
5	Overhead Crane	Overhead Crane IT	Crane can travel the full leng	1
6	Assembly cell	Universal cell		2

## Операции

<b>Ontolo</b>	<a href="http://www.kg.ru/tramodel">http://www.kg.ru/tramodel</a>					
<b>TypeU</b>	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#ProcessTechnologyOperation">http://www.kg.ru/manufacture#ProcessTechnologyOperation</a>					
<b>uri</b>	<b>label</b>	<a href="http://www.kg.ru/planning#nu">http://www.kg.ru/planning#nu</a>	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#hasO">http://www.kg.ru/manufacture#hasO</a>	<a href="http://www.kg.ru/planning#hasParent">http://www.kg.ru/planning#hasParent</a>	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#hasW">http://www.kg.ru/manufacture#hasW</a>	<a href="http://www.kg.ru/planning#dura">http://www.kg.ru/planning#dura</a>
<b>id</b>	<b>name</b>	<b>operationNumb</b>	<b>operationTypeId</b>	<b>technologicalProc</b>	<b>organizationUnitId</b>	<b>duration</b>
1	001 Battery Enclosure	T4.001	1	1	162	5,2
2	002 Front Subframe	T4.002	1	1	162	5,6
3	003 Rear Subframe	T4.003	1	1	162	1,5
4	004 Front Box	T4.004	1	1	162	2
5	005 Rear Box	T4.005	1	1	162	4
6	006 Front Skid Plate	T4.006	1	1	162	3
7	007 Rear Skid Plate	T4.007	1	1	162	5,2
8	008 Front Bumper Structure	T4.008	1	1	162	7,8
9	009 Wheelhouse Structure Front	T4.009	1	1	162	5,6
10	010 Wheelhouse Structure Rear	T4.010	1	1	162	6
11	011 Front Body Panel	T4.011	1	1	162	8
12	012 Interior Dash	T4.012	1	1	162	5
13	013 Center Display	T4.013	1	1	162	6,7
14	014 Steering Wheel	T4.014	1	1	162	7
15	015 Wheelhouse Plastic Cover (LH)	T4.015	1	1	162	7,3
16	016 Wheelhouse Plastic Cover (RH)	T4.016	1	1	162	7,5
17	017 Cabin Floor Cover (Rubber)	T4.017	1	1	162	5,1
18	018 Seat (LH)	T4.018	1	1	162	3
19	019 Seat (RH)	T4.019	1	1	162	3
20	020 Bodyside Left (includes cabin inter	T4.020	1	1	162	8
21	021 Bodyside Right (includes cabin inte	T4.021	1	1	162	6
22	022 Bulkhead Trim	T4.022	1	1	162	9
23	023 Cargo Wall (LH)	T4.023	1	1	162	5,6
24	024 Cargo Wall Content LH (e.g Shelves	T4.024	1	1	162	8,4
25	025 Cargo Wall (RH)	T4.025	1	1	162	10
26	026 Cargo Wall Content RH (e.g Shelve	T4.026	1	1	162	10,5
27	027 Cargo Floor Cover (Rubber)	T4.027	1	1	162	10
28	028 Roof Panel (includes interior pane	T4.028	1	1	162	7,6
29	029 Rear Body Panel	T4.029	1	1	162	6
30	030 Rear Doors	T4.030	1	1	162	5
31	031 Rear Body Hoop (includes lights)	T4.031	1	1	162	5
32	032 Side Door (LH) includes interior pa	T4.032	1	1	162	9
33	033 Side Door (RH) includes interior pa	T4.033	1	1	162	4,2
34	034 Side Body Cover (LH)	T4.034	1	1	162	1
35	035 Side Body Cover (RH)	T4.035	1	1	162	1,2
36	036 Front Bumper Panel	T4.036	1	1	162	3
37	037 Front Valence	T4.037	1	1	162	6
38	038 Side Valence (LH)	T4.038	1	1	162	3
39	039 Side Valence (RH)	T4.039	1	1	162	3
40	040 Rear Valence	T4.040	1	1	162	3
41	041 Door Hinge Cover (LH)	T4.041	1	1	162	4,2
42	042 Door Hinge Cover (RH)	T4.042	1	1	162	4,3
43	043 Wiper Cover + Wipers	T4.043	1	1	162	3,6
44	044 Windshield Glass	T4.044	1	1	162	5,3
45	045 Door Glass (LH)	T4.045	1	1	162	5,1
46	046 Door Glass RH)	T4.046	1	1	162	4,3
47	047 Panel cutting	BM.047	26	2	160	3
48	048 Battery box assembly	BM.048	9	2	161	5
49	049 Battery modules installation	BM.049	1	2	161	2
50	050 Final assembly	BM.050	1	2	161	2



### Типы насадок для роботов-манипуляторов

<b>OntologyUri</b>	<a href="http://www.kg.ru/tramodel">http://www.kg.ru/tramodel</a>
<b>TypeUri</b>	<a href="http://www.kg.ru/robotic#gripperType">http://www.kg.ru/robotic#gripperType</a>
uri	label
id	label
1	Centric gripper
2	Angular gripper
3	Magnetic gripper
4	Gripper swivel module
5	Four-Finger gripper
6	Ring Gripper
c	Vacuum Gripper

### Требования к оборудованию

<b>Ontology</b>	<a href="http://www.kg.ru/tramodel">http://www.kg.ru/tramodel</a>		
<b>TypeUri</b>	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#EquipmentToolDescriptor">http://www.kg.ru/manufacture#EquipmentToolDescriptor</a>		
uri	label	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#hasEquipmentTool">http://www.kg.ru/manufacture#hasEquipmentTool</a>	<a href="http://www.kg.ru/planning#quantity">http://www.kg.ru/planning#quantity</a>
id		<a href="http://www.kg.ru/manufacture#equipmentModel">equipmentModel</a>	quantity
1	Zimmermann FZ33 VH30, count=1	2	1
2	AGV-Robotnik, count=1	3	1
3	AGV-Robotnik, count=1	3	1
8	AGV-Robotnik, count=1	3	1
9	AGV-Robotnik, count=1	3	1
10	AGV-Robotnik, count=1	3	1
11	FLT-Doosan B30, count=1	4	1
12	FLT-Doosan B30, count=1	4	1
13	FLT-Doosan B30, count=1	4	1
17	FLT-Doosan B30, count=1	4	1
18	Overhead Crane, count=1	5	1
19	Overhead Crane, count=1	5	1
20	Overhead Crane, count=1	5	1
21	Overhead Crane, count=1	5	1
22	Overhead Crane, count=1	5	1
23	Overhead Crane, count=1	5	1
24	Assembly cell, count=1	6	1

### Требования к сотрудникам

<b>Ontology</b>	<a href="http://www.kg.ru/tramodel">http://www.kg.ru/tramodel</a>		
<b>TypeUri</b>	<a href="http://www.kg.ru/manufacture#PerformerDescriptor">http://www.kg.ru/manufacture#PerformerDescriptor</a>		
uri	label	<a href="http://www.kg.ru/planning#quantity">http://www.kg.ru/planning#quantity</a>	<a href="http://www.kg.ru/planning#hasDepartment">http://www.kg.ru/planning#hasDepartment</a>
id	label	quantity	<a href="http://www.kg.ru/planning#organizationUnitId">organizationUnitId</a>
1	Supervisor, 1 person	1	162
2	Supervisor, 1 person	1	162
3	Supervisor, 1 person	1	162
4	Assembly worker, rank 3, 1 person	1	162
5	Assembly worker, rank 4, 1 person	1	162
6	Assembly worker, rank 4, 1 person	1	162
7	Assembly worker, rank 4, 1 person	1	162
8	Assembly worker, rank 4, 1 person	1	162
9	Driver, 1 person	1	162
10	Driver, 1 person	1	162

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ  
ПРОГРАММЫ НА ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018616197

Мультиагентная система оперативного планирования  
ресурсов (Operational Planner)

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью  
«Научно-производственная компания «Разумные решения» (RU)*

Авторы: *Жилиев Алексей Александрович (RU),  
Скобелев Петр Олегович (RU)*



Заявка № 2018613218

Дата поступления 04 апреля 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 мая 2018 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

**ПРИЛОЖЕНИЕ В. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ  
ПРОГРАММЫ НА ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2015662453**

**Интеллектуальная сервис-ориентированная платформа  
динамического планирования задач на малых космических  
аппаратах для предоставления услуг по запросу  
пользователей в реальном времени**

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью  
«Научно-производственная компания «Разумные решения» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № **2015619635**

Дата поступления **12 октября 2015 г.**

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **25 ноября 2015 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивлиев*



Авторы: *Травин Виталий Сергеевич (RU), Скобелев Петр Олегович (RU), Жиляев Алексей Александрович (RU), Мирошников Даниил Юрьевич (RU), Мишутин Дмитрий Евгеньевич (RU), Павлова Дарья Викторовна (RU), Новиков Денис Андреевич (RU)*

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЖИЛЯЕВА А.А. В УЧЕБНОМ  
ПРОЦЕССЕ САМАРСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

/Гаврилов А.В.

« 10 » марта 2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования по теме «Методы и средства построения «цифровых двойников» процессов управления предприятиями на основе онтологий и мультиагентных технологий», выполненного на кафедре конструкции и проектирования летательных аппаратов, внедрены в учебный процесс на межвузовской кафедре космических исследований на основании решения кафедры (протокол № 6 от «10» марта 2021 г.).

Указанные результаты включены в курс «Современные технологии навигации и управления в космосе», направления подготовки 24.04.01 Ракетные комплексы и космонавтика по профилю «Перспективные космические технологии и эксперименты в космосе».

Заведующий кафедрой

И.В. Белоконов /Белоконов И.В.  
« 11 » марта 2021 г.

Соискатель ученой степени

А.А. Жильев /Жильев А.А.  
« 11 » марта 2021 г.

/ Начальник методического отдела  
учебно-методического управления  
к.т.н., доцент

Р.А. Вдовин /Вдовин Р.А.  
« 22 » марта 2021 г.

/ Начальник отдела сопровождения  
научных исследований  
к.т.н., доцент

Л.В. Родионов /Родионов Л.В.  
« 22 » марта 2021 г.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЖИЛЯЕВА А.А.  
В ООО «НПК «РАЗУМНЫЕ РЕШЕНИЯ»**

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
ООО «НПК «Разумные решения»

\_\_\_\_\_  
О.И. Лахин

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_  
2021 г.

**АКТ О ВНЕДРЕНИИ**

результатов диссертационной работы Жилиева Алексея Александровича  
«Методы и средства построения “цифровых двойников” процессов управления предприятиями  
на основе онтологий и мультиагентных технологий»

**Комиссия в составе:**

Председатель

Лахин О.И. – генеральный директор ООО «НПК «Разумные решения»;

**Члены комиссии:**

Симонова Е.В. – ведущий аналитик ООО «НПК «Разумные решения»;

Рыбак Д.С. – директор центра разработок ООО «НПК «Разумные решения»;

составили настоящий акт о том, что при разработке в ООО «НПК «Разумные решения» интеллектуальных систем управления производством самолета МС-21 для ПАО «Иркут», управления сборкой грузовых электромобилей с применением робототехнических комплексов для компании «ТРА», управления бурением нефтяных скважин для компании «Газпромнефть-Ямал», а также управления сельскохозяйственным предприятием точного земледелия на основе «цифрового двойника» растений для ОАО «Рассвет» были использованы следующие результаты диссертационной работы Жилиева А.А. «Методы и средства построения “цифровых двойников” процессов управления предприятиями на основе онтологий и мультиагентных технологий»:

- 1) базовая онтология управления ресурсами и метод построения онтологической модели цифровых двойников предприятия для решения задач управления ресурсами;
- 2) расширенная модель и методы взаимодействия агентов в ПВ-сети;
- 3) инструментальные средства построения интеллектуальных кибер-физических систем управления ресурсами предприятий на основе онтологий и мультиагентных технологий.

Председатель комиссии:

Члены комиссии:



Лахин О.И.

Симонова Е.В.

Рыбак Д.С.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Е. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЖИЛЯЕВА А.А.  
В ООО «НПК «СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ»**

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ООО «НПК «Сетецентрические  
платформы»  
А.Н. Мочалкин  
\_\_\_\_\_ 2021 г.



**АКТ О ВНЕДРЕНИИ**

результатов диссертационной работы Жилиева Алексея Александровича  
«Методы и средства построения “цифровых двойников” процессов управления предприятиями  
на основе онтологий и мультиагентных технологий»

**Комиссия в составе:**

Председатель

Мочалкин А.Н. – генеральный директор ООО «НПК «Сетецентрические платформы»;

**Члены комиссии:**

Пантелей Е.А. – ведущий аналитик ООО «НПК «Сетецентрические платформы»;

Новичков Д.Е. – ведущий программист ООО «НПК «Сетецентрические платформы»;

составили настоящий акт о том, что при разработке в ООО «НПК «Сетецентрические платформы» интеллектуальных систем управления группировкой космических аппаратов для предприятия «СТТ Групп» и управления ресурсами инфраструктуры ЦУП-ЦНИИМАШ были использованы следующие результаты диссертационной работы Жилиева А.А. «Методы и средства построения “цифровых двойников” процессов управления предприятиями на основе онтологий и мультиагентных технологий»:

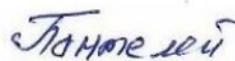
- 1) базовая онтология управления ресурсами и метод построения онтологической модели цифровых двойников предприятия для решения задач управления ресурсами;
- 2) расширенная модель и методы взаимодействия агентов в ПВ-сети;
- 3) инструментальные средства построения интеллектуальных кибер-физических систем управления ресурсами предприятий на основе онтологий и мультиагентных технологий.

Председатель комиссии:



Мочалкин А.Н.

Члены комиссии:



Пантелей Е.А.



Новичков Д.Е.