

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем управления сложными системами
Российской академии наук»

На правах рукописи

Майоров Игорь Владимирович

**МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (промышленность)

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

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Скобелев Петр Олегович

Самара – 2017

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ПРОБЛЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	15
1.1 Задача управления ресурсами современных предприятий	15
1.2 Примеры типовых задач управления ресурсами и их особенности	18
1.3 Классические методы планирования ресурсов	28
1.4 Эвристические методы.....	29
1.5 Мультиагентные системы.....	34
1.6 Анализ существующих систем управления ресурсами.....	39
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	43
2 СИТУАЦИОННЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ РЕСУРСАМИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ	45
2.1 Ситуативное управление и модель ситуации	45
2.2 Формализация постановки задачи планирования ресурсов.....	46
2.3 Модель виртуального рынка сети потребностей и возможностей при мультиагентном планировании ресурсов	48
Агенты ПВ-сети взаимодействуют путем переговоров в сцене мира,.....	51
2.3.1 Функции удовлетворенности агентов	52
2.3.2 Функции бонусов и штрафов	54
2.4 Адаптивное планирование оперативного распределения производственных ресурсов	56
2.4.1 Микроэкономика 1-го и 2-го уровня.....	57
2.4.2 Модель фиксированной стоимости ресурсов.....	58
2.4.2.1 Алгоритм бесконфликтного планирования в модели фиксированной стоимости ресурсов.....	59
2.4.2.2 Проактивность со стороны задач.....	60
2.4.2.3 Проактивность со стороны ресурсов.....	61
2.4.3 Разделяемая стоимость слотов времени	62
2.4.3.1 Алгоритм бесконфликтного планирования в модели разделяемой стоимости	64
2.4.3.2 Проактивное перераспределение затрат в модели разделяемой стоимости.....	64
2.5 Метод «узкого звена» построения расписаний	66

2.5.1	Краткое описание сущности метода «узкого звена»	66
2.5.2	Стадия предварительного планирования.....	72
2.5.3	Стадия проактивности. Метод компенсаций	73
2.5.4	Многокритериальный метод компенсаций	75
2.5.5	Реакция на непредвиденные события	80
2.6	Методы разрешения конфликтов при планировании ресурсов.....	81
2.6.1	Уход от конфликтов («обтекание»).....	84
2.6.2	Сброс мешающей задачи из расписания.....	86
2.6.3	Компенсация сдвига мешающей задачи	89
2.6.4	Увеличение производительности ресурсов при невозможности компенсации.....	90
2.6.5	Делимость ресурсов для задач	92
2.6.6	Дробление поступающих и запланированных задач.....	94
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2		97
3.1	Требования к разработке мультиагентной платформы	98
3.2	Обзор существующих мультиагентных платформ	99
3.3	Архитектура мультиагентной платформы.....	100
3.3.1	Принципы функционирования платформы.....	101
3.3.2	Особенности архитектуры.....	104
3.4	Средства для функционирования агентов в распределенной среде	106
3.5	Компоненты пользовательского интерфейса	116
3.6	Технология создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени.....	118
3.7	Экспериментальные исследования планирования в мультиагентной платформе	119
3.7.1	Планирование задач в платформе	120
3.7.2	Моделирование потока задач.....	121
3.7.3	Влияние сложности задач на качество и время планирования .	124
3.7.4	Качество планирования МА платформы в логистических задачах	126
3.7.5	Оценка степени адаптивности мультиагентной системы	128
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3		133

4 ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ.....	136
4.1 Мультиагентная система производственного планирования Smart Factory.....	136
4.2 Интеллектуальная система Smart Projects оперативного управления ресурсами в проектах.....	142
4.3 Мультиагентная система для построения расписания полетов и грузоперевозок для Международной космической станции.....	147
4.4 Мультиагентная система управления грузоперевозками Smart Trucks.....	149
4.5 Интеллектуальная система управления цепочками поставок товаров Smart Supply Chain.....	152
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	158
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	160
ЛИТЕРАТУРА.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ.....	178
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ МАЙОРОВА И.В. В РКК «ЭНЕРГИЯ».	179
ПРИЛОЖЕНИЕ В. РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЕ ПИСЬМО ООО «ТЕХНО ТРАНС» О ВНЕДРЕНИИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОПЕРЕВОЗКАМИ.....	181
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ МАЙОРОВА И.В. ООО «НПК «РАЗУМНЫЕ РЕШЕНИЯ».....	182
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ «SMART FACTORY» НА ОАО «КУЗНЕЦОВ».....	184
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ МАЙОРОВА И.В. В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ САМАРСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.....	188
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ МАЙОРОВА И.В. В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ.....	189

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Управление ресурсами предприятий в реальном времени – сложная научная проблема, практическое решение которой, как показывает практика, позволяет на 15-25% поднять эффективность за счет устранения дефицита или простоя ресурсов, например, при решении задач управления инженерами КБ в проектах НИОКР, сменно-суточными заданиями для рабочих, мобильными бригадами газовиков и энергетиков, цепочками поставок товаров и т.п.

Математическое решение этой проблемы для задач логистики началось в середине 20-го века, что привело к созданию исследования операций как новой научной дисциплины, ориентированной на решение задач распределения, планирования и оптимизации ресурсов. Разработанные методы линейного и динамического программирования позволили формализовать постановку и добиться эффективного решения ряда практических задач, в особенности, в связи с быстрым ростом мощности компьютеров. Однако, с ростом сложности и размерности этих задач начали возникать и различные серьезные трудности, связанные с комбинаторным подходом, быстрым нарастанием сложности вычислений (NP-Hard), невозможностью учитывать индивидуальные особенности заказов и ресурсов и т.д.

В ответ начали появляться эвристические и мета-эвристические подходы, которые за счет различных рациональных методов принятия решений позволяют избегать комбинаторного взрыва: жадные алгоритмы, табу-поиск, метод имитации отжига, генетические алгоритмы, муравьиная оптимизация и т.п. В современных системах одновременно могут работать даже несколько таких разных алгоритмов, соревнуясь между собой.

Как классические, так и эвристические методы доступны в ряде весьма дорогостоящих зарубежных пакетов программ, таких как IBM ILOG CPLEX

Optimizer, Xpress Optimizer, MOSEK, Gurobi Optimizer, Knitro и ряде других, области применения которых на практике по ряду причин остаются крайне узкими и результативность использования низкой.

Однако, с ростом сложности и размерности этих задач, а также все чаще возникающими потребностями в оперативном управлении ресурсами использование классических методов встречает серьезные трудности в связи с быстрым нарастанием сложности вычислений, невозможностью учитывать индивидуальные особенности заказов и ресурсов и работать по событиям в адаптивном режиме. Эти трудности остаются характерными и для известных эвристических подходов, направленных на поиск допустимого решения: жадных алгоритмов локального поиска, генетических алгоритмов, муравьиной оптимизации и т.п. Кроме того, до сих пор считается, что все расчеты должны делаться в центральном компьютере, куда поступают все данные и где сосредоточены все сведения о ситуации на предприятии, заказы и ресурсы заданы наперед и не меняются в ходе работы, обработка должна вестись в пакетном режиме, имеется лишь одна целевая функция, обычно отражающая интересы только центра (собственника), долгий счет вариантов (десятки часов) вполне приемлем, ограничения задаются только в виде неравенств и не могут быть заданы таблично, в виде правил или алгоритмически.

А на практике все происходит совершенно иначе: порождаемые «оптимальные планы», построенные в вычислительном центре крупного завода оказываются уже на уровне цехов этого предприятия нежизнеспособными и должны вручную «доводиться» на рабочих местах с участием мастеров и даже рабочих из-за того, что не все особенности ситуации были учтены или эта ситуация уже поменялась. Классический пример такого рода проблем и успешного «ручного» решения такой задачи дается в модели Родова [1], внедренной в Новочеркасском тепловозном заводе в 1964 году (ближайший аналог производственной системы Тойоты [2]).

При этом и сами критерии, предпочтения и ограничения могут также меняться в ходе работы, например, сначала важна прибыль, а потом приоритет дается важному клиенту или загрузке для выплат зарплаты рабочим. По указанным причинам сферы применения существующих методов и средств на практике пока остаются крайне ограниченными.

В этой связи в последнее время все больше работ посвящено разработке интеллектуальных систем управления ресурсами, моделирующих процесс поиска согласованных решений специалистами. В работах М. Вулдриджа (M. Wooldridge), П. Валкенаерса (P. Valckenaers), В.И. Городецкого, П. Летао (P. Leitaо), Н. Дженнинга (N. Jennings) и Г.А. Ржевского (G. Rzevski) показывается, что такого рода сложные задачи могут эффективно решаться на основе мультиагентных технологий. Современные подходы к управлению ресурсами, которые могут быть реализованы на основе мультиагентных технологий, предлагаются в работах В.Н. Буркова, И.А. Каляева, М.В. Губко, П.Ю. Чеботарева, Д.А. Новикова, А.Л. Фрадкова, А.Н. Швецова, О.Н. Граничина, В.А. Виттиха, М. Pinedo. Растет число работ, посвященных разработке методов распределенного решения сложных задач (Distributed problem solving), в которых задача разделяется на ряд автономно рассматриваемых агентами подзадач, частные решения которых затем объединяются – труды А. Месселса (A. Meisels), А. Петсу (A. Petcu), М. Йокко (M. Yokoo) и ряда других авторов.

Кроме того, построенные производственные планы часто устаревают уже в ходе своего построения и должны постоянно корректироваться из-за непредвиденных событий, к числу которых относятся появление нового важного заказа, поломка ресурсов, изменение важности (приоритета) заказа, поступление материалов раньше или позже назначенных сроков и т.д.

В этих условиях в последнее время все более широкое применение начали находить методы распределенного решения задач (Distributed problem solving), в

которых сложная задача разделяется на ряд автономно рассматриваемых задач, частные решения которых затем некоторым образом объединяются на стыках. Важный шаг в этом направлении был сделан в последнее десятилетие с развитием мультиагентных технологий, в которых решение любой сложной задачи рассматривается как поиск баланса интересов множества конкурирующих и кооперирующихся агентов, каждый из которых «оптимизирует» определенный набор факторов, например, заказов и ресурсов.

Получает развитие концепция Умного интернета вещей (Smart Internet of Things, Smart IoT) на основе использования баз знаний, мультиагентных технологий и других современных интеллектуальных информационных технологий. Умный интернет вещей предполагает создание в виртуальном мире в «облаке» (на Интернет сервере) интеллектуальных агентов объектов реального мира, которые могут воспринимать информацию из реального мира, принимать решения и согласовывать эти решения с другими объектами или пользователями в реальном времени. При этом сами умные вещи могут работать автономно или быть частями более сложных объектов (домашние вещи, гибкая производственная линия, группировка беспилотных самолетов и другие). В будущем интеллектуальные агенты вещей могут быть встроены в сами вещи (Embedded systems), для чего требуются датчики, компьютер, средства коммуникации и исполнительные механизмы.

Успешные примеры разработок в мультиагентных системах были связаны с моделями сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей) и методом сопряженных взаимодействий для управления ресурсами в реальном времени (танкеры, такси, аренда машин и т.д.), развитых в трудах В.А. Виттиха и П. О. Скобелева. Этот подход позволяет совершенно с новой стороны единым образом рассмотреть различные процессы решения сложных многокритериальных задач управления ресурсами любой природы (статичных или движущихся, разделяемых, восполнимых и т.п.) как процесс

самоорганизации с выявлением и разрешением конфликтов между агентами путем переговоров с уступками для достижения ими согласия (консенсуса).

В этой связи возникает задача разработки типовых моделей, методов и алгоритмов самоорганизации для решения различных по своей природе задач управления ресурсами, для которых до настоящего момента не было создано единых подходов, а также построения программной платформы, которая могла бы быть применима для создания самого широкого спектра интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени с низкой трудоемкостью, сроками и стоимостью создания, поддержки и владения, которая в особенности становится актуальной и значимой в условиях мирового экономического кризиса и требований импортозамещения.

Цель и задачи исследования. Целью является разработка моделей и методов, а также программной платформы и технологии ситуационного управления ресурсами для построения интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени в условиях неопределенности.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) провести системный анализ и выявить особенности решения современных задач управления ресурсами на предприятиях;
- 2) формализовать постановку задачи ситуационного управления ресурсами для ПВ-сетей на основе поиска баланса интересов агентов (консенсуса), представляющих различных участников;
- 3) развить модель виртуального рынка для управления процессом планирования в условиях неопределенности – при поступлении потока заказов и других событий;
- 4) разработать метод ситуационного управления ресурсами, расширив базовые классы агентов ПВ-сети и протоколы разрешения конфликтов;
- 5) разработать архитектуру платформы и технологию ситуационного управления ресурсами в реальном времени;

- б) создать прототипы интеллектуальных систем управления ресурсами для различных областей применений и оценить их эффективность.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются процессы управления ресурсами для повышения эффективности деятельности предприятий. Предметом исследования являются модели, методы и средства ситуационного управления ресурсами предприятий в реальном времени.

Методы исследования. В качестве методологической основы решения указанных задач в диссертационной работе использовалась теория расписаний, метод сопряженных взаимодействий в ПВ-сетях, методы системного анализа, методы исследования операций и дискретной оптимизации. Для подтверждения полученных теоретических результатов применялись методы экспериментальных исследований совместно с методами математического и имитационного моделирования.

Достоверность результатов обеспечивается применением методологии системного анализа и исследования операций, сравнением результатов исследований с результатами планирования производственных задач при использовании традиционных методов и средств, практическим применением разработанной мультиагентной платформы в производственном планировании цехов, мобильных бригад, управлении грузоперевозками, проектами, цепочками поставок и ряде других приложений.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

- 1) показана ситуативная природа процессов управления ресурсами для современных предприятий, в которых состав и важность критериев принятия решений может меняться в ходе повседневной деятельности;
- 2) предложен ситуационный подход к решению задачи управления ресурсами предприятий на основе мультиагентных технологий, при котором

построение расписания рассматривается как процесс самоорганизации агентов ПВ-сети, стремящихся достигнуть баланс интересов (консенсуса);

3) усовершенствована модель ПВ-сети и виртуального рынка мультиагентной системы, позволяющая расширить области применения и управлять качеством и эффективностью решения задач управления ресурсами;

4) разработан метод «узкого звена» для ситуационного управления ресурсами, связанный с выявлением агентов с наихудшими показателями в расписании и их точечным итерационным разрешением, позволяющий принимать решения по ходу развития ситуации для каждого заказа или ресурса и интерактивно достраивать получаемые планы использования ресурсов с участием пользователей – лиц, принимающих решения;

5) разработаны архитектура, технология и прототип мультиагентной платформы для ситуационного управления ресурсами в реальном времени;

6) предложен метод оценки степени адаптивности мультиагентных систем управления ресурсами.

Практическая значимость:

1. Разработанные модели, методы и алгоритмы взаимодействий агентов позволяют решать широкий круг прикладных задач по ситуационному управлению ресурсами в реальном времени в условиях неопределенности.

2. Мультиагентная платформа для создания интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий позволяет снижать трудоемкость разработки, повышать качество и сокращать сроки и стоимость внедрения и сопровождения таких систем.

3. На основе платформы разработан ряд интеллектуальных систем для управления грузовыми перевозками и мобильными бригадами, цехами промышленных предприятий, цепочками поставок и др.

4. Результаты внедрений показывают прирост эффективности использования ресурсов за счет перехода к реальному времени на 15-25%.

Положения, выносимые на защиту:

1) расширенная модель виртуального рынка агентов ПВ-сети для ситуационного управления ресурсами в реальном времени;

2) метод ситуационного управления ресурсами для предприятий, работающих в условиях изменений спроса и предложения;

3) мультиагентная программная платформа и технология построения интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени.

Научная значимость исследований заключается в развитии методов адаптивного планирования в реальном времени на основе мультиагентных технологий в применении к системам производственного планирования.

Личный вклад автора:

1. Расширение класса базовых агентов в сетях потребностей и возможностей (ПВ-сети) и протоколов их взаимодействия, основанных на применении функций удовлетворенности агентов и штраф-бонусных функций, а также двухуровневой микроэкономики виртуального рынка.

2. Разработка метода «узкого звена» для применения в распределенных системах ситуационного управления ресурсами в реальном времени.

3. Предложена оценка степени адаптивности мультиагентных систем планирования ресурсов.

4. Разработка архитектуры и основных классов мультиагентной платформы планирования.

5. Разработка прототипов промышленных интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени для управления проектами и цехами машиностроительных предприятий, управления грузопотоком

Международной космической станции, цепочками поставок и грузовыми перевозками.

Реализация результатов работы. Результаты использованы при создании интеллектуальных систем управления в аэрокосмических приложениях, на машиностроительных предприятиях, в управлении проектами, в цепочках поставок и в грузовых перевозках. Имеются акты внедрения научных результатов в ПАО «РКК «Энергия» и в ООО «НПК «Разумные решения». Результаты работы были использованы в НИР «Разработка и исследование моделей, методов и алгоритмов построения планов сменно-суточных заданий при производстве продукции в условиях неопределенности и высокой динамики изменений производственной обстановки» в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., выполнявшейся в ИПУ РАН и ИПУСС РАН, а также в работах по гранту РФФИ 16-01-00759 «Теоретические основы создания эмерджентного интеллекта для решения сложных задач управления ресурсами». Получено свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №: 2013617616 от 20 августа 2013 года «Мультиагентная система моделирования производственных процессов». Результаты разработок используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в лекционном курсе и лабораторном практикуме по дисциплине «Методология управления» и в учебном процессе Самарского университета в курсе «Онтология производственной сферы» для подготовки бакалавров по направлению 15.03.04.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на Международной конференции по сложным системам (International Conference on Complex Systems in Business, Administration, Science and Engineering, 12-14 May 2015, New Forest, UK), на XVII (22-25 июня 2015 г.), XVI (30 июня-3 июля 2014 г.) Международных конференциях «Проблемы

управления и моделирования в сложных системах», Самара, XII Всероссийском совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16 – 19 июня 2014 г., на 12-й Международной конференции по практическому применению агентов и мультиагентных систем (12th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, PAAMS 2014, 4-6 June, 2014, Salamanca, Spain), на 6-й Международной конференции по применению эволюционных вычислений, Рим, Италия (6th International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications (ECTA 2014), October 22-24 2014, Rome, Italy).

Основные публикации. Результаты диссертации опубликованы в 30 работах, из них 9 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК, 21 работа в трудах международных и всероссийских конференций, в том числе 6 в изданиях, индексируемых в Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 138 источников. Текст занимает 177 страниц основной части, содержит 64 рисунка, 21 таблицу и 7 приложений объемом 12 страниц.

1 ПРОБЛЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

1.1 Задача управления ресурсами современных предприятий

Развитие современных производств, их усложнение и межотраслевая интегрированность, ставят новые задачи по повышению эффективности производственной деятельности [1-2].

Современные промышленные предприятия и необходимые им транспортно-логистические сети характеризуются следующими особенностями:

- растет разнообразие заказов предприятий как в качестве создания новых видов продукции, так и услуг;
- осуществляется модернизация производства, заменяется станочный парк, меняются технологии, рабочие специальности и т.д.;
- внедряются новые инновационные технологии производства и предоставления услуг;
- требуется все более индивидуальный подход к каждому заказчику, заказу, процессу, рабочему;
- требуется поддержка постоянных изменений в конфигурациях изделий для удовлетворения требований клиентов и спроса на продукцию;
- идет переориентация на позаказное производство;
- все разнообразнее изделия, станки и квалификация рабочих;
- все больше необходимость в переходе к рыночным отношениям и мотивации менеджеров, мастеров и рабочих;
- необходимость экономного использования ресурсов, снижения цен и повышения эффективности для собственника;
- применение принципов бережливого производства.

Для того чтобы удовлетворить этим требованиям, необходимо оперативно, гибко и эффективно управлять ресурсами в реальном времени, чтобы с опережением исключать простой или дефицит ресурсов.

В этих целях производственные системы перестают быть централизованными и монолитными и становятся все более распределенными, в них постоянно сокращается время от принятия решений – до вывода новых продуктов на рынок.

Возрастающая сложность таких систем, требующая обработки десятков тысяч переменных, связанных с номенклатурой выпускаемых изделий, десятки и сотни показателей, характеризующих производственную деятельность, многочисленные информационные потоки от различных смежных предприятий требуют новых подходов к разработке систем управления. Быстро меняющиеся условия, в которых протекает производственная деятельность, наличие колебания цен на ресурсы, оперативная замена поставщиков, учет изменений в оборудовании приводит к неопределенностям – всё это требует, чтобы создаваемые системы работали в реальном времени.

Современное состояние области автоматизации планирования и моделирования производственных процессов характеризуется применением классических средств оптимизации на основе методов линейного и динамического программирования, а также специализированных эвристик генетического, нейросетевого и других подходов, которые во многом ограничивают переход современных предприятий к реальному времени.

Задачи планирования ресурсов в реальном времени в новых изменившихся экономических условиях выдвигают новые подходы к управлению [3,4], к разработке моделей и методов [5,6] и новых инструментальных средств [7].

Существующие системы управления и планирования производственными ресурсами (SAP, Oracle, Microsoft Dynamics AX, Infor ERP, Галактика и др.) ориентируются на применение пакетных методов, когда большинство заказов на

работы и их характеристики известны заранее и требуется составить расписание на определенный период вперед, что как правило делает создаваемый план плохо реализуемым под действием всевозможных непредвиденных событий, например, приход нового заказа, выход из строя оборудования, изменения доступности ресурсов и т.д.

Развитие новых методов требует преодоления принципиальных недостатков централизованного планирования – сложности учета многочисленных факторов, отсутствия достоверной информации о текущей ситуации, потери адекватности расписаний с течением времени и т.д. Современные производственные системы обладают слишком высокой сложностью, состоят из десятков и сотен пространственно-распределенных подсистем, текущее состояние которых в каждый момент зависит от множества внутренних факторов [8].

С другой стороны, внешние взаимодействия – изменения в потоках заказов и их характеристик, цен на ресурсы и путей снабжения, цепочек поставок, не учтенные в первоначальном плане, также приводят к относительно быстрой потере пригодности первоначального расписания.

Это относится к любым системам – от управления цепочками поставок и производственных предприятий – до вычислительных систем [9].

Поэтому задача управления ресурсами может рассматриваться как задача многокритериального распределения, планирования, оптимизации и контроля ресурсов с заданными предпочтениями и ограничениями каждого участника, субъекта или объекта данных процессов. При этом такая задача должна рассматриваться как динамическая и ситуационная, поскольку поток заказов изменяется во времени, сами требования и характеристики ресурсов изменяются по ситуации, поэтому в системе должен строиться план, учитывающий возможность изменения параметров заказов и ресурсов.

Это означает, в первую очередь, своевременную, быструю и гибкую реакцию на события, например, на поступление нового заказа, на задержку изготовления деталей и сборочных единиц, поломку или ремонт станка и т.д.

1.2 Примеры типовых задач управления ресурсами и их особенности

Современные производственные системы характеризуются значительной сложностью, связанной со структурой, компонентами, целями производства, связями с поставщиками, окружающей средой и т.д. Их возможности по производственной деятельности обуславливаются, в том числе, методами и средствами управления ресурсами, используемыми в производственной и коммерческой деятельности.

В качестве примеров характерных задач управления ресурсами для дальнейшего анализа были выбраны следующие:

1. Управление грузоперевозками характеризуется следующими типичными значениями: 500 грузовиков в рейсах, 100 заказов в день, горизонт около 1-5 дней, 600 точек развозки, время на заказ 15 сек, критерии – прибыль, качество, стоимость, время перевозки и риски, равномерность пробега машин, режимы работы водителей, штрафы за опоздание, типы грузов и тары, время работы складов, времена стыковок и др.
2. Управление на предприятии по сборке двигателей – 50 тыс. деталей, 30-40 цехов, каждый цех – 150 рабочих, каждое изделие – от 10 до 300 технологических операций, одно сменно-суточное задание рабочего – до 100 задач, горизонт – от дня до 6 месяцев, число задач на горизонте – до 150 тыс., время реакции на событие – от 2 сек до 5 мин. Особенности планирования заключаются в учете техпроцессов, умений рабочих, брака, наличия деталей на складе и т.д.
3. Управление цепочками поставок – до 10 тыс. товаров, 2 тыс. узлов в сети (фабрики, магазины, склады), 1 тыс. каналов доставки, 2 тыс. заказов в

- день, горизонт – от 1 мес. до 1 года; обработка 1 события – от 20 сек. до 15 мин., учет прогнозов продажи, емкость каналов, скорость продажи, цены заказов, штрафы за отклонение, стоимости производства, транспорта, хранения, структура сети, минимальный объем партии и др.
4. Управление мобильными бригадами – число событий в день от 50 до 250 заявок, число ресурсов – 50 бригад; горизонт планирования соответствует смене (8-12 часов); время на события – до 1 минуты, критерии – минимальный пробег транспорта, максимизация количества выполненных заявок.
 5. Управление грузопотоком Международной космической станции – 3500-7000 типов грузов, 4 корабля «Союз» и 4 «Прогресс» в год, 2-5 европейских и американских, загрузка одного «Прогресса» – тысячи наименований грузов. Необходим учет состав экспедиций, типов грузов и их взаимозаменяемость, нормы потребления грузов на МКС и т.д. Долгосрочная программа рассчитывается на 3 года, программа полета и грузопоток – на год, номинальный план полета – на 2 экспедиции за полгода.
 6. Управление железнодорожным полигоном. На полигоне Московский 49 станций, 48 перегонов (2-4-х путные), блок-участков – 3500, около 800 поездов в день, горизонт – сутки. В день может происходить до 50 различных событий: окна ремонтов, поломки путей и т.д. Обработка события – до 3 минут. План поезда – 40-50 крупных операций. Ограничения – соблюдение времен хода и продолжительности стоянок, интервалов движения, приоритетов поездов, времен разгона и торможения, опасности грузов и др.
 7. Управление проектами. Средняя организация (100 человек) поступает 40 проектов в год, каждый по 300 – 500 задач. В день до 5 новых задач на каждого исполнителя и случается от 5 до 20 событий. Горизонт

планирования около 3 месяцев, сеть расписания – примерно 10 тыс. связанных задач. Учитывается приоритет, для каждого исполнителя свой календарь, он может давать свои предпочтения, учет связей между задачами, необходим учет компетенций исполнителей и др.

В ходе изучения данных задач были выявлены следующие важные особенности задач управления ресурсами в реальном времени (табл. 1.1):

Таблица 1.1 – Особенности задач управления ресурсами в реальном времени

Особенности задач управления ресурсами	Трудности на практике
Заказы и ресурсы на практике никогда не известны заранее	Заказы поступают в непредсказуемое время, имеются отказы ресурсов и т.д.
Планирование обычно рассматривается как сверху вниз централизованный пакетный процесс	На практике процесс непрерывный, распределенный и интерактивный, с многократными согласованиями
Задержки в обработке событий становятся причиной увеличивающегося разрыва между планами и реальностью	Приходится резервировать ресурсы и делать страховые запасы, что вызывает падение эффективности
Участники оперируют различными критериями, своей логикой, ограничениями и предпочтениями	Процессы принятия решений носят индивидуальный характер для каждого участника
Большое разнообразие объектов и отношений, факторов, ситуаций, заказов и ресурсов, технологических операций и т.д.	Необходимо полноценно учитывать весь контекст ситуации, включающий сотни и тысячи деталей.
Комбинаторный поиск вариантов является NP-трудной задачей и может потребовать много часов даже для малого бизнеса	Многие события требуют немедленной реакции (секунды и минуты), в противном случае деньги и время будут потеряны с уменьшением эффективности
Игнорируются многие конкретные частные критерии, предпочтения и ограничения для заказов, продуктов и технологий, рабочих и оборудования	Нет одного «оптимального» решения для всех – в каждой ситуации ищется свой баланс интересов для участников и должен быть найден консенсус между ними
Взаимосвязанность решений может вызвать длинные волновые эффекты перестройки расписаний	Трудно рассчитать полную реконструкцию маршрутов, планов и расписаний на каждое событие
Ситуативность: количество и значение критериев зависят от результатов и изменяются в процессе вычислений	Новые события могут изменить критерии, предпочтения и ограничения для создания и пересмотра расписаний

Таблица 1.1 (продолжение)

Знания предметной области, как правило, скрыты и непрерывно изменяются с течением времени	Трудно выявлять важные знания и учиться из опыта, включая переопределение ограничений.
Часть знаний для принятия решений в настоящее время доступны только в виде накопленного опыта сотрудников на самой земле (рабочие в цехах, водители и др.)	Требуется непрерывное согласованное взаимодействие для принятия решений не только с руководителями, но и с рабочими, водителями и т.д.

Для рассмотренных областей применения были выявлены следующие важные требования (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Типичные особенности задач управления ресурсами

	Ресурсы								Задачи				Критерии	
	Мобильные	Статические	Делимые	Неделимые	Ограниченные	Неограниченные	Связанные	Несвязанные	Делимые	Неделимые	Связанные	Несвязанные	Многокритериальные	Однокритериальные
Планирование работ цехов предприятий, распределение заданий по работникам		+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	
Объемно-календарное планирование предприятий и групп смежных предприятий		+	+		+		+	+	+	+	+	+	+	
Взаимодействие цехов и предприятий-смежников		+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	
Графики движений РЖД	+		+	+	+		+		+	+	+		+	
Пассажироперевозки и общественный транспорт	+		+	+	+			+		+		+	+	
Мобильные бригады	+			+	+			+		+		+	+	
Транспортная логистика	+		+	+			+	+	+	+	+	+	+	

Таблица 1.2 (продолжение)

Цепи поставок	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		+	
Управление БПЛА	+			+	+		+		+	+	+	+		
Системы серверов		+	+		+		+		+	+	+	+	+	

Вышеприведенная таблица показывает новые требования, предъявляемые к решению современных задач управления ресурсами:

- 1) задачи управления ресурсами – сложные задачи, решение которых требует согласования интересов многих участников;
- 2) знания, которые должны учитываться в ходе управления ресурсами, часто характеризуют важные индивидуальные особенности заказов и ресурсов;
- 3) требуется учитывать специфику управления мобильными и статическими ресурсами;
- 4) задачи могут быть делимые на подзадачи и неделимые;
- 5) требуется учитывать последовательность выполнения связанных задач между собой;
- 6) ресурсы могут быть разделяемые между заказами;
- 7) требуется реализовывать многокритериальное планирование;
- 8) требуется ситуационное управление, когда критерии могут меняться в ходе выполнения задачи;
- 9) требуется учет событий, поступающих в реальном времени;
- 10) знания, используемые при планировании, являются трудно вербализируемыми и формализуемыми.

При этом совершенно разные прикладные задачи могут обладать сходными чертами: особенности мобильных или статических ресурсов, связность задач, задаваемых технологическими процессами и т.д.

Сложность объектов управления приводит к тому, что исходная информация о них часто не может быть полной, точной, корректной и т.д. Поэтому системы должны рассматриваться как открытые и взаимодействующие

с окружающей средой, т.е. должна быть возможность корректировать знания об объекте в процессе работы.

Такие системы рассматриваются на основе принципов ситуационного управления Д. А. Поспелова [10]:

- Традиционный формализм приводит к задачам такой размерности, что решение их не может быть проведено существующими методами.
- Выбирается уровень описания, который учитывает связи и параметры, позволяющие классифицировать ситуации управления.
- Язык описания ситуаций должен включать в себя наряду с традиционными количественными понятиями и плохо формализованные, качественные, например, с помощью семантических правил. Определение локальных критериев управления и целевых показателей.
- Определение конфликтных классов ситуаций для принятия решений.
- Разработка принципов композиции решений.
- Качество ситуационного управления зависит от выбора факторов, влияющих на систему и процесс принятия решений.

В наших исследованиях предлагается ситуационный подход к управлению ресурсами, в котором предполагается возможность изменения индивидуального состава критериев принятия решений, степени их важности для каждого участника процесса непосредственно в ходе решения задачи, при поступлении новых событий в реальном времени (подраздел 2.1). В данном подходе вводится описание модели ситуации предприятия, состоящей из истории принятия решений, семантической сети связей заказов и ресурсов, плана использования ресурсов на заданном горизонте, показателей эффективности и целевых функций. Под влиянием событий ситуативно максимизируется прирост

показателей положительных изменений и минимизируется ущерб от отрицательных воздействий, для чего производится адаптивное изменение планов использования ресурсов в консенсусе участвующих сущностей, причем как, возможно, людей, так и вещей (заказов, продуктов, станков и т.д.).

Рассмотрим характерные постановки задачи управления ресурсами и методы в применении к разным предметным областям.

Задачи цехового планирования и теории расписаний.

Разнообразие производственной деятельности обусловило развитие многочисленных постановок задач планирования, отличающихся целевыми функциями, особенностями прохождения заказов по цепочке ресурсов, взаимосвязям задач, подзадач, операций, что привело к постановкам Job Shop Scheduling, Flow Job Shop, Flexible Flow Shops, Open Shops и др. Необходимо построить план выполнения группы заказов с учетом минимизации максимального времени выполнения, приоритетов заказов, минимизации простоев ресурсов, минимизации опозданий и пр. В методе JSP каждая операция в групповой задаче выполняется на определенном ресурсе с разными последовательностями. В задачах FJS последовательность операций одинакова, в Open Shops порядок выполнения не задан жестко.

Применение методов оптимизации, основанных на точных и эвристических подходах, показано в книгах М. Пинедо [11, 12], К. Бейкера [13], Д. Палмера [14]. И. Риосолис исследовал смешанные целочисленные алгоритмы решения FJS и показал их применимость к планированию проектов и к массовому производству [15].

Для построения планов используются методы линейного и динамического программирования, методы ветвей и границ, эвристики расшивки узких мест, применения последовательностей правил [16], методы декомпозиции рассмотрены в книге И. Овачека [17] и др.[18]. Применения методов рассмотрены в монографии Д. Суле [19].

В работе С. Чапмана [20] дан обзор основных применяемых подходов. Эвристики локального поиска исследованы в работе Р. Дрисселя и Л. Мюнха [21]. Современные методы учета изменений характеристик оборудования и технологических процессов исследуются в книге М. Мераби [22].

В фундаментальной работе Дж. Леунга [23] с полнотой и строгостью освещены основные задачи теории расписаний и современные методы их решения. Книга А.А. Лазарева и Е.Р. Гафарова посвящена подходам к решению задач с ресурсными ограничениями и соотношениями предшествования [24], в ней рассмотрены классификации задач планирования, точные и приближенные методы решения, в том числе, эвристики муравьиной колонии. Оценены сходимости известных алгоритмов.

Задачи построения маршрутов в грузоперевозках

В оптимизации процессов грузоперевозок, доставке товаров потребителям существуют многочисленные модификации постановки задач VRP (Vehicle Routing Problem), такие как учет множественности точек погрузки, учет временных ограничений – MDVRP, VRPTW и др. Изложение методов приведено в труде П. Тота и Д. Виго [25]. Отмечено, что первоначальная простейшая постановка восходит к задаче коммивояжера, и множество модификаций учитывает разнообразие практических задач. Общее в постановках – наличие требований минимизации длины маршрута, времени движения, учет окон загрузки и доставки, ограничения объемов и типов перевозимых грузов. Применяются классические методы линейного и динамического программирования, уменьшения числа ограничений сведением к нелинейным задачам [26]. Обзор истории решений дан в работе Ж. Лапорте [27]. Большое распространение получили эвристические методы планирования маршрутов [28-30].

Управление подвижными объектами.

Проблемы управления группами подвижных роботов исследованы в книге И.А. Каляева [31]. Обобщены задачи управления в иерархиях различного

уровня и в условиях противодействующей среды, рассмотрены основные алгоритмы для больших систем из сотен и тысяч объектов, т.н. «умная пыль».

К управлению подвижными ресурсами относятся задачи группового взаимодействия БПЛА. Требуется построить маршруты движения аппаратов, перераспределять поступающие требования и ресурсы в группе для выполнения динамически поступающих задач. Необходимо также минимизировать энергозатраты, учитывать доступность БПЛА в каждый момент времени. Подходы распределенного решения в таких системах исследованы в работах О.Н. Граничина [32]. Наиболее распространены генетические алгоритмы и роевой подход [33]. Согласованные действия групп управляемых аппаратов рассмотрены в [34, 35].

Задачи управления спутниковыми группировками и оптимизация времен сеансов связи с наземными станциями являются примером распределенных систем оптимизации. Необходимо согласовать времена и объемы сброса данных на наземные станции с учетом окон видимости, ограниченности ресурсов аппаратов и др. ограничениями. Способы решения таких задач предложены в работах [36-38].

Распределение ресурсов в вычислительных системах

Одной из важнейших задач управления является балансировка нагрузки в вычислительных системах. Проблема балансировки осложняется отсутствием априорной информации о длительности поступающих задач, прогноза использования ресурсов, многочисленными вариантами трафика, вероятностным распределением задач. Как показали М. Катъял и А. Мишра [39], наиболее распространены циклические (раунд робин) [40] алгоритмы, колонии муравьев, генетические и стохастические алгоритмы. Применение стохастических моделей и достижение консенсуса в системе балансировки рассмотрены в работах О.Н. Граничина, Н.О. Амелиной и др. [41-43].

Управление проектами

Управление и планирование проектов предполагают распределение взаимосвязанных задач с определенными предельными сроками, стоимостями, приоритетами по группам исполнителей с различными компетенциями. Необходимо минимизировать времена выполнения, не нарушая предельных сроков, объемов финансирования, обеспечивать равномерность загрузки исполнителей. В упрощениях задача планирования проектов может быть сведена к Resource Constrained Project Scheduling Problem из исследования операций, Х. Керцнер [44]. Ограничения на доступность ресурсов, изменения порядка следования подзадач, приводят к затруднениям в построении моделей традиционной теории оптимизации, резкому возрастанию времени планирования. Методы решения, базирующиеся на эвристиках, рассмотрены К. Ньюманом [45]. Учет временных изменений в планировании выполнен П. Мелчиорсом в [46].

Составление графиков движений поездов

Оптимальный график движения поездов должен позволяет всем предприятиям железнодорожной сферы работать согласованно, уменьшать аварийность, увеличивать пропускную способность дорог. Задача формирования грузовых составов рассмотрена в работе А.А. Лазарева [47]. Формулировка в терминах целочисленного линейного программирования позволяет использовать хорошо изученные методы, однако отмечается, что в реальных случаях большой размерности требуется анализ структур систем ограничений и адаптация методов. Рассмотрены применения теории расписаний в планировании [48]. Пропускная способность участков исследуется в [49]. Проблема неустойчивости расписаний в связи с нарушающими событиями рассмотрена в [50]. Динамические подходы управления трафиком подразумевают работу систем управления в реальном времени [51]. Задачи оптимизации назначения локомотивов требуют учета многих критериев, в том числе, энергосбережения [52].

Планирование цепочек поставок

Задача распределения и оптимизации цепочек снабжения связана с обеспечением удовлетворения требований в узлах сети снабжения [53]. Сама постановка является комплексной, поскольку требуется прогноз потребления ресурсов в узлах, управление и обеспечение гарантированного неснижаемого объема запасов по различным типам ресурсов, оптимизация маршрутов доставки, объемы пополнения, учет сроков хранения и пр. [54]. Методы управления цепями поставок в условиях динамики систематизированы М. Кристофером [55]. Р. Новак [56] показал, что построение оптимальных маршрутов в задачах цепочек поставок и решение транспортных задач имеет определяющее значение.

Однако, результаты проведенного анализа показывают, что существующие решения не учитывают выявленных особенностей рассматриваемых задач, что требует разработки новых подходов, методов и средств управления ресурсами.

1.3 Классические методы планирования ресурсов

Традиционные подходы к решению задач распределения ресурсов основаны на применении комбинаторных методов, в которых ищется решение оптимизационных задач модификациями переборных вариантов в пространстве допустимых решений. К классическим относится линейное программирование, основы которого разработаны в работах Л. Канторовича и Д. Данцига [57]. Одним из эффективных алгоритмов является симплекс-метод. Задача формулируется как нахождение экстремальных значений функционала целевой функции в пространстве допустимых решений, заданной системой неравенств. В случае линейного программирования целевая функция и ограничения линейны.

В классическом труде В.С. Танаева и В.В. Шкурбы [58] описываются применяющиеся к разнообразным задачам теории оптимизации методы линейного и математического программирования, ветвей и границ и др.

Метод ветвей и границ связан с построением подзадач на подмножествах допустимых решений с помощью рекурсии. Строится дерево поиска оптимального решения. Подсчитываются верхние и нижние оценки каждой подзадачи, что позволяет отбрасывать заведомо неперспективные варианты. Однако в общем случае сложность вычислений растет экспоненциально с ростом размерности задач оптимизации.

Метод динамического программирования, разработанный Р. Беллманом, основан на разбиении сложной задачи на последовательные частные, решаемые рекурсивно, затем решение исходной задачи собирается обратным ходом. Для успешного применения подхода необходимо, чтобы задача обладала оптимальной структурой. Современные задачи планирования, такие как планирование последовательностей работ, сетевые задачи на графах, цепочки поставок в сетях снабжения и их математическая трактовка рассмотрены в книге Р. Беллмана [59]. Исследованы методы снижения размерности и учет нелинейностей в динамическом программировании.

Применение нелинейных целевых функций и ограничений на выпуклых множествах приводит к задачам выпуклого программирования, для которых разработаны такие методы, как метод множителей Лагранжа и др. Методы решения задач планирования на основе традиционных и стохастических методов рассмотрены в книге Р. Конвея [60].

Более детальный анализ сложностей классических алгоритмов приведен в работе П. Брукера [61].

1.4 Эвристические методы

Для построения приближенных решений в задачах планирования ресурсов применяются разнообразные эмпирические правила.

Эвристические методы часто классифицируются по критериям, которые в них применяются, или ключевым правилам, например, правилам приоритетов, связанным с выполняемой работой:

SPT (Shortest processing time first, кратчайшая по выполнению задача планируется первой) – из пула задач выбирается задача, имеющая минимальное время выполнения на данном ресурсе;

EDD (Earliest Due Day, наиболее ранний предельный срок) – выбирается задача с ближайшим предельным сроком и планируется первой;

LST, MINSLACK (минимальное оставшееся время) – выполняются задачи, разница между предельным временем выполнения, текущим временем и оставшимся временем выполнения минимальна;

FIFO (First In First Out, первый пришел, первый обслуживается) – типичное правило обслуживания очередей.

Создаются также многочисленные комбинации подобных правил с учетом приоритетов, стоимостей выполнения работ, соотношений длительностей выполнения и суммарной загрузки ресурсов. Приоритеты могут изменяться динамически. Такие системы планирования обычно применяются в системах реального времени, поскольку достаточно эффективны, просты в использовании, но результаты их работы обычно далеки от оптимальных [62,11].

Генетические алгоритмы управления ресурсами

Генетические алгоритмы (ГА) имитируют механизмы естественного отбора в живой природе в задачах оптимизации. Д. Голдберг [63] рассмотрел наиболее распространенные генетические алгоритмы. Принцип связан с отбором наилучших черт, описывающих решение в популяции, и подавлении неудачных. Особи в популяции, представляющие собой наборы «хромосом» возможных решений, ранжируются по функции приспособленности. Новая популяция строится с использованием специфических генетических операций кроссинговера, мутаций и репродукции. Состав популяций содержит набор

строк «хромосом», изменяется под действием мутаций. После этапа оценки скрещивание случайным образом соединяет гены хромосом двух удачных решений. Затем на этапе мутации гены перемешиваются. ГА создает новую популяцию, в которой сохранены «особи» с высоким значением оценочной функции. Таким образом, через несколько циклов в популяции содержится все большее количество удачных решений. К недостаткам ГА относится медленная сходимость, поскольку операции скрещивания и мутаций являются случайными процессами. ГА широко применяются в задачах построения маршрутов, балансировке нагрузки в сетях, производственном планировании и других областях [64].

Широкое распространение в задачах оптимизации получили алгоритмы муравьиных колоний (Ant Colony Optimization, ACO). Основные принципы и применения рассмотрены в книге под редакцией Ф. Хафа [65].

Алгоритмы используют модель поиска путей к пище муравьями в живой природе. Агент, имитирующий муравья, вероятностным методом поиска продвигается в пространстве, помечая свою траекторию «ферромоном». След усиливается при прохождении других насекомых и испаряется с течением времени. Постепенно формируются решения, близкие к оптимальным. Алгоритм имеет преимущества по сравнению с другими эволюционными алгоритмами, поскольку применяет положительную обратную связь в закреплении более удачного решения. В то же время, недостатки ACO связаны с медленной сходимостью из-за отсутствия центрального узла выбора лучшего решения. Кроме того, в пространствах поиска большой размерности алгоритм часто дает неудовлетворительные результаты. Муравьиные алгоритмы наиболее широко применяются в задачах логистики [66, 67], построения маршрутов для БПЛА, в планировании производства [68], управлении проектами [69].

Роевые алгоритмы

Алгоритмы роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) основаны на поиске оптимума в решении имитацией поведения стай птиц или рыб «частицами» в пространстве решений [70]. Роевая оптимизация основана на трех особенностях поведения стаи – разделении, выравнивании и сплоченности.

Разделение служит для предотвращения локальных неоптимальных сгущений, выравнивание применяется для определения направлений к частицам с лучшей оценкой, сплоченность приводит к усреднению положения в частях роя.

Для частиц роя вводится понятие скорости движения в пространстве решений, оценка состояния производится при помощи заданной целевой функции. Ближайшие соседние частицы имеют возможность сообщать данные о своем состоянии. Алгоритм начинает свою работу с инициализации частиц роя. Вычислив значения своей целевой функции, частицы выбирают направление и скорости на лидера группы по целевой функции в своей окрестности. В топологической окрестности каждого лидера образуется локально-оптимальное решение. Сходимость метода достигается притяжением частиц к лидеру роя.

Роевой алгоритм имеет преимущества в простоте реализации, требует несколько параметров описания топологии роя, нечувствителен к масштабам задач, легко раскладывается на параллельные вычисления, однако может приводить к усреднению в локально-оптимальных точках с преждевременной сходимостью к ним. Роевые алгоритмы применяются не только для оптимизации в сетях, но и в планировании производственных задач [71].

Также для решения задач планирования применяются нейросетевые методы. Нейросети с различной конфигурацией слоев состоят из элементов с нелинейной функцией преобразования сигналов. На вход сети подаются

обучающие образцы и минимизируется отклонение на выходе сети путем подгонки весов от выходных сигналов нейронов. Обученная таким образом сеть может строить решение новой задачи [72].

Алгоритмы оптимизации с распределенными ограничениями DCOP

Для решения задач оптимизации с распределенными ограничениями П. Моди, М. Тамбе, М. Йоко, А. Петсу, А. Мейселлс и др. разработали теорию алгоритмов DCOP [73-78].

Она является расширением на распределенные системы теории оптимизации с ограничениями. DCOP состоит из кортежей агентов, непересекающихся локальных задач оптимизации с ограничениями и оценочных функций каждой локальной задачи. Агенты, ответственные за локальную задачу, различимы и имеют полную формацию о ее переменных и могут обмениваться сообщениями. Разработаны десятки алгоритмов семейства DCOP, например, ADOpt (Asynchronous Distributed OPTimization, Асинхронная распределенная оптимизация), DPOP (Distributed pseudo-tree optimization, распределенная оптимизация псевдо дерева), OptAPO (Optimal Asynchronous Partial Overlay, Оптимальное асинхронное частичное перекрытие) и др. Принцип работы алгоритмов основан на различных порядках отправки сообщений в иерархических структурах связей, правил согласования значений переменных. В алгоритмах DCOP агенты рассылают сообщения об изменениях в локальной задаче соседним по иерархии задачам, не дожидаясь подтверждения. При получении сообщений о конфликте возвращают состояние к предыдущему или ищут альтернативы и заполняют список конфликтов, пересылая его в сообщении конфликтующему. Двигаясь по ранжированному списку агентов с конфликтами, вычеркивают успешно разрешенные. Процесс завершается, когда список будет пустым. В исследованиях по DCOP отмечается, что в задачах планирования при росте размерности наблюдается неполиномиальный рост количества сообщений агентов, что вызывает сложности в практическом применении.

1.5 Мультиагентные системы

В связи с рассмотренными выше требованиями к системам управления современными промышленными предприятиями в последнее время все большее развитие приобретает распределенный подход к управлению ресурсами.

Один из таких подходов представляет теория активных систем (ТАС), включающая математический аппарат, использующий понятие активных управляемых субъектов, разработанная В. Н. Бурковым и Д. А. Новиковым [79, 3]. В ТАС управляемые объекты обладают возможностью выбора не только своего состояния, но также методов и стратегий его достижения, с учетом предпочтений и ограничений. Модели активных систем задаются составом, структурой связей между участниками, иерархиями подчинения, динамикой и порядком функционирования, целевыми функциями, множеством допустимых состояний, способом обмена информацией. Рассматриваются задачи синтеза механизмов управления и оптимального состава систем. Одной из самых важных прикладных задач ТАС является систематизация применений механизмов управления в различных предметных областях.

Развиваются синтетические направления, такие, как теория управления организационными системами [5]. Производственные, транспортные, системы обслуживания и др. могут трактоваться как частный вид организационных систем. Организационная система задается ее структурой, составом, функционированием с точки зрения выбора допустимых стратегий. Под управлением в организационной системе полагаются воздействия на нее для обеспечения необходимого поведения. Исследуются такие воздействия, как управление структурой и составом, ограничениями, порядком функционирования, предпочтениями, объемом обладаемой информацией. Рассматриваются различные механизмы контроля, планирования,

стимулирования, оценивания оптимизации, изменения структуры ресурсов и технологических графов процессов.

Развитие систем искусственного интеллекта, методов объектно-ориентированного программирования, сетевых технологий привели к возникновению мультиагентного подхода. Большой вклад в развитие мультиагентных систем внесли М. Вулдридж [80], Н. Дженнингс [81], М. Тамбе [82], В. Лессер, Г. Ржевский [83-85] и др. В нашей стране развитием теории и практики мультиагентных систем занимаются В.Б. Тарасов [86], В.И. Городецкий [87-90], О.Н. Граничин [9, 32, 41], В.А. Виттих [91-93], П.О. Скобелев [94-105] и др.

Было предложено решение сложных задач производить в распределенной среде взаимодействующих между собой агентов, которые действуют параллельно и асинхронно, совместно строя решение сложной задачи путем самоорганизации. Этот принцип в корне отличается от централизованного подхода и сходен с процессами самоорганизации в живой природе. В настоящее время существует множество определений и классификаций агентных систем, однако в целом они согласуются с определениями В.И. Городецкого [89].

Под агентом подразумевается автономная компьютерная программа или система, способная действовать в динамической, непрерывно и непредсказуемо изменяющейся внешней среде целенаправленным образом.

Основные свойства агента:

- Автономность агента связана со способностью действовать целенаправленно для достижения результата, без внешнего управления со стороны других систем. Агент обладает контролем над своими действиями и состоянием внутренних переменных.

- Агенты обладают социальным поведением – взаимодействуют с другими агентами в кооперации для выполнения общей задачи и согласованно разрешают конфликты с достижением консенсуса.
- Агенты обладают реактивностью – получают события из внешней среды и реагирует на изменения в ситуации, при этом их поведение корректируется согласно изменениям и целям.
- Проактивность агентов заключается в стремлении достичь целей, непрерывно улучшая характеристики внутреннего состояния.

Главное свойство агента – автономность, наличие целей и способов их достижения, реакция на изменения в среде.

Мультиагентной системой является сеть агентов, взаимодействующих между собой в общей среде и стремящихся выполнить поставленную для системы общую цель. Взаимодействие агентов в системе происходит либо напрямую с помощью передачи сообщений, либо косвенно, через реакцию внешней среды на присутствующих других агентов.

Мультиагентная система может состоять из агентов различных типов со своим поведением, характеристиками, ограничениями и целями. Агенты как компьютерные программы могут быть написаны на разных языках, работать на различных платформах и быть распределенными в компьютерной сети. Мультиагентные системы обычно носят открытый характер и содержат переменное число агентов: агенты могут входить в среду взаимодействия и покидать ее.

Дальнейшее развитие мультиагентные системы получили в работах В.А. Виттиха и П.О. Скобелева в предложенной ими концепции сети потребностей и возможностей [91-93,124]. Агенты заказов и ресурсов представляют собой элементы строящейся сети потребностей и возможностей, взаимодействующих на виртуальном рынке системы. Они заключают контракты на выполнение услуг, усиливая или ослабляя связи в зависимости от ситуации,

при этом состоянию и конфигурации ПВ-сети соответствует определенное динамическое расписание. Агенты потребностей и возможностей, в свою очередь, при необходимости порождают дополнительных агентов. Постоянный поиск консенсуса путем взаимно-приемлемой компенсации за временные ухудшения в такой среде приводит к динамическому равновесию и локальным самоорганизующимся расписаниям [96]. На основе данного подхода созданы многочисленные приложения в различных предметных областях [35-38,94-105]. Плодотворным оказался холонический подход к построению производственных систем, развитый Ван Брюсселем и П. Валкенаэрсом [106,107].

В настоящее время автоматизация производственных процессов и объединение их с компьютерными системами дает новый импульс развитию МАС в направлении создания кибер-физических моделей реальности [8,109], интернета вещей в рамках INDUSTRY 4.0 [110], когда с каждым объектом производственной системы связывается соответствующий ему агент. Такие системы будут функционировать практически без внешнего вмешательства.

Примеры такого рода задач управления ресурсами рассмотрены в книге Г.А. Ржевского и П.О. Скобелева [85].

Теория игр в мультиагентных системах

Поскольку в мультиагентных системах существует взаимодействие агентов с несовпадающими интересами, стремящимися к достижению целей при помощи некоторых протоколов, которые можно в частных случаях рассматривать как реализацию стратегии поведения, то, как указано в книге Y. Shoham [135], эволюция мультиагентной системы может быть рассмотрена с помощью теории игр.

Действительно, для игр в нормальной форме существует множество игроков, множество стратегий каждого игрока и функции платежей. Построение таблиц для множества исходов в системе агентов задач и ресурсов позволяет разместить задачи при планировании на ресурсах с максимизацией

полезности. В то же время, распределение общих ресурсов может приводить к ситуациям, когда установившееся равновесие не устраивает ни одного агента.

Модели аукционных торгов позволяют использовать механизмы установления равновесных цен при распределении ресурсов, что также позволяет их рассматривать в теоретико-игровом подходе.

Использование методов теории игр в планировании распределения электроэнергии в сетях поставщиков и потребителей рассмотрено в [136].

В данном подходе конкурирующими за ресурсы игроками являются потребители, стратегиями служат вектора, например, почасового планирования потребления энергии, выигрышем служит оплата энергии. Каждый потребитель стремится минимизировать стоимость энергии в зависимости от стратегии потребления других участников.

T. Basar [137] исследовал применение аппарата некооперативных игр к моделям потребления энергии в кибер-физических системах. Его анализ в этой области показал, что можно построить систему оптимизации на основании функций полезности, при условиях, что конкурирующие потребители платят пропорционально потреблению. В таких задачах достигается равновесие Нэша, которое определяется единственным набором нагрузок.

M. Nagarajan рассмотрел модели кооперативных игр в планировании цепочек поставок [138]. В отличие от некооперативных игр, которые ориентируются на стратегии, кооперативные рассматривают множество исходов, какую выгоду игроки могут достичь, используя те или иные коалиции. Различные модели торгов позволяют достичь справедливого с точки зрения игроков распределения доходов. Такой механизм дает возможность рассматривать оптимизацию поставок в сети нескольких розничных продавцов.

В играх с трансферабельной полезностью часть выигрыша передается от одного игрока другому на основании правил распределения и соглашений между игроками, что приводит к общему выигрышу коалиции. Однако вопрос

о формировании наивыгоднейших коалиций остается в стадии исследований. Механизмы установления равновесия Нэша в кооперативных играх с трансфертом полезности требуют условий вогнутости функций агентов, тогда доказываемая, что итерационные процессы сходятся при решении задач распределения ресурсов.

Развиваемый в наших исследованиях подход, основанный на функциях удовлетворенности агентов, виртуальном рынке и штраф-бонусах, имеет общие черты с механизмами установления равновесий в коалиционных играх, а именно применение универсальных денежных компенсаций в переговорах. Однако основными целями являются достижение компромисса между всеми участниками процесса и приведение показателей различных типов агентов в допустимые диапазоны под влиянием внешних событий, не обусловленными антагонистическими целями коалиций.

Внешние события изменяют правила игры, и с помощью денежных эквивалентов агенты адаптивно перестраивают расписания.

В результате реализации переговоров в конечном итоге создается сбалансированное расписание использования ресурсов, а не максимизируется выигрыш некоторой группы участников.

1.6 Анализ существующих систем управления ресурсами

К настоящему времени мировыми компаниями разработано большое число систем управления ресурсами, реализующих концепции ERP и MES [111], в которых применяются системы планирования от уровня подразделений и цехов до предприятий и отраслей.

Лидерами рынка являются SAP, Oracle, Microsoft и некоторые другие.

SAP SE – германская компания, производитель программного обеспечения для организаций [112]. Компания занимается разработкой автоматизированных систем управления такими внутренними процессами предприятия, как

бухгалтерский учет, торговля, производство, финансы, управление персоналом, управление складами и т. д. Самый известный продукт компании – ERP-система SAP ERP ECC (enterprise central component), ориентированная на крупные и средние предприятия, разрабатываемая и продаваемая компанией более 20 лет. В планировании производств SAP использует планировщик SAP Advanced Planner and Optimizer (SAP APO).

Он используется для работы в цепях поставок, планировании потребностей, планировании выпуска продукции и детального календарного планирования и др. Планировщик использует последние достижения в теории оптимизации, такие, например, как теория ограничений и различные оптимизационные библиотеки. Оптимизация производится с помощью математического программирования, программирования ограничений и генетических алгоритмов.

Oracle E-Business Suite [113] включает в себя программные бизнес-приложения, которые помогают предприятиям принимать лучшие решения, снижать расходы и повышать производительность. Имеются многочисленные модули управления проектами, цепочками поставок, персоналом, финансами, системами обслуживания клиентов и др. Модуль планирования снабжения позволяет планировать потребности в материалах на горизонтах оперативного и стратегического уровня. Он позволяет вести учет производства продукции и движения материальных потоков по заранее созданным цепочкам снабжения, масштаб которых может варьироваться от внутрицехового и межцехового уровня до уровня взаимодействия предприятия со всеми его внешними поставщиками и смежниками. Цепочки поставок могут охватывать как отдельные рабочие места внутри цеха, и далее в масштабе от цехов до предприятия в целом, так и взаимодействие предприятий со смежниками. Планирование возможно для различных типов производственных процессов – дискретного и непрерывного, с применением ограничений по

производительности каждой единицы цехового оборудования. Применяется настройка технологических ограничений оборудования. Имеется учет событий выхода из строя оборудования и др. В то же время перепланирование по ситуации возможно в небольшом масштабе из-за вычислительных затрат. Набор критериев жестко задан и не всегда покрывает потребности практики. Параметры алгоритма планирования закрыты для пользователей. Некоторую гибкость придают возможности корректирования оперативного плана.

Microsoft Dynamics AX [114] представляет собой систему управления бизнесом крупных и средних предприятий от 500 до нескольких тысяч сотрудников.

Система основана на продолжениях решений Ахарта. Предоставлены функции управления цепочками поставок, управления предприятием, проектной деятельностью, персоналом, финансами, сервисом, розничными сетями и др. Доступны облачные решения. Реализованы системы цехового планирования, в масштабе предприятия и группы предприятий с непрерывным и дискретным производством. Допускается гибкая конфигурация архитектуры приложений под конкретные требования. В решениях использованы методы линейного и выпуклого программирования, эвристики правил диспетчеризации.

Infor [115] – американская компания, специализирующаяся на программных продуктах широкого диапазона, от финансовых систем и планирования ресурсов (ERP) до управления цепочками поставок. Одно из решений – ERP LN. Infor ERP LN – это модульное ERP-решение, поддерживающее многочисленные бизнес-функции, позволяющее обеспечить автоматизацию и прозрачность всех бизнес-процессов предприятия, в таких отраслях как тяжелое и среднее машиностроение, приборостроение, радиотехника и электроника, судостроение и авиационная промышленность, а также предприятия ВПК. Применяется широкий спектр алгоритмов от

математического программирования до различных эвристик. Созданы облачные решения.

Галактика ERP [116]. Автоматизированная система управления производством создана российской компанией для оперативного решения управленческих и учетных задач, обеспечивающая оптимизацию работы и эффективности производства. Доступны отраслевые решения для машиностроения, нефтегазового комплекса, химической промышленности, проектной деятельности, агропромышленного комплекса и др. Система состоит из подсистем управления и планирования производства, финансового планирования и бухгалтерского учета, складского учета, управления логистикой, управление персоналом и кадровой политикой.

Позволяет осуществлять управление основным производством на уровне завода, формировать производственную программу, планировать производство по заказам, графики запуска и выпуска партий деталей и сборочных единиц, формировать производственные задания цехам, планировать потребности в материалах, трудозатратах, оборудовании, оснастке. Внутрицеховое оперативное управление дает пооперационное планирование производства, составление расписаний загрузки рабочих мест, формирование сменно-суточных заданий и др. Применяются алгоритмы планирования на базе IBM ILOG, что затрудняет учет неблагоприятных событий и требует перестройки текущих планов.

1С:ERP Управление предприятием 2 [117] – российская разработка, популярность которой связана с широко распространенными решениями 1С. Включает в себя функции управления по межцеховым переходам и на операционном уровне, партии запуска, групповые и персональные задания на работу, оперативная диспетчеризация, управление по «узким местам», управление загрузкой, планирование по заданным единицам времени и др.

Имеется пооперационное планирование, планирование по этапам, применяется теория ограничений Голдратта. Превалируют учетные функции, оптимизация планов проводится пользователями системы.

Вышеприведенные системы имеют следующие общие черты:

- ограниченный характер средств поддержки процессов принятия решений по распределению, планированию и оптимизации ресурсов для современных сложных задач управления ресурсами;
- централизованная схема управления, построенная на последовательной схеме выдачи команд-инструкций сверху вниз;
- закрытый характер системы, требующий вмешательства программистов для ее модернизации и развития;
- иерархическая жесткость системы, не позволяющая реагировать на непредвиденные динамические изменения в окружающей среде;
- внутренняя пассивность, работа в пакетном режиме «по запросу» пользователя;
- ориентация на данные, а не на специальные знания предприятия, учитывающие особенности принятия решений;
- попытка массовой стандартизации и унификации работы, не учитывающая индивидуальные предпочтения и ограничения пользователей.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Анализ современных задач управления ресурсами показывает, что в ходе этого процесса требуется учитывать ряд важных новых особенностей: сложность задач, предполагающую наличие явных или неявных интересов многих участников, неопределенность изменений спроса и предложения, специфические индивидуальные особенности заказов и ресурсов и т.д.

2. Выполненный обзор литературы показывает, что наиболее часто для решения задач управления ресурсами используются классические методы линейного и математического программирования, ветвей и границ и др. На этом пути обычно используются модификации традиционных алгоритмов, доработанные с учетом особенностей решаемой задачи. Однако в основном они ориентированы на централизованный подход в организации вычислений, что вызывает трудности при росте масштаба задач.

3. Эвристические методы на основе генетических алгоритмов и роевой оптимизации, использующие эволюционные алгоритмы, все более активно развиваются в задачах с высокой размерностью, где классические методы не справляются. Эти методы также ориентированы на пакетную обработку, что затрудняет работу таких систем в режиме реального времени.

4. Показаны ограничения существующих классических и эвристических методов при работе в реальном времени, требующие адаптивного пересмотра расписаний под действием поступающего потока событий.

5. Выявленные особенности современных задач управления ресурсами в различных предметных областях (производственные расписания, транспортная логистика, цепочки поставок и др.) диктуют новые требования к постановке задач управления ресурсами и созданию интеллектуальных систем для поддержки принятия решений в условиях неопределенности.

2 СИТУАЦИОННЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ РЕСУРСАМИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

2.1 Ситуативное управление и модель ситуации

В ходе исследований было замечено, что управление ресурсами – сложная многокритериальная задача, требующая ситуационного решения, с учетом особенностей заказов, технологии их реализации, возможностей ресурсов, микроэкономики предприятия, ряда других предпочтений и ограничений.

Пример критериев, важность которых может меняться по ситуации: качество продукции, сроки поставок разных заказов, загруженность ресурсов, стоимость, риск. В некоторый момент времени для предприятия важна прибыль, а для vip клиента – срок и т.д. Требуется управлять каждым заказом и продуктом, задачей и ресурсом, индивидуально учитывать его критерии и приоритеты.

Таким образом, состав критериев и их важность может меняться в процессе решения задачи управления ресурсами, причем в любой момент и со стороны любой из сущностей, и при возникновении новых событий в реальном времени. В этой связи в ситуационном подходе требуется строить и поддерживать решение (расписание) в консенсусе участвующих сущностей.

Предлагается формализованная модель ситуации предприятия, которая задается кортежем

$$S(i) = \{History, Scene, Plan, KPI\},$$

где S – состояние предприятия,

History – история принятых решений по предыдущим событиям (лог событий),

Scene – семантическая сеть, показывающая состояние и связи между заказами и ресурсами, задачами, продуктами и т.д.,

Plan – расписание использования ресурсов,

KPI – показатели эффективности работы предприятия (прибыль и др.),

i – индекс, нумерующий состояние. Расписание с установленными связями между заказами и ресурсами, рассматривается как ПВ-сеть, показывающая результат самоорганизации агентов потребностей и возможностей на виртуальном рынке предприятия, где установление, изменение или разрыв связи при согласии обоих партнеров трактуется как элементарный акт самоорганизации.

Тогда

$$S(i+1) = F(S(i), Event(i))$$

– новое устойчивое состояние, в которое предприятие переходит в процессе F в случае поступления события $Event$. Новое состояние отражает новое установившееся локальное равновесие при поиске баланса интересов агентов системы. Задачу ситуационного управления ресурсами предприятия определим как задачу максимизации прироста $K(i+1)$ для позитивных событий, связанных с приходом новых заказов, и минимизации ущерба $K(i+1)$ – при негативных событиях, обусловленных выходом ресурсов из строя.

Предлагается развитие подхода виртуального рынка и метод ситуационного управления ресурсами, итерационно работающий от «узкого звена» по тому критерию, где наблюдаются худшие значения.

2.2 Формализация постановки задачи планирования ресурсов

В формальной постановке задачи распределения ресурсов при планировании предполагается, что каждый из ресурсов может иметь собственные критерии (например, расписание стоимости ресурса, его производительность, сроки, себестоимость, риск и другие), причем их важность может изменяться в ходе выполнения задач.

Для повышения эффективности управления и планирования предлагается использовать мультиагентные технологии, позволяющие автоматизировать процессы разрешения конфликтов и нахождения балансов интересов по

использованию ресурсов. Формально задача может быть сформулирована через удовлетворенности агентов заказов и ресурсов.

Данная постановка изложена автором в [121]. Производственное предприятие может быть описано через систему холонов (сложных систем) ресурсов и задач: на нижнем уровне ресурсы представлены станками, рабочими центрами, рабочими конкретными специальностями [107]. Заказы на этом уровне – это производственные задания исполнителям. Далее, более крупные холоны – участки, производственные цеха с участками и заказы на уровне цехов с соответствующими межцеховыми связями, на верхнем уровне – производство в целом с кооперацией по смежным производствам.

В предлагаемом мультиагентном подходе каждому подразделению предприятия уровня h (корпорация, завод, цех, рабочий и т.п.) ставятся в соответствие указанные выше типы агентов, состояние которых описывается через функции удовлетворенности $u^{res\ h}_j$ по показателям (функциям критериев) i из множества $\{x_i^h\}$ с весом $\alpha^{res\ h}_{ij}$, характеризующих, насколько их значения по заданным показателям отклоняются от желаемых значений $x_{ij}^{id\ h}$ для ресурса j по подразделению h . Показатели сворачиваются аддитивным способом в единую функцию удовлетворенности. В данной модели целевая функция агентов ресурсов (res) подразделения на уровне h по удовлетворенности из диапазона $[0,1]$ кусочно-линейно зависит от показателей x_i^h , от их значений на предшествующем уровне организации $h-1$ и значений удовлетворенности агентов ресурсов. Аналогично могут быть заданы функции с весом $\beta^{task\ h}_{mn}$ удовлетворенности задач $u^{task\ h}_n$ на уровне h , в качестве показателей рассматривается множество $\{y_n^h\}$ и $\{z_p^h\}$ для агентов продуктов u^{prod} . Для каждого из агентов ресурсов, задач, продуктов, штабного может быть введена важность (приоритеты) $\{w_j^{res\ h}\}$, $\{w_n^{task\ h}\}$, $\{w_p^{prod\ h}\}$ соответственно. Штабной агент единственный на каждом уровне h .

Тогда задача построения плана предприятия сводится к максимизации удовлетворенности агентов для уровня $h=1, \dots, H$, для ресурсов, задач и продуктов:

$$\begin{aligned}
u^{res h} &= \sum_j w_j^{res h} u_j^{res h} = \sum_j w_j^{res h} \sum_i \alpha_{ij}^{res h} f_{ij}^{res h}(x_i^h, x_{ij}^{id}, x_i^{h-1}, f_{ij}^{res h-1}), \\
u^{task h} &= \sum_n w_n^{task h} u_n^{task h} = \sum_n w_n^{task h} \sum_m \beta_{mn}^{task h} f_{mn}^{task h}(y_m^h, y_{mn}^{id}, y_n^{h-1}, f_{mn}^{task h-1}), \\
u^{prod h} &= \sum_p w_p^{prod h} u_p^{prod h} = \sum_p w_p^{prod h} \sum_k \gamma_{kp}^{prod h} f_{kp}^{prod h}(z_k^h, z_{kp}^{id}, z_k^{h-1}, f_{kp}^{prod h-1}), \\
u^{dep h} &= \sum_l \delta_l^{dep h} f_l^{dep h}(s_l^h, s_l^{id}, s_l^{h-1}, f_l^{dep h-1}), \tag{2.1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x^{res h*} &= \max_{x_i^h} (u^{res h}), & y^{task h*} &= \max_{y_m^h} (u^{task h}), \\
z^{prod h*} &= \max_{z_k^h} (u^{prod h}), & s^{dep h*} &= \max_{s_l^h} (u^{dep h}).
\end{aligned}$$

где $x^{res h*}$, $y^{task h*}$, $z^{prod h*}$, $s^{dep h*}$ – «ОПТИМАЛЬНЫЕ» в данной ситуации значения показателей переменных ресурсов, задач, продуктов и штабных для уровня h . Для нижнего уровня 1 функции компонент удовлетворенности $f_{ij}^{h=1}$ не зависят от значений предшествующего уровня,

$$x_i \in D^I, y_m \in D^M, z_k \in D^K, s_l \in D^L \quad \forall i, m, k, l$$

Переменные x , y , z , s лежат в области показателей ресурсов D^I , заказов D^M , продуктов D^K , и штабных агентов D^L , где I , M , K , L – размерности соответствующих пространств.

Таким образом, задача оптимизации сформулирована для агентов в системе как задача максимизации удовлетворенностей (2.1). Рекурсивность задачи (2.1) по уровню холонов и нелинейность по зависимостям от решений на предшествующем уровне допускает итерационное решение при помощи «вложенных» сетевых мультиагентных планировщиков.

2.3 Модель виртуального рынка сети потребностей и возможностей при мультиагентном планировании ресурсов

Мультиагентный подход к разработке интеллектуальной систем планирования основан на использовании концепции сетей потребностей и

возможностей (ПВ-сетей) и метода сопряженных взаимодействий для управления ресурсами в реальном времени на виртуальном рынке. Под ПВ-сетью понимается множество $D=\{A, R, P, G\}$, где A – множество агентов потребностей и возможностей в заданной предметной области, R – множество отношений между агентами потребностей и возможностей, P – множество правил установки соответствий и принятия решений между агентами, G – множество целей агентов [92,93, 96].

Согласно данному подходу, каждой заявке, заказу и другим потребностям и возможностям (производственные ресурсы, станки, оборудование, материалы, транспортные средства, персонал) присваиваются программные агенты, которые договариваются с другими агентами и планируют выполнение заказов «точно-в-срок» или «как можно раньше», что позволяет обеспечить поддержку коллективного согласования и принятия решений в реальном времени на различных этапах планирования и исполнения производственного плана в различных подразделениях, работающих совместно над решением общих задач.

Введем понятие виртуального рынка.

Под виртуальным рынком $M= \{A, L, P, Z\}$ системы понимается множество классов агентов в ПВ-сети (например, ресурсов R и задач D), которые имеют виртуальные деньги Z для покупок и продаж мест в расписании и установления связей L между собой, а также видов протоколов P переговоров агентов в процессах купли-продажи. ПВ-сеть была расширена введением новых типов агентов операций для учета связанных задач и штабного агента предприятия. Основные типы агентов приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Основные типы агентов ПВ-сети планирования производства

Агент	Цели и задачи
Агент заказа на изделие (товар, продукт, услугу)	Стремится быть выполненным в кратчайшие сроки, с максимальным качеством, минимальной стоимостью и риском. Порождает Агента технологического процесса (при наличии альтернативных процессов – нескольких) и передает ему все требования и виртуальную валюту по таблице тарифов. Получает и оценивает варианты исполнения, принимает решения по своей реализации.
Агент технологического процесса изготовления изделия	Стремится быть выполненным с соблюдением технологического процесса и всеми требованиями, идущими от заказа. Создает агентов дочерних задач, логически связанных между собой по входу и выходу, что предполагает возможность последовательного или параллельного исполнения задач. Передает требования, анализирует и контролирует результаты планирования своих дочерних задач, выявляя «узкие звенья» и помогая тем, кто не может справиться самостоятельно, точно инвестируя дополнительную виртуальную валюту. Ведет экономику изготовления заказа и рассчитывает все критерии. Управляет стратегиями разрешения конфликтов. При построении плана предлагает полученное расписание на согласование агенту заказа. Далее контролирует исполнение построенного утвержденного плана и согласовывает решение о начале перепланирования в случае задержек. Сигнализирует о завершении продукта и формирует отчет по исполнению.
Агент задачи (операции) технологического процесса	Стремится запланировать выполнение задачи с участием лучшего (наиболее квалифицированного) исполнителя, без какой-либо задержки после окончания предшествующей задачи и с выполнением всех требований техпроцесса. Подбирает исполнителя и необходимые другие ресурсы. Если исполнитель занят – инициирует переговоры о разрешении конфликта. Сообщает об успешном завершении планирования своему родителю. Если планирование не успешно – ищет другие возможности, например, разделить работу на дробные части. По указанию родителя стремиться улучшить результат. В случае не успеха - определяет нужное недостающее количество валюты. Реагирует на события, связанные с задержкой предыдущих задач, обеспечивая свое перепланирование и всех последующих задач в цепочке. Проактивно улучшает свое положение в расписании, компенсируя, при наличии валюты, в конфликтах ухудшения другим задачам и ресурсам. Успешно запланированная задача далее, по наступлению времени, контролирует начало и конец своего исполнения – до момента получения результата или брака, что перезапускает технологический процесс полностью или частично.

Таблица 2.1 (продолжение)

Агент ресурса (исполнителя, оборудования, инструмента, материала и т.д.)	Стремится быть максимально загруженным и выполнить в срок все запланированные задачи. Рассчитывает показатели своей загрузки и динамическую цену своих оставшихся свободных слотов. В случае недогрузки пытается проактивно улучшить свое состояние, предлагая задачам перейти на него со скидкой (переманивает). При перегрузке пытается вытолкнуть худшие задачи с возможной компенсацией им потерь.
Агент подразделения (цеха)	Стремится обеспечить равномерную загрузку своих исполнителей и других ресурсов. При необходимости – выделяет дополнительные ресурсы (вторая смена и т.д.).
Агент изделия (продукта)	Стремиться к минимальному пролеживанию. Знает свой состав компонентов и техпроцесс создания и куда входит в свою очередь. Порождает агентов заказов – например, для своей транспортировки. Может обеспечить разборку – если составных частей нет для другого изделия, у которого подходя сроки выпуска. Контролирует качество продукта – в случае брака согласовывает перезапуск. Сообщает агентам соответствующих задач о своей готовности к использованию. Рассчитывает фактическую экономику изделия в реальном времени.
Штабной агент (предприятия, подразделения)	Стремиться сбалансировать (гармонизировать) расписание со стороны как заказов, так и ресурсов. Получает и анализирует результаты работы основных классов агентов. Ведет бизнес-радары расписания. Выявляет «узкие места» в расписании и осуществляет точечные инвестиции для попадания в область допустимых значений и переход в зону комфорта.

Агенты ПВ-сети взаимодействуют путем переговоров в сцене мира, которая строится как отражение реальной ситуации во внешнем мире, с текущим планом действий и ожидаемыми результатами, доступными агентам предприятия, цеха на соответствующих уровнях. Агент нового заказа, поступив в сцену, обращается к агенту предприятия со своими требованиями. Агент предприятия (штабной агент) активизирует агентов цехов, которые на основании информации о технологических процессах, создают агентов операций и подзадач, которые направляют запросы к ресурсам – станкам, оборудованию, материалам. Агенты выполняют матчинг по соответствиям типов, производительности, требованиям к персоналу. Ресурсы (станки, специалисты) анализируют локальные расписания с проверкой нахождения мест возможного расположения. Агент нового заказа пытается договориться с мешающими заказами о подвижках и соответствующих

компенсациях, в режиме проактивности изменяет локальные расписания. В случае консенсусного соглашения новое расписание принимается всеми участниками, иначе итерации (волны) переговоров затрагивают более глубокие слои расписаний с участием по цепочкам отдаленных участников (рис. 2.1).

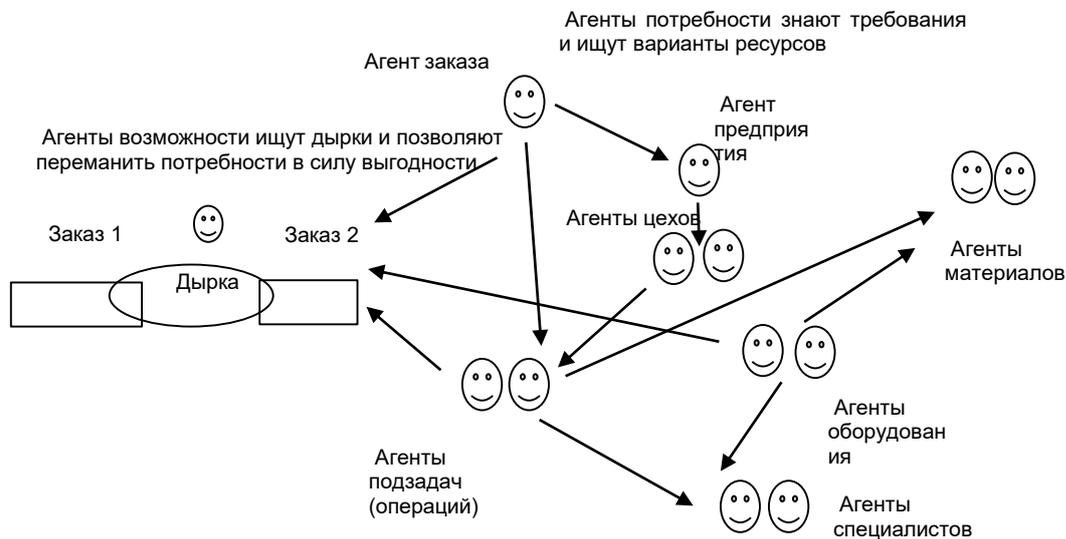


Рисунок 2.1 – Сцена мира заказов и ресурсов производства

Такой распределенный подход позволяет повышать сложность решаемых задач сколь угодно далеко, вводя новых агентов, например, для учета ремонтов станка, транспортировки продукции и т.д.

2.3.1 Функции удовлетворенности агентов

Для обеспечения оценки состояний агентов ПВ-сети вводятся функции удовлетворенности агентов [97,101, 121-123]. Каждый агент из описания предметной области получает набор атрибутов, которые характеризуют внутренние переменные агента, часть из которых описаны как показатели (функции критериев). Например, для агента заказа – предельное время выполнения, максимальные затраты, качество и пр., для агентов ресурсов – загруженность, допустимое время простоя, прибыль и аналогичные. Неотрицательная функция удовлетворенности агента, рис. 2.2, показывает удовлетворенность в зависимости от величины x_i компоненты показателя i по

сравнению с заданным идеальным значением по каждой компоненте показателя x_i^{ideal} и принимает значения от 0 – полностью неудовлетворенное состояние и до 1, когда агент полностью удовлетворен значением показателя. Функции удовлетворенности задаются в кусочно-линейном виде и хранятся в онтологии. Идеальные значения показателей могут быть недостижимы и задаются экспертами в предметной области, исходя из эвристических соображений. Практика применения в реальных системах показала, что достаточно использования треугольных, трапециевидных, s-образных и других функций аналогичного вида.

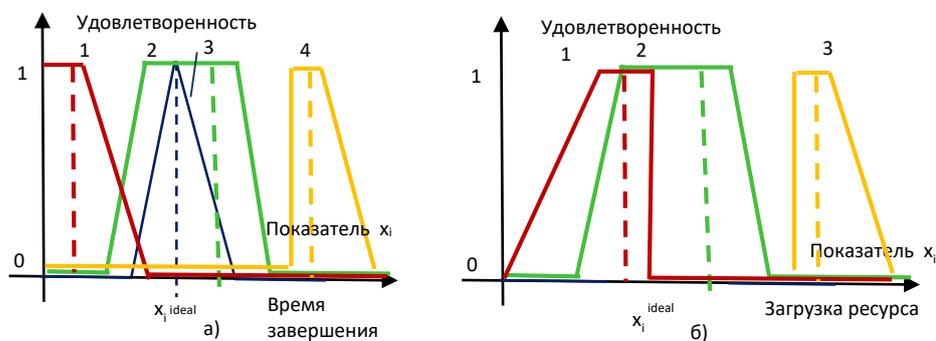


Рисунок 2.2 – Примеры функций удовлетворенности заказов а) 1 – планирование «как можно раньше», JIT, 2,3 – планирование в диапазоне, 4 – планирование «точно в срок», ASAP; ресурсов б) 1 – стремление ресурса к малой загрузке, 2 – стремление к средней загрузке, 3 – стремление к большой загрузке. Штриховыми линиями отмечены предпочитаемые («идеальные» значения или диапазоны) критериев.

Компоненты показателей удовлетворенности ресурсов, задач, продуктов имеют веса «относительной важности» (определяются экспертами и хранящиеся в базе знаний), $\{\alpha_{ij}\}$, $i=1, \dots, I$, – для ресурсов, I – размерность пространства показателей ресурсов, $j=1, \dots, J$, J – количество ресурсов, $\{\beta_{mn}\}$, $m=1, \dots, M$, – для задач, M – размерность пространства показателей задач, $n=1, \dots, N$, N – количество задач, $\{\gamma_{kp}\}$, $j=1, \dots, K$, – для продуктов, K – размерность пространства показателей продуктов, $p=1, \dots, P$, P – количество агентов продуктов. Задачи могут иметь свой приоритет $w^{task} \in [0, 1]$, ресурсы – $w^{res} \in [0, 1]$, продукты – $w^{prod} \in [0, 1]$.

Вводится также агент подразделения («штабной агент»), один на каждом уровне предприятия со своими показателями $\{\delta_l\}$, $l=1, \dots, L$, L – размерность пространства показателей подразделения. В отличие от теории активных систем [79], штабной агент подразделения не управляет распределением ресурсов, а только определяет критические участки расписания и предоставляет при возможности агентам задач и ресурсов виртуальную валюту для их изменения другим агентам.

Для подсчета удовлетворенности по показателям будем применять скалярную свертку, в которой каждый показатель входит со своим весом (за исключением штабного агента). Удовлетворенность подсистемы агентов ресурсов, задач, продуктов по совокупности показателей с учетом приоритетов (за исключением штабного агента) будут

$$\begin{aligned}
 u^{res} &= \sum_j w_j^{res} u_j^{res} = \sum_j w_j^{res} \sum_i \alpha_{ij}^{res} u_{ij}^{res} (x_i, x_{ij}^{id}), \\
 u^{task} &= \sum_n w_n^{task} u_n^{task} = \sum_n w_n^{task} \sum_m \beta_{mn}^{task} u_{mn}^{task} (y_m, y_{mn}^{id}), \\
 u^{prod} &= \sum_p w_p^{prod} u_p^{prod} = \sum_p w_p^{prod} \sum_k \gamma_{kp}^{prod} u_{kp}^{prod} (z_k, z_{kp}^{id}), \\
 u^{dep} &= \sum_l \delta_l^{dep} u_l^{dep} (s_l, s_l^{id}),
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned}
 u^{res} &\rightarrow \max, \\
 u^{task} &\rightarrow \max, \\
 u^{prod} &\rightarrow \max, \\
 u^{dep} &\rightarrow \max.
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Агенты ресурсов, задач, продуктов, предприятия стремятся повысить свою удовлетворенность, чтобы суммарная удовлетворенность системы возрастала.

2.3.2 Функции бонусов и штрафов

Для применения концепции виртуального рынка, наряду с компонентами удовлетворенности введем компоненты функций бонусов (значение больше

нуля) и штрафов (меньше нуля) для каждой компоненты показателя x_i , выраженные в единицах условной виртуальной валюты. Счета в виртуальной валюте дают агентам возможность оценивать в денежных единицах изменения показателей и участвовать в торгах между конфликтующими агентами, выплачивая компенсацию при ухудшении состояния. Первоначальные суммы виртуальных денег определяются тарифными сетками ресурсов и стоимостью задач. Таким образом, наличие денежных средств позволяет агентам выкупать выгодные места, а ресурсам – поднимать цену мест в расписании, которые пользуются спросом. В отличие от функции удовлетворенности, область значений штраф-бонусной функции лежит в $(+\infty, -\infty)$, вид функций также определяется экспертами в предметной области и имеет кусочно-линейный вид, рис. 2.3. Применение бонус-штрафных функций, связанных с каждым агентом системы, дает агентам возможность в проактивной стадии планирования изменять расписание рыночным способом.

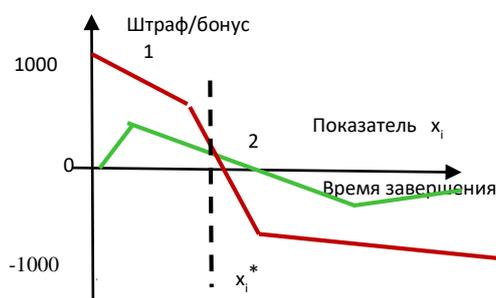


Рисунок 2.3 – Компоненты штраф-бонусных функций агентов

Для некоторых агентов изменения в критериях ведет к небольшим изменениям в виртуальных счетах, для других – к значительным, и они охотнее продают или обмениваются слотами времени в получении прибыли. На рис. 2.3 агент задачи 1 в окрестности точки x_i^* при смещении влево имеет большой бонус, за счет которого он выкупает занятый агентом 2 слот времени, хотя агент 2 при смещении вправо штрафует, но компенсация со стороны агента 1 позволяет ему уступить. При наличии платы за установление связей постепенно

запас валюты заканчивается, и расписание стабилизируется. Например, при наличии 100 ед. валюты и стоимости коммуникаций в 10 ед. при плоском уровне штраф-бонусов в 1 единицу, агенты смогут не более 10 раз изменить расписание.

Добавление виртуальной валюты повышает активность агентов в процессах перестройки расписания, и служит аналогом своеобразной энергии агентов.

2.4 Адаптивное планирование оперативного распределения производственных ресурсов

Далее для обозначения исполняющего задачу ресурса используется термин «Ресурс», который в конкретном случае заданной предметной области может быть подсистема планирования производства изделий определенного вида, система управления грузоперевозок, система планирования цепочек поставок, система управления проектами и др. В качестве ресурсов могут выступать станки, оборудование, производственные линии, цеха, грузовики, а также и людские ресурсы – исполнители с определенной квалификацией и производительностью выполнения операций. Далее понятия «ресурс», «исполнитель», «машина», (в теории расписаний иногда используется термин «прибор») будут использованы как синонимы. При описании систем планирования принято исполняющий ресурс называть обобщенным термином «Машина», подразумевая сущность для выполнения данной абстрактной операции или работы.

Поступающие в мультиагентную систему заказы (задачи, заявки на обслуживание), состоящие из операций (последовательных или параллельных подзадач), которые должны быть выполнены на ресурсах разного типа. Каждый заказ j характеризуется приоритетом, временем поступления, предельным временем окончания, стоимостью, штрафной функцией за единицу времени по критерию k . В запланированном расписании с каждой работой будут связаны реальная дата старта, равная времени начала первой операции (подзадачи) и реальная дата окончания. Операция i , входящие в работу j , $o(i,j)$ описывается типом ресурса i (или его специализацией), длительностью, зависящей,

возможно, от выбранного в «кластере» ресурсов (производительности). В незапланированной операции (подзадаче) длительность задана как некоторая оценка. В запланированной операции будут присутствовать время старта и окончания. При последовательном типе операций время начала работы равно времени старта первой операции, окончания работы равно времени завершения последней операции. Заказы, содержащие параллельные операции, декомпозируются в работы, состоящие из ветвей операций, а исходный заказ–декомпозируется в работы только с последовательным характером операций.

2.4.1 Микроэкономика 1-го и 2-го уровня

Взаимодействие и оценка динамических планов производится с помощью рыночного подхода, когда все показатели могут быть оценены некоторым денежным эквивалентом. Агенты задач стремятся в локальных актах взаимодействий с другими агентами и ресурсами повысить свою удовлетворенность, компенсируя возможные ухудшения другим агентам, если это приводит к росту общей удовлетворенности системы. В качестве основного метода учета многокритериальности используется метод скалярной свертки.

В ходе исследований было выяснено, что важно значение для управления процессами построения расписаний в ходе самоорганизации агентов играет микроэкономика виртуального рынка, которая может определяться не только физическими тарифами на услуги и стоимостью ресурсов (стоимость водителя, амортизация грузовика и т.д.), но и стоимостью самого процесса планирования, который можно подсчитать, введя зарплату агентов или стоимость решения ими типовых задач предметной области (построение расписания, прокладка маршрута и т.д.).

Например, в парадоксальных случаях может оказаться, что стоимость построения очень сложного плана для некоторого грузовика может быть много больше, чем стоимость самой перевозки груза.

В этой связи предложено работу агентов в системе осуществлять на основе микроэкономики двух уровней:

- 1) микроэкономика 1-го уровня: расчет плановых показателей затрат использования ресурсов, например, для грузовика это бензин, оплата водителей и т.д.;
- 2) микроэкономика 2-го уровня: управленческая стоимость построения расписания при приходе нового события, точно отражающей индивидуальные накладные расходы для каждого события, зависящие от складывающейся ситуации – стоимость переговоров, построение маршрутов и т.д.

Это открывает совершенно новые возможности для управления процессами самоорганизации и повышения качества и эффективности планирования.

Например, определенные фрагменты расписания могут оказаться очень дорогими, если часто перестраивались, и тогда их не рекомендуется трогать, если осталось мало времени или заказ не имеет большую прибыль.

Все это позволяет направлять процессы вычислений, анализируя соотношение «Value/Cost» – в частности, не бросаться перестраивать те части расписания, где в не ожидается высокий выигрыш.

Функционирование системы планирования в реальном времени основано на мультиагентном планировании задач и операций. Каждая задача может состоять из множества технологических операций, связанных последовательно или параллельно, и требующих для их выполнения производственных или людских ресурсов.

В зависимости от предметной области в мультиагентном подходе предлагается использовать следующие модели ценообразования при проведении переговоров – модель фиксированной стоимости ресурсов и модель разделения стоимостей.

2.4.2 Модель фиксированной стоимости ресурсов

В модели фиксированной стоимости ресурсов задача тратит часть первоначального бюджета, равную для простоты стоимости задачи, на покупку места на ресурсе, согласно прайс таблице, определяемой себестоимостью ресурса с учетом запрашиваемой прибыли. Себестоимость задается кусочно-

линейной функцией для всего интервала горизонта моделирования. Тогда изменение численного значения горизонта автоматически перемасштабирует ценовую функцию. Поскольку в данной модели покупается рабочее время, то стоимость работы будет пропорциональна длительности и цене единицы времени интервала.

Первоначальный бюджет ресурса равен 0, первоначальный бюджет каждой работы тоже равен нулю. При планировании из стоимости будут вычитаться затраты на работу ресурса, то есть в любом случае, прибыль у не запланированной работы равна нулю, а у запланированной – меньше стоимости. Прибыль агента ресурса складывается из сумм использованных слотов времени для размещения задач. Поскольку никаких штрафов в этой постановке не используется, сумма затрат агентов работ равна выручке агентов ресурсов.

Считается, что в данной модели потерь нет и планирование бесплатное. Деньги, заплаченные на планирование, возвращаются ресурсом задаче полностью, если она снимается с планирования, однако согласно начальной установке, это означает сброс прибыли в нуль. Если была включена проактивность, компонента бюджета от проактивности будет сохранена.

Планирование предполагается проводить в 2 стадии, регулируемые прямым включением и отключением:

- 1) бесконфликтное распределение задач по ресурсам с учетом предпочтений и временных ограничений;
- 2) проактивное улучшение прибыли со стороны работ за счет перепланирования с компенсацией.

Проактивность со стороны агентов ресурсов отсутствует.

2.4.2.1 Алгоритм бесконфликтного планирования в модели фиксированной стоимости ресурсов

Алгоритм планирования состоит из нижеперечисленных шагов.

1. задается направление алгоритма – ASAP или JIT.

2. Задается опция отбора ресурсов по количеству невыполненных работ в плане или по загруженности ресурса (то есть способ переброски работ в зависимости от количества или от временной загруженности ресурсов).
3. Задача согласно своим опциям попадает на произвольный ресурс.
4. Производится фильтрация ресурсов по загруженности или по длине очереди.
5. Для каждого варианта таблицы предпочтений оценивается стоимость размещения по простой схеме суммирования затрат на выполнение, без штрафов и бонусов, однако с учетом ограничений по времени.
6. Работа планируется на ресурс, находящийся на верхней строчке таблицы предпочтений. Если это невозможно из-за стоимостей ресурса, – то на следующий. Возможна ситуация, что работа вообще не запланируется из-за низкой стоимости и высокой цены ресурса. Индекс перепланирования инкрементируется, бюджет становится равным стоимости работы минус затраты на ресурс.
7. Вычисляются времена начала и окончания, опережения и задержки.
8. Ресурс увеличивает свой бюджет на указанную им стоимость и вставляет работу в расписание.
9. Из двух одинаковых по затратам вариантов выбирается вариант с наименьшим планируемым временем окончания, т.е. подразумевается лексикографический порядок сортировки вариантов – сначала по затратам, затем по времени окончания.

2.4.2.2 Проактивность со стороны задач

Поскольку штрафные функции не учитываются, то изначально большими возможностями обладают задачи с большой стоимостью и малым объемом. Объем влияет на продолжительность, и таким образом, на возможную длину смещений по цепочке вправо по расписанию. Глубина вложенности по разрешению конфликтов задается в сцене.

Выполняется следующая последовательность действий.

1. Агент сцены ранжирует все невыполненные, но запланированные работы с ненулевым бюджетом по величине отклонения срока окончания от предельного времени, $(endTime_i - dueDate_i) / budget > 0$. Этим определяется таблица активностей (неудовлетворенности). Чем больше отклонение и чем меньше прибыль, тем больше неудовлетворенность агента своим состоянием. Управление передается верхнему агенту.
2. Проактивный агент вначале по своей таблице предпочтений фильтрует ресурсы, затем агент находит конфликт по положению с агентом другой работы. Если такого конфликта нет, то либо производится сдвиг влево, либо переход к другому ресурсу по предпочтениям, либо управление передается следующему в таблице активностей агенту.
3. При обнаружении конфликта не ищется точка равновесия (частичное смещение по компромиссу, вычислительно сложный процесс), а запрашивается полное смещение с пересчетом цены слотов ресурса. При постоянных ценах слотов и отсутствии штрафов проактивная задача всегда сместит конфликтующую работу (с учетом временных ограничений по переменной $readTime$ предыдущей работы и текущему времени и шагов вглубь по цепочке), с выплатой ей компенсации при удорожании слотов на сумму удорожания). Если удорожания не происходит, то компенсация не перечисляется. То есть происходит улучшение положения без затрат.

Без штрафных функций процесс проактивности косвенно управляется разницей цен на слоты и зависящий от первоначальной «ценности» работ. В данной формулировке проактивность приводит к некоторому равновесию в количестве улучшения состояния не очень ценных работ.

2.4.2.3 Проактивность со стороны ресурсов

Проактивность агентов ресурсов осуществляется следующим образом.

1. При поступлении новой работы оценивается прибыльность размещения.
2. При отсутствии конфликтов работа просто планируется.

3. При наличии пересечений и достаточной прибыли от новой работы агент распланирует мешающую невыполненную работу с компенсацией ей убытков по её бюджету. При этом счет агента ресурса уменьшается на сумму бюджета запланированной ранее работы, но увеличивается на стоимость выполнения новой работы. Вытесненная работа имеет ненулевой бюджет и инкрементируется индекс перепланирования. То есть вытесняются малоценные и небольшие по времени работы.

Таким образом, сценарий фиксированной стоимости ресурсов решает задачу размещения работ по ресурсам с быстрым вычислением показателей и с дальнейшим улучшением за счет проактивности работ или ресурсов. Проактивность в данной стратегии, при отсутствии штрафных функций, вводится для реализации попыток выйти из локальных минимумов с учетом имеющегося бюджета агентов на улучшения.

2.4.3 Разделяемая стоимость слотов времени

В задачах планирования динамических ресурсов (управление грузоперевозками, роением спутников, беспилотников, цепочками доставок и др.) автор предлагает использовать модель разделяемой стоимости (shared cost), когда агенты задач (грузов) совместно потребляют ресурс и платят за него также совместно, пропорционально характеристикам потребностей каждого агента.

Модель разделяемой стоимости предполагает, что со стороны работ (задач) покупаются не единицы рабочего времени, как в модели фиксированных цен, а ресурс целиком в течение какого-либо промежутка времени. Такая переформулировка задачи связана с необходимостью непротиворечивого введения разделения цен на ресурсы для их одновременного использования ресурса несколькими задачами. В модели принимается, что производительность ресурса целиком расходуется в данный момент на выполнение текущего количества задач. Для удобства формулировок предлагается горизонт времени

моделирования T , который задается внешним образом, разделить на заданное число K «слотов» продажи. Естественное деление стоимостей каждого ресурса таблицей стоимости интервалов избавило бы от введения такого дополнительного параметра, однако, учитывая произвол в установке цен на отрезки каждого ресурса, возможна ситуация, когда эти отрезки слишком велики, и задачи не смогут вначале выкупить весь ресурс полностью. Поэтому внешнее деление представляется способом преодоления таких трудностей. Учитывая неравномерность цен по промежуткам каждого ресурса, потребуется на основании таблиц цен найти новые таблицы цен слотов продаж по заданному новому разбиению, которое для простоты может быть равномерным.

Итак, у каждого ресурса, наряду с таблицей стоимости от времени, имеется таблица стоимости продаваемых слотов времени, полученная путем пересчета. При достаточно мелких делениях горизонта моделирования таблица продаваемых слотов по форме функции будет повторять таблицу внутренних цен.

Сущность стратегии разделяемой стоимости ресурсов заключается в следующем.

1. Вне зависимости от требуемой продолжительности работ на ресурсе, продаются слоты целиком, то есть интервалы продаваемых слотов полностью покрывают задачу, возможно, с избытком.
2. Задача обязана сразу оплатить все купленные слоты.
3. В дальнейшем, в фазе проактивности, поставщиком ресурсов может являться и запланированная задача, продавая неиспользуемое время другим задачам и получая от этого компенсацию, пропорционально проданному времени. Таким образом, для задач производится разделение первоначальной стоимости на несколько работ, без участия ресурса. Это аналогично консолидации грузов при перевозке, что снижает стоимость каждому участнику.

4. Возможен возврат слотов ресурсам без потери стоимости.

Чтобы такой механизм работал, нужно, чтобы продаваемые слоты по длине были в среднем сравнимы с объемом работ на каждом ресурсе (если деление слишком мелкое, то эффекта перераспределения стоимости за счет перепродаж не будет).

Из-за особенностей ценообразования в данной модели запуск плоской стадии планирования должен производиться с большим соотношением исходной стоимости задач, чем в стратегии фиксированных цен, т.к. вначале хотя бы часть задач должна быть способна выкупить с «избытком» слоты ресурсов.

2.4.3.1 Алгоритм бесконфликтного планирования в модели разделяемой стоимости

Бесконфликтное планирование описывается таким же алгоритмом, что и в модели фиксированной стоимости, с отличием в цене ресурсов и способе продажи слотов последующим задачам. Проданные слоты изымаются из обращения, то есть заведомо расписание этой фазы будет разреженным. Здесь возможно два варианта: поступающие задачи изначально проактивны и могут покупать часть неиспользуемого времени у запланированных задач. Задачи первоначально максимально тратят свои деньги на покупку дискретных порций рабочего времени ресурсов, и расписание 1-й фазы самое дорогое по затратам задач и поэтому довольно разреженное.

2.4.3.2 Проактивное перераспределение затрат в модели разделяемой стоимости

На фазе проактивного взаимодействия агентов начальное расписание, полученное путем обтекания конфликтов, уплотняется за счет вторичного перераспределения затрат со стороны работ для совместного использования проданного слота времени с компенсацией в пропорциональных долях.

1. Повторяет пункт проактивного алгоритма фиксированных цен.

2. Проактивный агент (№1) задачи, зная ресурс, на котором запланирован, запрашивает агента №2, препятствующего слева по оси времени, возможность продать часть слота. Если перемещения этого препятствующего агента не требуется, то есть сдвиг влево возможен за счет лишнего закупленного времени, то излишек времени может быть продан агентом №2 агенту №1 по стоимости, пропорциональной разделяемой части слота. Это произойдет, если агент №1 вернет ресурсу неиспользуемый слот времени, получит возврат стоимости, и баланс позволит ему купить часть рабочего слота агента №2. То есть агент №1 предварительно должен оценить предполагаемые изменения, запросив у агента №2 стоимость части времени.

Продажа происходит по той же цене слота, что и у ресурса. Однако, продается часть времени, поэтому затраты агента 1 меньше. На рис. 2.4 и 2.5 рассмотрено планирование для направления JIT, ASAP рассуждения такие же, только со сдвигом вправо, а не влево.



Рисунок 2.4 – Агент 1 в стадии проактивности покупает часть слота времени у агента 2. После перепродажи будет:

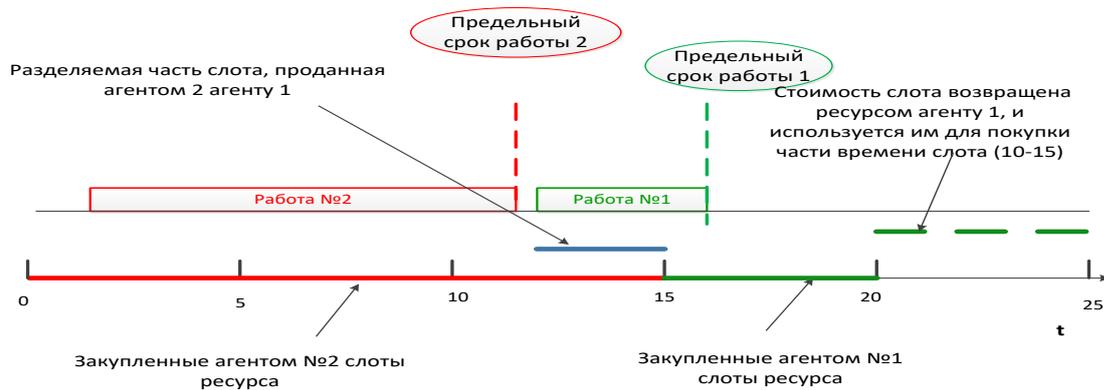


Рисунок 2.5 – Разделяемая часть слота времени совместного использования агентами

Если штрафные функции не используются, то абсолютно аналогично может быть рассмотрен сдвиг влево и агента работы №2, если время поступления позволяет.

На рис. 2.6 отображаются слоты времени, стоимость которых возвращена агентом ресурса.

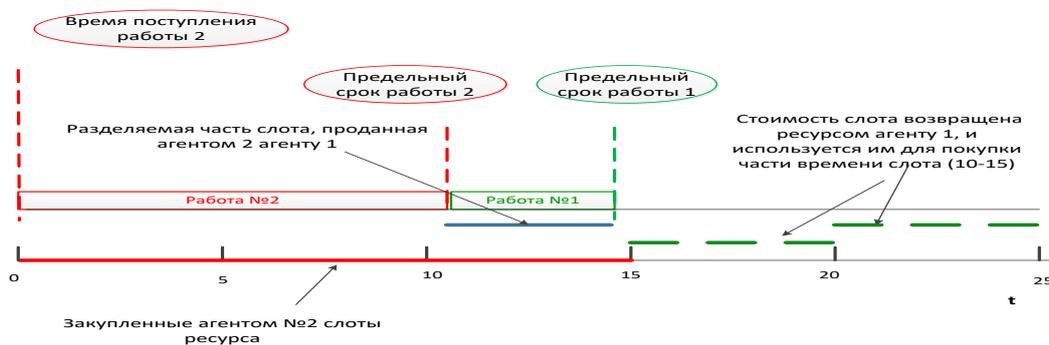


Рисунок 2.6 – Разделяемая часть слота времени совместного использования агентами и возвращенные ресурсу слоты.

Проактивное поведение агентов основано на применении описываемого ниже метода «узкого звена».

2.5 Метод «узкого звена» построения расписаний

2.5.1 Краткое описание сущности метода «узкого звена»

Цель агента задачи – быть запланированным на подходящий ресурс, потратив наименьшую сумму виртуальных денег и получив максимальную

прибыль за счет бонусной части штрафной функции (или же минимизировать убытки, если штрафы вычитаются – при неудачном размещении).

При этом в определенных случаях агенты могут попадать в локальные оптимумы, из которых не могут выбраться даже при работе в режиме проактивности – бюджетных ресурсов одного агента не хватает, чтобы вытеснить другие группы агентов.

В этой связи в настоящем разделе предлагается метод, в котором с помощью переговоров штабного агента с худшими агентами в расписании тестируется возможность их выхода из локальных оптимумов и определяется сумма, которой им не хватает для улучшения наиболее худших показателей – находится «узкое звено», которое препятствует повышению показателей.

Если такая сумма имеется у штабного агента, то делается проба точно (адресно) улучшить расписание. Активность каждого агента работы зависит от степени удовлетворенности и от текущего виртуального бюджета.

Предлагаемый метод «узкого звена» состоит в следующем (на примере обработки события «появление нового заказа»).

1. Агент поступившего заказа считывает из базы знаний технологический процесс, который позволит создать продукт или оказать услугу.
2. Создается Агент технологического процесса (может быть несколько при наличии альтернативных процессов).
3. Агент технологического процесса получает требования заказа к исполнению и создает Агентов задач (операций).
4. Агенты задач отправляют запросы всем ресурсам необходимого типа с описанием требований и предлагаемой цены.
5. Агенты ресурсов, оценивая свои текущие расписания и значения показателей, подсчитывают стоимости и времена выполнения, на начальной стадии избегая конфликтов.

6. Агенты задач сообщают о своих вариантах исполнения Агентам технологических процессов, которые аккумулируют и анализируют информацию, чтобы помочь задачам запланироваться каким-либо начальным образом.
7. Агент заказа выбирает то предложение, которое является наилучшим в текущей ситуации по наименьшей цене и ближайшему к предельному сроку заказа на основе модифицированного протокола контрактов.
8. Если удовлетворительных предложений нет и расписание не складывается, но еще есть время на поиск и анализ вариантов, то начинают рассматриваться варианты с конфликтами и делается запрос агентам уже ранее запланированных задач на предмет возможности освободить место и перебросить их для выполнения на другие ресурсы или произвести сдвиги для размещения неудовлетворенного заказа, с предварительным анализом вариантов стоимостей, удовлетворенностей и рассчитываемой по ситуации компенсации ухудшений сдвигаемых или перераспределяемым заказам.
9. Агенты ресурсов при своей недостаточной загрузке снижают виртуальную стоимость оставшихся свободными слотов расписания или повышают её для пользующихся особым спросом в случае высокой загрузки.
10. После завершения первой фазы начального планирования в работу вступает вторая фаза проактивного улучшения, когда каждый агент заказа или ресурса по своим показателям делает попытку улучшить решение.
11. Ресурсы опрашивают заказы на других ресурсах, а заказы – другие ресурсы для получения предложений по перестроению расписания. Если предложенное решение улучшает локально пересчитываемые показатели системы в целом, то оно принимается, если нет – отвергается.
12. Если ни один из агентов не может улучшить свое состояние и состояние системы в целом – завершается вторая фаза проактивного улучшения плана и фиксируется решение задачи для пользователя.

13. Далее по желанию пользователя или в автоматическом режиме начинается третья фаза – в дело вступает штабной агент, который пытается определить «худшие» участки расписания по выбранным критериям, которые не удалось исправить проактивностью заказов и ресурсов.
14. Найденные наиболее проблемные участки (заказы, технологические процессы, связанные задачи и ресурсы) сохраняются и далее могут быть локально распланированы, после чего им может быть изменена задача – даны новые требования с измененными в нужную сторону значениями весовых коэффициентов, в направлении улучшения выбранных критериев с худшими значениями.
15. В ходе нового планирования даже если у агента не получается добиться улучшения ранее полученного результата, то в ходе переговоров будет получена новая оценка цены для возможного достижения требуемых улучшений и соответствующая сумма с возможным приростом ценности может быть запрошена от штабного агента в обмен на предложение улучшить результат системы в целом.
16. Если результат улучшается, то новое решение фиксируется и старое отбрасывается (стирается), иначе процесс может продолжаться.
17. При этом в любой момент пользователь может остановить процесс вычислений и интерактивно (вручную) осуществить перераспределение заказов между ресурсами и изменение расписания, что будет сопровождаться автоматическим пересчетом и выводом основных показателей (или заморозить расписание).

Схема алгоритма приведена на рис. 2.7. Аналогично выполняется обработка и в случае других событий, например, если ресурс выходит из строя, его агент находит и снимает запланированные на время недоступности заказы. Агент каждого заказа заново начинает свою работу и находит новый ресурс для

своего выполнения или разрешает конфликты с уже запланированными заказами.

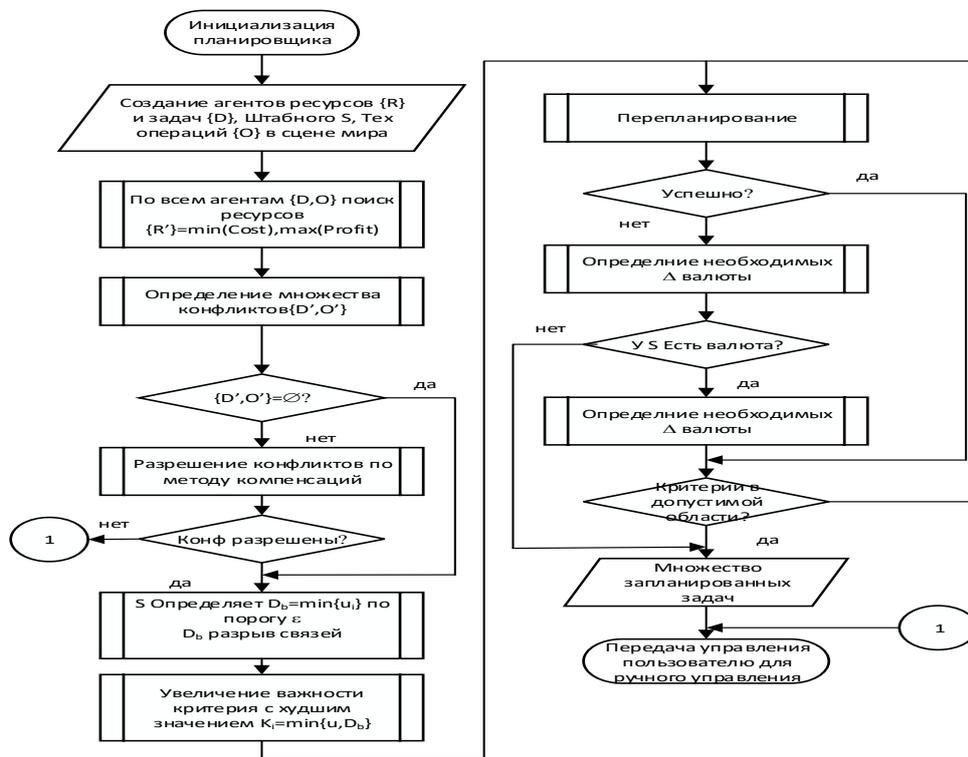


Рисунок 2.7– Блок-схема алгоритма метода «узкого звена»

Изменение показателей планирования в предлагаемом методе производится при сравнении компонент критериев (рис. 2.8) с идеальными или со средними по группе агентов, и проводится в итерационном алгоритме путем компенсаций потерь при переходах агентов для улучшения своих показателей.

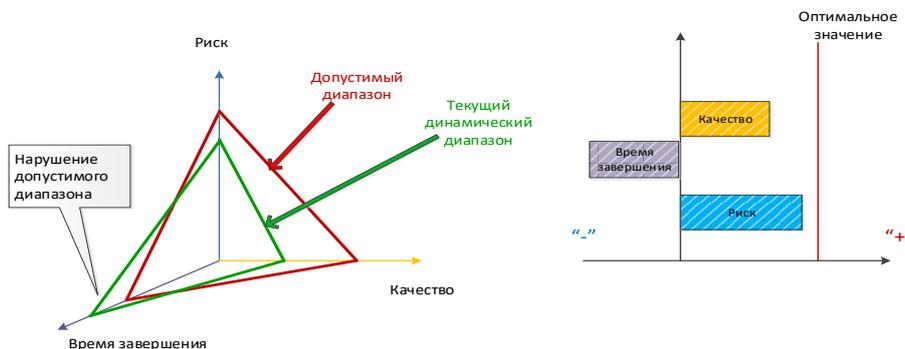


Рисунок 2.8 – Текущие значения компонент целевой функции и область допустимых значений

В зависимости от величины текущего показателя компоненты целевой функции агента задачи выбираются в кусочно-линейном виде с характерным видом, который может быть различным по форме для разных компонент вектора показателей, с максимумом в оптимальном значении. Чем резче пик, тем больше чувствительность целевой функции к отклонениям от оптимума, чем шире основание, тем слабее зависит функция от неоптимального значения, и расписание меньше зависит от деталей решения для данной компоненты. Варьируя через пользовательский интерфейс форму и параметры функции, можно увеличивать и уменьшать подвижность агентов, рис. 2.9.

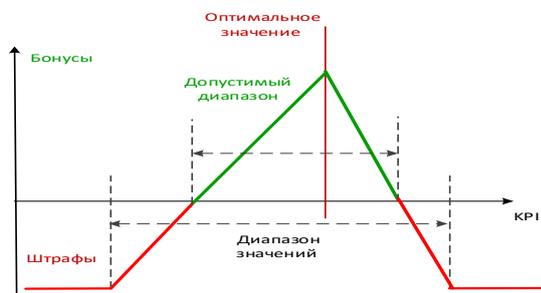


Рисунок 2.9 – Зависимость компоненты целевой функции агента от значения показателя

В каждом акте взаимодействия агентов работ (переговорах) агент определяет значения своей целевой функции и бюджет по текущему состоянию. Бюджет находится через бонус-штрафную функцию и расходуется на перестройку расписания. Чем ближе состояние к оптимуму, тем выше показатель, и одновременно агенту не требуется виртуальных денег на улучшения, и его активность в этом смысле меньше. Чем дальше текущее значение от оптимума, тем меньше функция удовлетворенности, но при наличии виртуальных денег агент может использовать на компенсации и улучшать показатели. Таким образом, каждый акт взаимодействия будет актом купли-продажи с использованием денежных ресурсов агента.

Далее будут рассмотрены на уровне протокола обмена сообщениями все стадии подхода.

2.5.2 Стадия предварительного планирования

Предполагается, что в конкретный момент времени существует сложившаяся непротиворечивая сцена мира исполняющих ресурсов, и все работы и операции запланированы или отсутствуют. В начальный момент план отсутствует. Локальные расписания ресурсов («машин») хранятся в каждом ресурсе, все переменные состояний заполнены, виртуальный денежный счет у каждого агента работ заполнен. Протокол взаимодействия агентов на этой стадии представлен на рис. 2.10:

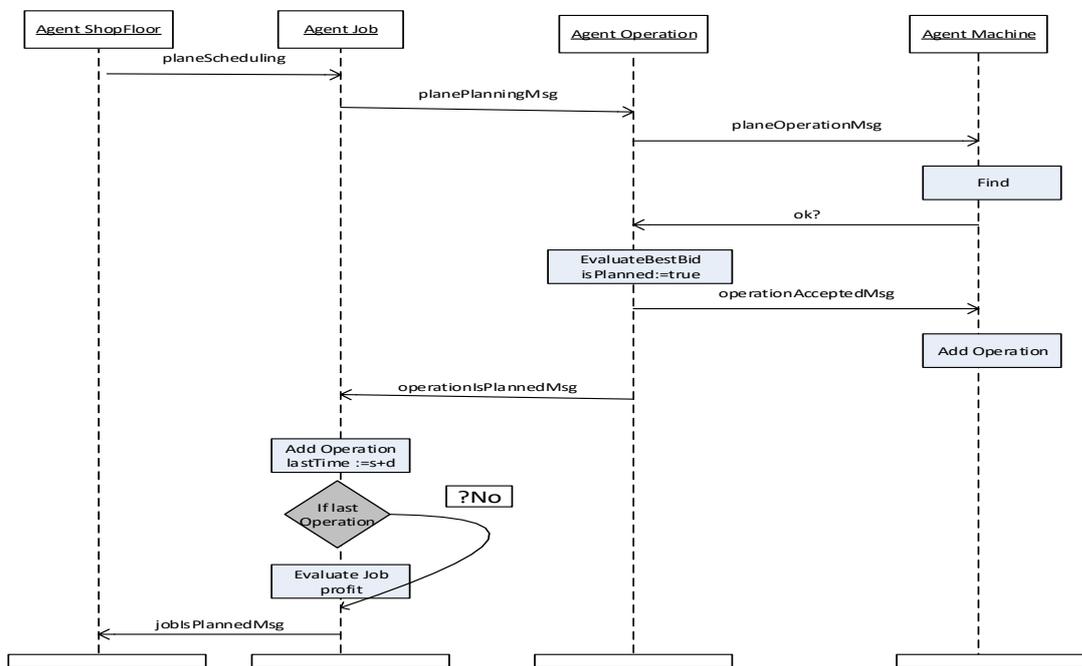


Рисунок 2.10 – Диаграмма последовательности сообщений при поступлении сообщения предварительного планирования

При поступлении каждой новой работы в цех создаются соответствующие агенты работы и операций.

Проактивное состояние агентов отключено, поскольку требуется быстро и без конфликтов запланировать. Способ и эвристика планирования определены через онтологию.

В случае прямого порядка агент работы создает сообщения своим операциям (подзадачам) в прямой последовательности, соответствующей

порядку перечисления типов ресурсов в онтологии, или же в обратной, т.е. первой в очереди отправки будет сообщение для последней операции. Логика обратного порядка не отличается от логики прямого порядка за исключением переменных времени.

Вычисление текущих показателей каждой работы (`evaluateJobProfit()`) проводится следующим способом. Переменная `modeCriterion` устанавливается у работы сообщением `planeSchedulingMsg`, в котором задан тип (одно- или многокритериальный, в случае одного критерия выставлена компонента u_k , которая будет использоваться в виде оценочной функции. При предложенном подходе для вклада в оценку удовлетворенности применяется компонента целевой функции, имеющая наименьшее значение. Удовлетворенность и бюджет вновь вычисляется с учетом новых значений всех компонент целевой и бонусной функций.

2.5.3 Стадия проактивности. Метод компенсаций

Нахождение партнеров по переговорам и рекурсия волн представлены на диаграмме рис. 2.11.

Агент ресурсов, при получении сообщения `jobsPlanningMsg`, обновляет все свои показатели- суммарную прибыль, нормированные значения усредненных критериев. Затем ранжирует список всех работ по штрафу за опоздание в порядке убывания. Список будет динамически перестраиваться в результате функционирования алгоритма. Первому в списке агенту работ отсылается сообщение `changeProactivityMsg(true, wave, job id)`, включающее проактивность данного агента работы с указанием порядка вложенности.

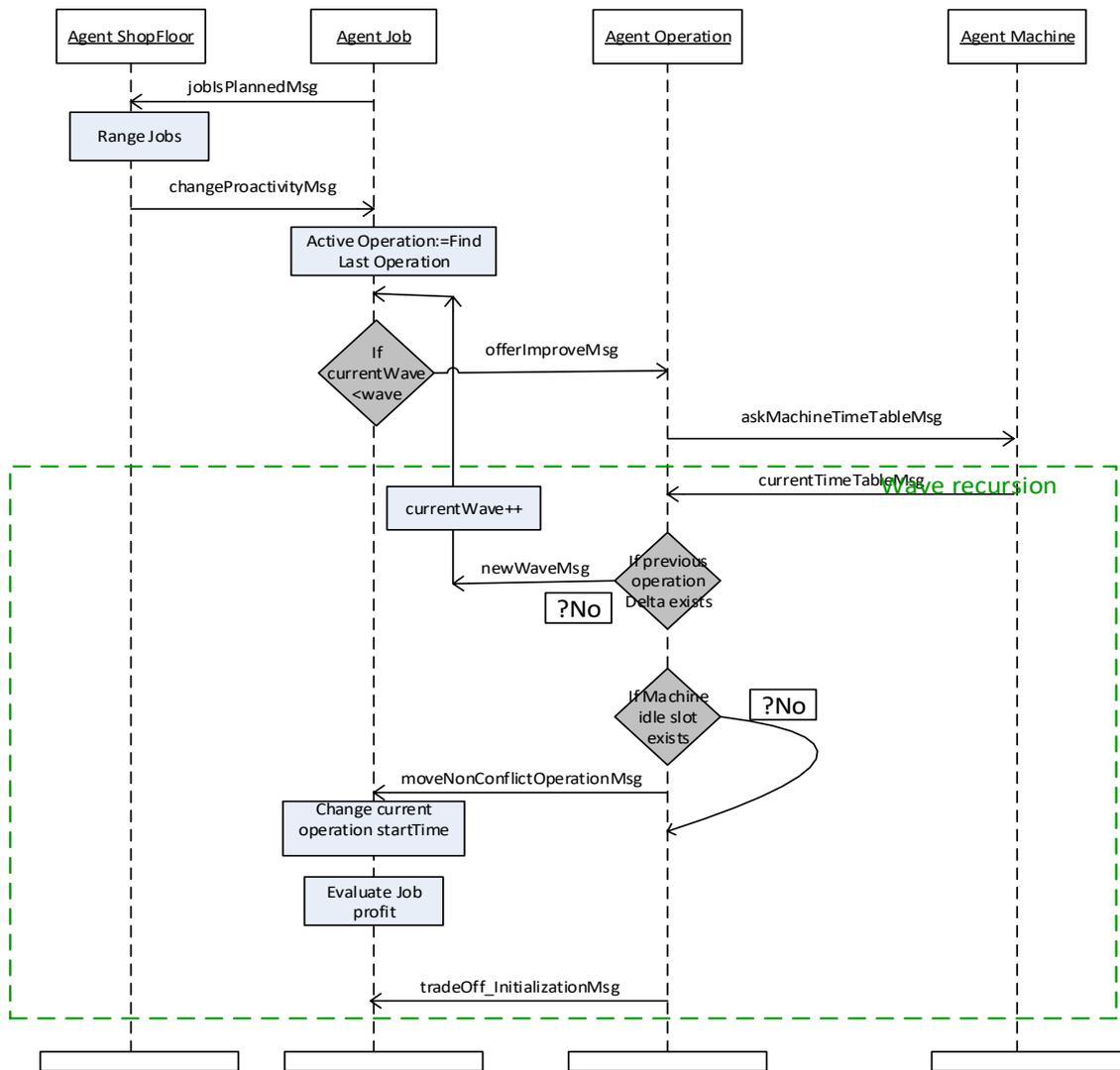


Рисунок 2.11 – Диаграмма начала проактивной фазы и рекурсия волн переговоров. Последовательности сообщений при поступлении сообщения jobsIsPlanningMsg об окончании предварительного планирования

Работа находит последнюю свою операцию и посылает сообщение со значением величины времени задержки. Отсылаются также данные о предыдущей операции в этой работе, её идентификатор и времена начала и окончания и текущее значение порядка волны вложенности.

Далее, операция анализирует выбор партнера для отсылки сообщения об изменении времени начала операции – т.е. о сдвиге или прыжке влево по времени. Для этого нужно узнать, находится ли она встык со своей предыдущей

операцией, существует ли технологическое ограничение по порядку, может ли данная работа сама уплотниться влево на 1 шаг передвигаемой данной операцией, или нет, при снятии всех ограничений по ресурсам.

Если не может уплотниться, то организовывается следующий порядок «волны». Работа проверяет, не превышен ли порядок волны и не есть ли это самая первая операция, и, если нет, тогда посылает новое сообщение об изменениях.

Если же иницирующая операция не лежит встык с предшествующей ей в работе, то есть её $statDate < endDate$ технологически ей предшествующей, то получается, что она может сдвинуться на эту разницу (или её часть), если бы не было конфликта по данному ресурсу (люфт мог образоваться из-за отмены предыдущей операции, а стадий проактивности не было). Обладая расписанием своего ресурса, операция либо передвигается бесконфликтно, либо посылает сообщение своей работе с указанием соседней по ресурсу слева операции.

Изменения в положениях агентов операций производятся на основе метода компенсаций, в котором перестановки происходят в случаях, когда компенсация уступающему место агенту со стороны сдвигающего превосходят ухудшение целевой функции.

2.5.4 Многокритериальный метод компенсаций

Рассмотрим компенсации по положению.

Компоненты оценочной функции должны зависеть от положения или/и длительности операций, иначе любые их перестановки и изменения никак не скажутся на значении оценки стоимости, поэтому будут постоянными. Это означает, что постоянные компоненты, не зависящие от временных атрибутов работ и операций, не могут быть в составе целевых функций.

Если целью предыдущего блока было выполнить возможные сдвиги в расписании и организовать очередную волну переговоров для нахождения

операции и работы, во взаимодействии с которой будет получено оптимизированное по нескольким критериям расписание. Причем этот блок декомпозирован до корректировки только 2-х операций из 2-х работ. Эти корректировки носят характер волн, организация и отсечение которых производятся в блоке, описанном выше.

Отсечка лишних в глубину сложных переборов вариантов движений должна быть по прибыли (деньгам), которые остаются у заказа, т.к. каждый шаг съедает часть денег.

Агент работы 2 определяет запас сдвига предыдущей операции. Если он достаточен, то агент 2 оценивает новое состояние вектора показателей, и при положительном увеличении обновляет состояние времен операции, отправив сообщение агенту работы 1, рис. 2.12.

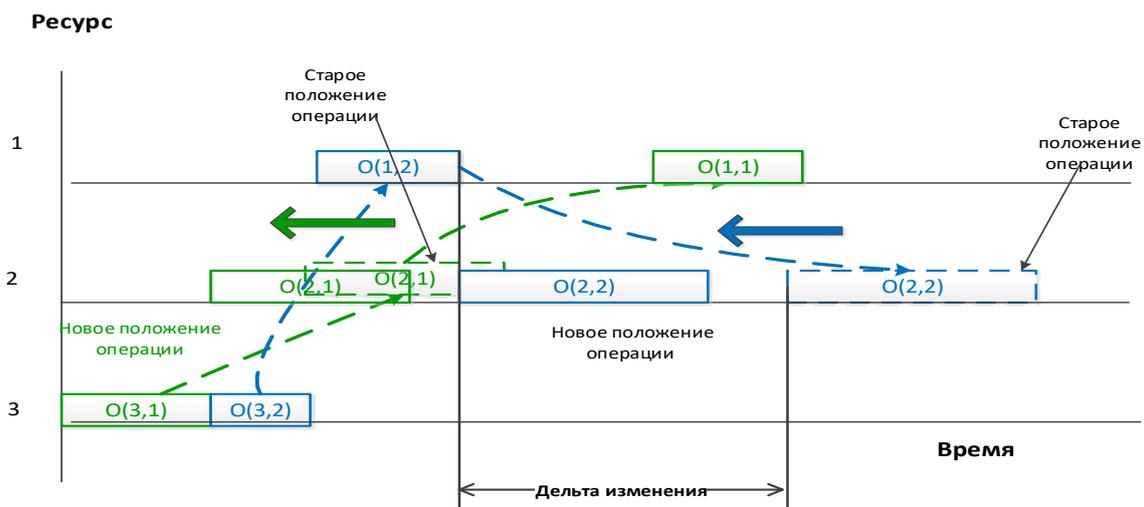


Рисунок 2.12 – Агент работы 2 сдвигает влево свою операцию O(2,2). Предыдущая для него технологически операция O(1,2), препятствующая движению – операция O(2,1).

Штриховыми прямоугольниками показаны старые положения операций, штриховыми стрелками – связи между операциями одной работы

Если такого запаса по сдвигу влево нет, то анализируется возможный сдвиг(своп) вправо, что означает увеличение продолжительности и, возможно, с генерацией нового порядка волны переговоров, рис. 2.13:

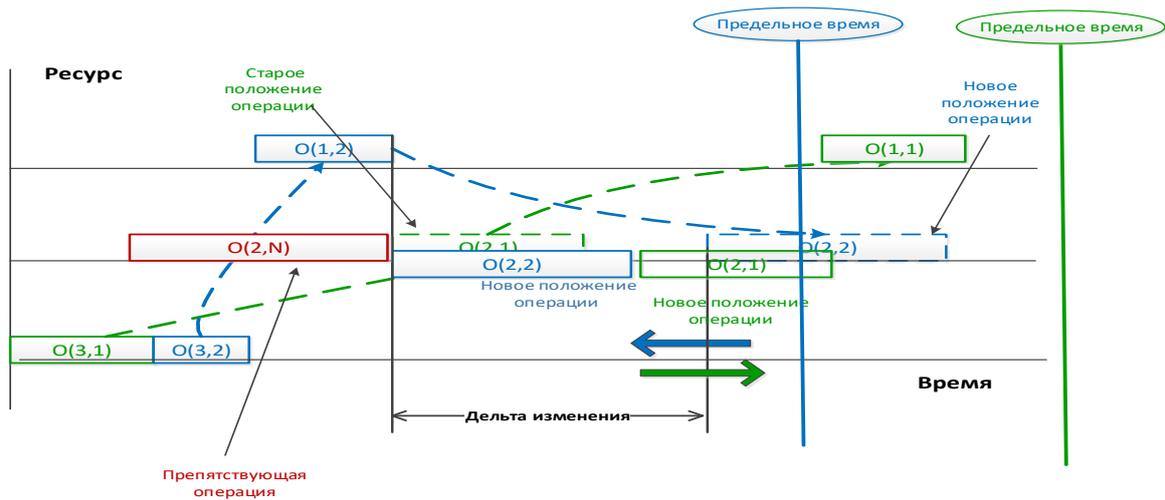


Рисунок 2.13 – Агент работы 2 меняется положением своей операции $O(2,2)$ с агентом работы 1

Если происходит ухудшение в состоянии агента работ 2, то компоненты оценочной функции f , удовлетворённости \vec{u} и штрафная скалярная функция для агента работ 2 по временным значениям отсылаются для анализа агенту работы 1. Они содержат данные о новых векторных компонентах показателей и новый бюджет, рис. 2.14.

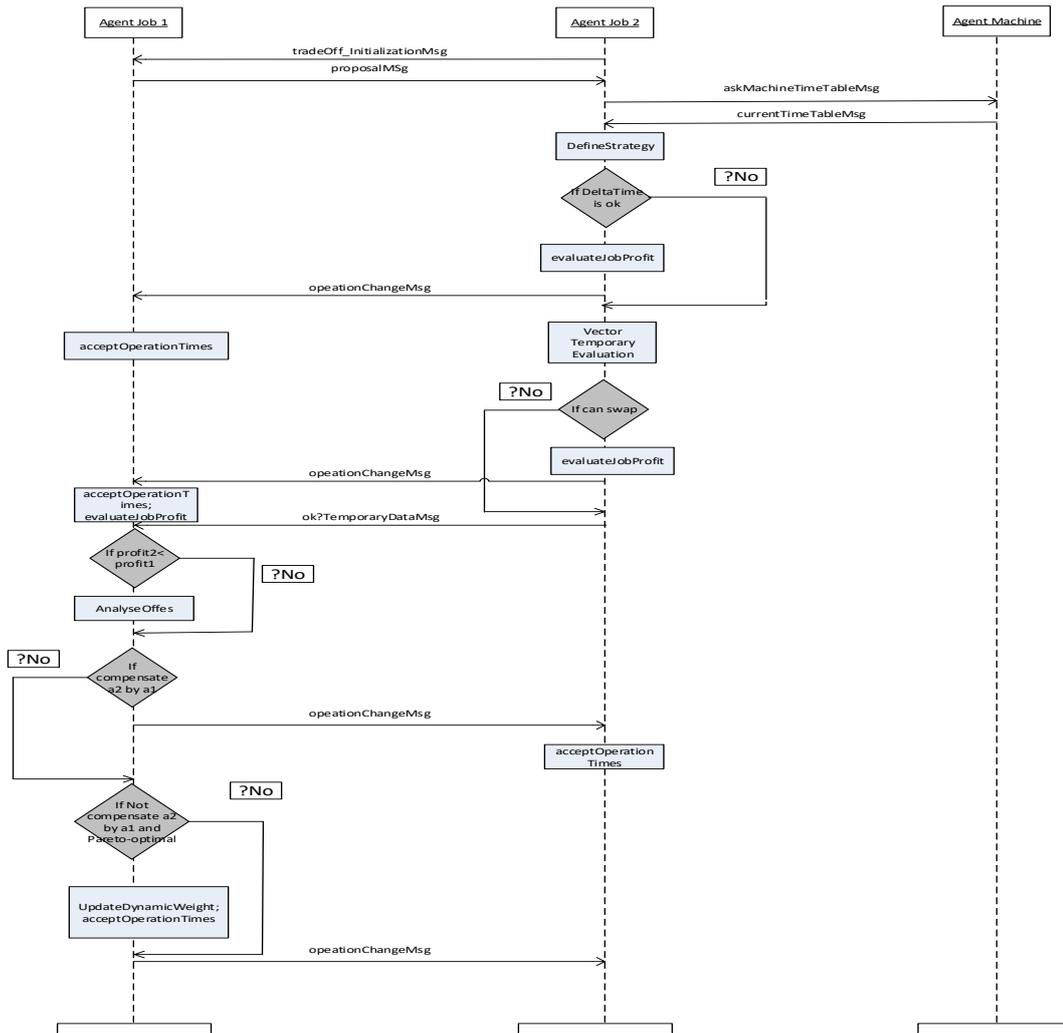


Рисунок 2.14 – Диаграмма сообщений компенсации по ухудшению состояния в положении агента 2 улучшением состояния положения агента 1

Агент работы 1 производит анализ выгоды или невыгоды предложения следующим способом. Сравнивается, компенсирует ли ухудшение состояния агента работы 2 прибылью от улучшения состояния агента 1. Если суммарное значение нового бюджета агентов работ 1 и 2 превышает старое значение суммарного бюджета, то предложенное изменение положений выгодно, если нет, то проводится дополнительная проверка компонентов целевой функции. Из двух векторов выбирается Парето-оптимальный, или, если они не сравнимы, выбирается «лучший» в лексикографическом порядке. Если новые значения лучше, а по бюджету – хуже, то система оказалась в

неравновесном состоянии, т.е. динамические коэффициенты весов показателей $\vec{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_k)$ не отражают ситуации улучшения некоторых критериев и нуждаются в корректировке. Нужно повысить вес тех компонент весов, которые приводят к возрастанию компонент функции удовлетворенности, и наоборот:

$$\alpha_k \rightarrow \alpha_k(1 + \Delta u_k / u_k) \quad (2.4)$$

где α_k – текущее значение веса показателя k по x_k , Δu_k и u_k – изменение удовлетворенности компонента по показателю x_k .

В случае невозможности улучшений состояния в перестановках, агент работы использует сценарий компенсации путём ухудшения показателей, связанных с длительностью.

Если оба предыдущих случая были отвергнуты, то агент работы 1 может попробовать ухудшить своё (или конфликтующей работы) состояние по группе показателей.

Если вариант оказывается выгодным, то вычисляются новые времена всех затронутых операций данной работы и показателей и отсылаются сообщения соответствующим ресурсам об изменении, рис. 2.15:

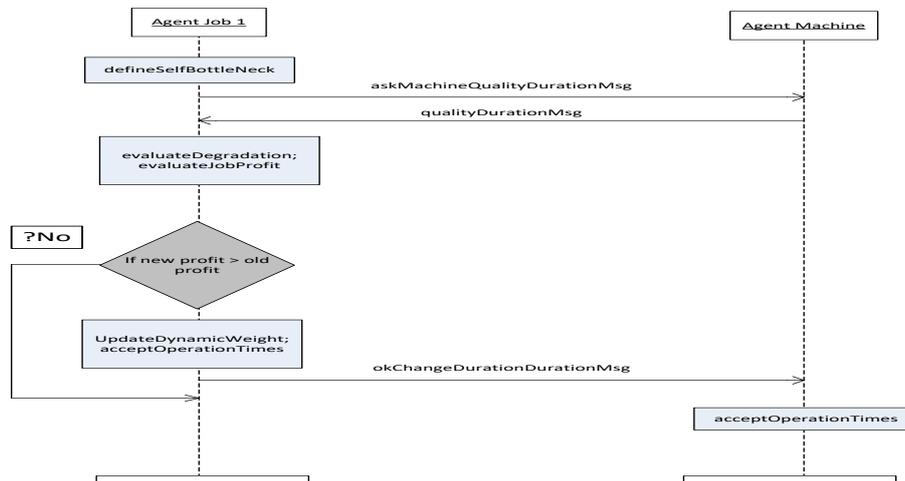


Рисунок 2.15 – Диаграмма сообщений компенсации по ухудшению показателей, связанных с длительностью критической операции агента 1 улучшением состояния положения этого же агента 1

Проход метода компенсации завершен.

Агент кластера ресурсов обновляет все свои атрибуты – суммарную прибыль, значения показателей и удовлетворенностей $\vec{u}(u_1, \dots, u_k)$. Затем ранжирует список всех работ и выбирает верхнюю работу, «наиболее проблемную». Далее процесс продолжается поиском нового партнера по переговорам.

Мультиагентная система при динамическом построении расписания реагирует на непредвиденные события, такие как, например, недоступность ресурсов, изменение их характеристик, поступление новых задач, изменение параметров запланированных задач.

2.5.5 Реакция на непредвиденные события

При изменении, например, доступности ресурсов и их характеристик, поступает сообщение, запускающее протокол изменений, рис. 2.15:

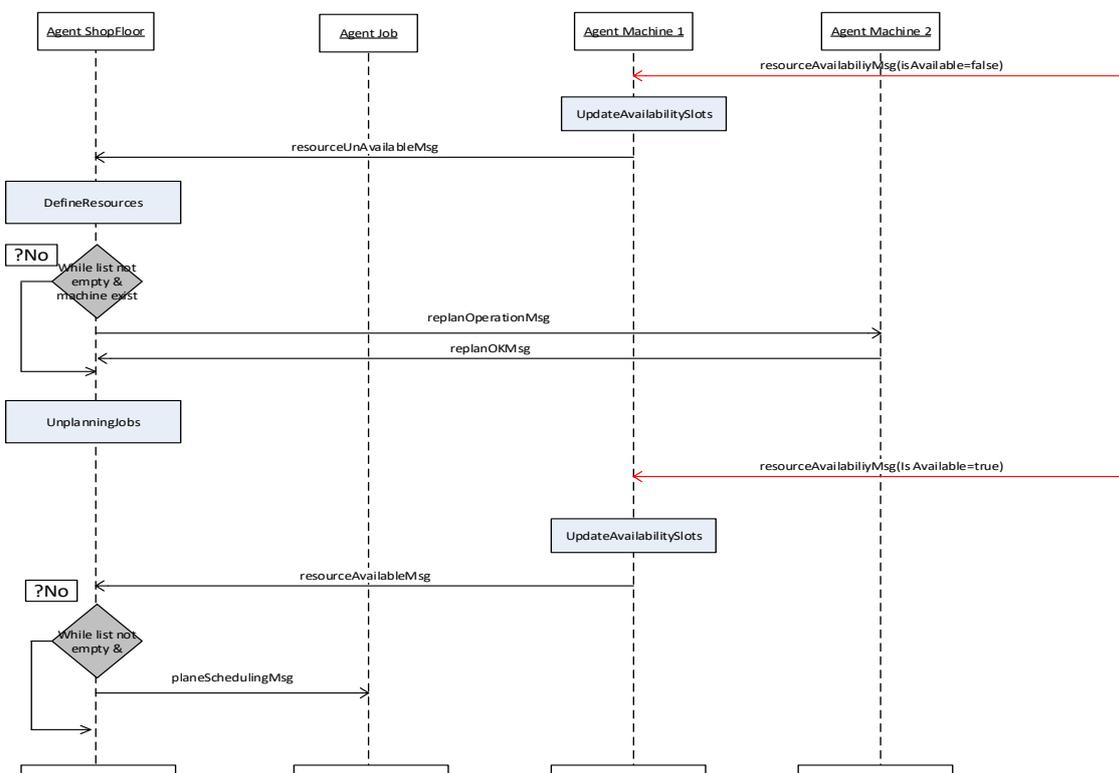


Рисунок 2.15 – Диаграмма сообщений при реакции на внешнее непредвиденное событие

При получении внешнего сообщения ресурс добавляет слот недоступности в список интервалов недоступности.

Если какой-либо ресурс, на котором запланированы операции работ, с определенного момента времени стал недоступен, то он посылает сообщение кластеру ресурсов с идентификатором ресурса, моментом недоступности и списком запланированных задач и операций.

Предлагаемый способ позволяет произвести планирование работ с многокритериальной целевой функцией. Пример применения метода приведен в экспериментальных исследованиях. При этом система стремится повышать свою удовлетворенность, не смотря на мешающие внешние воздействия. Через пользовательский интерфейс или внешние события можно корректировать направления установления равновесия, например, через стимулирование отдельных агентов добавлением виртуальных денег, или же изменением распределения весов показателей внутри одного агента.

2.6 Методы разрешения конфликтов при планировании ресурсов

Заказ (задача) для мультиагентной системы является групповой задачей, которая состоит из отдельных связанных подзадач или операций. Структура возможных связей заказа может быть определена 4-мя видами:

- 1) отсутствие связей между операциями (подзадачами) – подзадачи не связаны и могут выполняться в произвольной последовательности;
- 2) предшественник – последователь: время окончания задачи 1 ограничивает время начала задачи 2;
- 3) время начала задачи 1 – ограничивает время начала задачи 2;
- 4) время окончания задачи 1 – ограничивает время окончания задачи 2.

Имеются также другие отношения (запуск регулярных задач по времени, по событию и др.), но они выходят за рамки данного исследования и не рассматриваются.

Комбинацией четырех типов вышеуказанных связей и заданием уровня детализации можно построить любую иерархию задач, подзадач(операций).

С точки зрения стратегий и параметров планирования важны поля, содержащие данные по планированию:

- 1) время директивного начала;
- 2) время директивного окончания (дедлайн);
- 3) запланированное время начала;
- 4) запланированное время окончания;
- 5) динамический приоритет (может изменяться в процессе планирования и выполнения);
- 6) объем работ (плановая трудоемкость), чел-час или станко-час;
- 7) фактическая себестоимость.

Фактические времена начала и окончания для целей планирования также существенны, они необходимы в процессах управления и контроля для расчета реальной стоимости заказа, реальной загрузки ресурсов, подразделений и исполнителей и т.д.

Задачам (подзадачам, операциям) для целей планирования должны быть сопоставлены:

- 1) тип связей с другими задачами;
- 2) возможность разделения задачи между ресурсами (это фактически возможность приостановки или переброски части на совместимый по типу ресурс);
- 3) времена планового и фактического начала и окончания;
- 4) объем работ;
- 5) требуемая квалификация или типы ресурсов исполнителей;

- б) вневременные количественные атрибуты (при многокритериальном планировании, например, качество работ, вероятность опоздания, прибыль, риск и др.);
- 7) дополнительные характеристики для взаимодействия агентов – функции удовлетворенности, штраф-бонусы, веса атрибутов, критерии целевых функций.

Ресурсы (исполнители):

- 1) тип ресурса по соответствиям задач;
разделяемость ресурса между задачами, т.е. одновременно может делать ряд задач, для разделяемого ресурса емкость определяется его производительностью и не требует дополнительного параметра. Квоты производительности выделяются равномерно по задачам;
- 2) квалификация для работников или качество выполнения для станочного ресурса;
- 3) производительность из нормативов, описывается коэффициентом 0,1-10 по отношению к средней по квалификации или производительности;
- 4) тариф стоимости рабочего времени в зависимости от временного интервала (рабочее и дополнительное время);
- 5) дополнительные характеристики для взаимодействия агентов – функции удовлетворенности, штраф-бонусы, веса атрибутов, критерии целевых функций.

Под конфликтом понимается такое состояние ресурсов и задач, когда невозможно выполнение заказа без выхода за предельный срок, поскольку часть ресурсов занята задачами других заказов, поэтому планируемые задачи не могут занять необходимые им места.

Далее предложены способы разрешения конфликтов.

Для упрощения рассмотрения объемы работ и времени выражены в сопоставимых единицах, производительности всех ресурсов равны 1.

2.6.1 Уход от конфликтов («обтекание»)

Имеется запланированная групповая задача GT1, состоящая из 2-х связанных подзадач T1, T2, выполняемых на неразделяемых ресурсах R1, R2. Штраф-бонусы предполагаются линейными пропорционально отклонению от предельного времени (дедлайна). Для реализации стратегии «как можно раньше» (ASAP) применима функция вида (рис. 2.16):

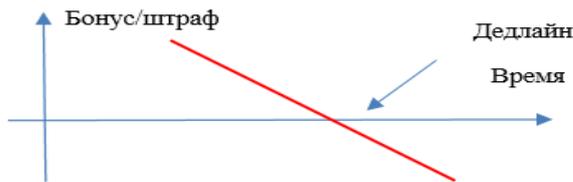


Рисунок 2.16 – Простейшая бонус/штрафная функция для стратегии ASAP

В момент 1 поступает новая задача, также состоящая из 2-х подзадач (1-й индекс подзадачи нумерует групповую задачу, 2-й – номер подзадачи,

соответствующий порядку выполнения. В скобках – ссылка на тип ресурса и объем равен длительности при единичной производительности ресурса). Приоритеты групповых задач одинаковы и равны 1 (умножаются на значения целевой функции и прибыли от выполнения). Исходные данные представлены в табл. 2.2. Для наглядности вычислений будем оценивать состояние задач только через штраф-бонусную функцию.

Таблица 2.2 – Параметры задач

Групп. задача	Момента	Групп. п. t_{start}	Групп. п. t_{end}	Дедлайн	Вирт. счет	Приоритет	Задачи (ресурс, объем)	t_{start}	t_{end}	Целевая функция
GT1	0	0	9	9	0	1	T1-1 (R1,4)	0	4	

Таблица 2.2 (продолжение)

							T1–2 (R2,5)	4	9	
GT2	1			13+1= 14	0	1	T2–1 (R1,6)			
							T2–2 (R2,7)			

Дедлайн 2-й задачи декларируется время начала плюс суммарная длительность связанных подзадач, что дает $1+13=14$. Виртуальные счета приняты равными 0. Согласно стратегии обтекания, подзадача T2–1 задачи может встать только после задачи T1–1, а подзадача T2–2 – после задачи T1–2:

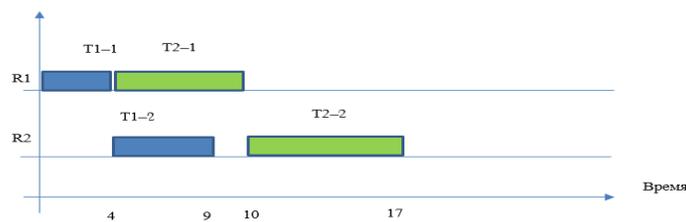


Рисунок 2.17 – Расписание 2-х задач при обтекании

Параметры задач представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3– Параметры задач после планирования

Групп. задача	Мом. готовности	Групп. t_{start}	Групп. t_{end}	Дедлайн	Вирт. счет	Задачи(ресурс, объем)	t_{start}	t_{end}	Целевая функция групповой задачи
GT1	0	0	9	9	0	T1–1 (R1,4)	0	4	0
						T1–2 (R2,5)	4	9	
GT2	1	4	17	13+1= 14	0	T2–1 (R1,6)	4	10	-3
						T2–2 (R2,7)	10	17	

Приоритеты одинаковы и равны 1, поэтому подсчет суммарной функции равен сумме функций по отклонению. Целевая функция групповой задачи GT1 равна 0, поскольку она уложилась в срок. Поскольку 2-я групповая задача GT2

вышла за дедлайн на 3 ед. по времени, то ее бонус/штраф равен -3. Суммарный показатель бонус/штраф для GT1, GT2 равен $0 - 3 = -3$. Суммарная прибыль равна $9 - 0 + 13 - 3 = 19$.

2.6.2 Сброс мешающей задачи из расписания

Задача GT1 имеет приоритет 1, виртуальный счет равен 0, GT2 имеет приоритет 10, виртуальный счет равен 10.

При использовании предыдущей стратегии и получившегося расписания прибыль от выполнения задачи GT1 равна $9 + 0 = 9$, от выполнения 2-й задачи равна $13 + 10 \cdot (-3) = -17$, суммарная прибыль будет $9 - 17 = -8$. Падение происходит из-за большого штрафа за опоздание 2-й задачи.

Если задачи были известны к моменту 0, но у GT2 время готовности равно 1, то в начальный момент модельного времени мешающая задача может быть снята с планирования. Случай сбрасывания 2-й подзадачи T1-2 при оставлении в расписании T1-1 в подходе штрафов противоречив, поскольку не дает оценить вариант из-за неопределенности времени выполнения групповой задачи. Если этот факт не учитывать, то тогда сброс может быть частичным, а показатель невыполненной задачи не учитывается.

Полное вытеснение

При отсутствии делимости задач и ресурсов 2-я задача GT2 своей первой задачей вытесняет из расписания подзадачи групповой задачи GT1, предлагает компенсацию по величине больше прибыли от выполнения, т.е. больше чем 9, в данном случае 10. Подзадачи T1-1 и T1-2 сбрасываются в буфер незапланированных задач, у GT1 теперь имеется виртуальный счет в 10 единиц (рис. 2.18).

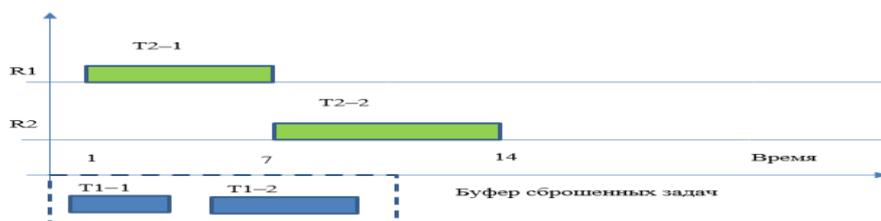


Рисунок 2.18 – Расписание 2-х задач при вытеснении

Параметры задач представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4– Параметры задач после вытеснения

Группа задачи	Момента готовности	Группа	Группа пр.	Дедлайн	Вирт. счет	Приоритет	Задачи(ресурс, объем)	t_{start}	t_{end}	Бонусная функция
GT1	0	-	-	9	10	1	T1-1 (R1,4)	-	-	0
							T1-2 (R2,5)	-	-	
GT2	1	1	14	13+1=14	0	10	T2-1 (R1,6)	1	7	0
							T2-2 (R2,7)	7	14	

После вытеснения суммарный показатель будет $0+13+0=13$, т.е. за счет уменьшения штрафов он возрос с -17 до 13 , несмотря на незапланированную групповую задачу GT1.

Частичное вытеснение

В случае частичного вытеснения незавершенная задача в суммарном показателе не учитывается, но из-за проактивности задач планирование произойдет на следующем такте, что приведет к сдвигу мешающей подзадачи, для наглядности длительность T1-2 увеличена до 7, чтобы мешала задаче T2-2, приоритеты равны 0.5 и 10, виртуальный счет GT2 равен 10, рис. 2.19:

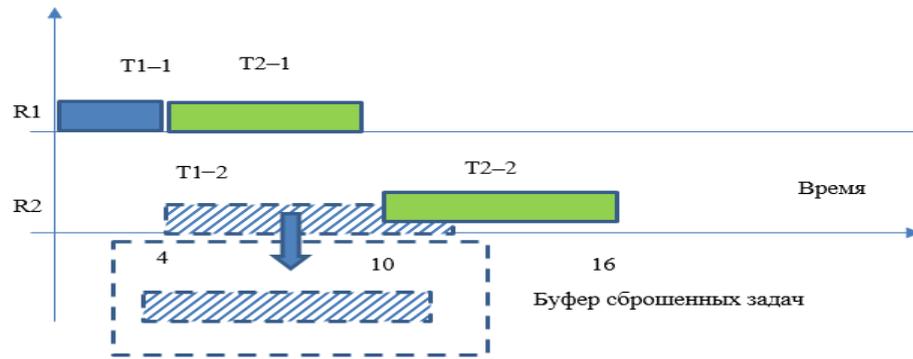


Рисунок 2.19 – Частичное расписание GT1, сброс подзадачи в буфер

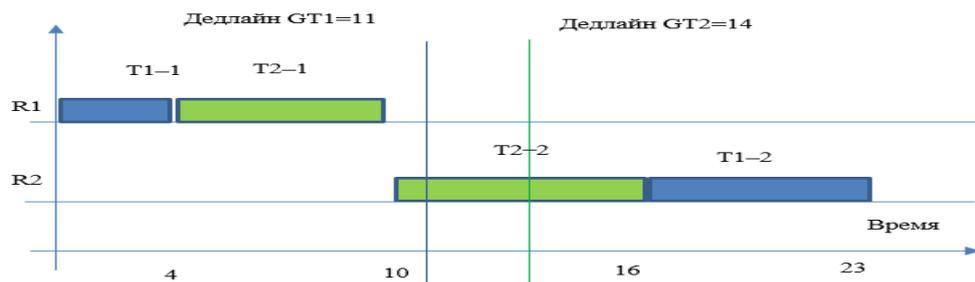


Рисунок 2.20 – План после частичного расписания и возврата задачи T1-2

Параметры задач после вытеснения и перепланирования представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5 – Параметры задач после вытеснения и перепланирования

Группа задачи	Момент готовности	Группа пр. п.	Группа пр. п. t_{end}	Дедлайн	Вирт. счет	Приоритет	Задачи(ресурс, объем)	t_{start}	t_{end}	Бонусная функция
GT1	0	0	23	11	6	0.5	T1-1 (R1,4)	0	4	-6
							T1-2 (R2,7)	16	23	
GT2	1	1	14	13+1=14	4	10	T2-1 (R1,6)	4	10	-20
							T2_2 (R2,7)	10	16	

Бонус/штраф для задачи GT1 равен $0.5 \cdot (11-23) = -6$, для задачи GT2 будет $10 \cdot (14-16) = -20$.

Прибыль равна $11-6+13-20=-2$.

При бесконфликтном обтекании прибыль была бы для этих данных $11+0+13+10(14-18)=24-40=-16$, за счет большого штрафа для задачи GT2.

2.6.3 Компенсация сдвига мешающей задачи

Если виртуальный счет групповой задачи GT2, равный 5, недостаточен для компенсации полного вытеснения подзадач GT1, то реализуется сдвиг (рис. 2.21 и 2.22):

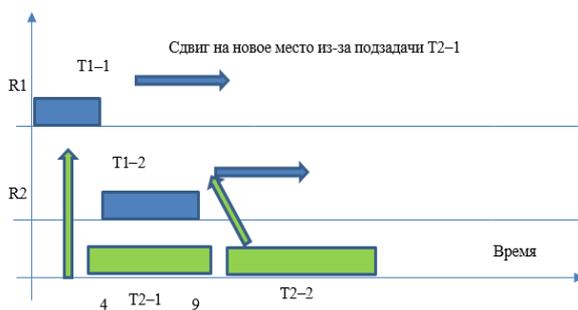


Рисунок 2.21 – Сдвиг задач GT1 под влиянием задач GT2

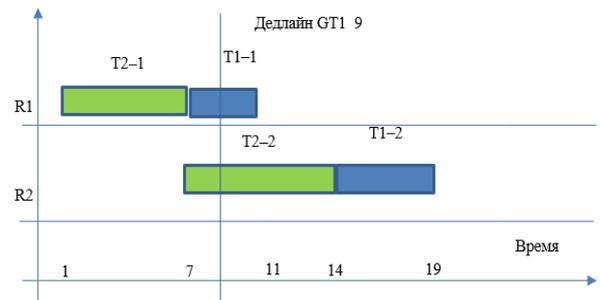


Рисунок 2.22 – Итоговое расписание GT1, GT2

Параметры задач после сдвига представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6 – Параметры задач после сдвига

Групп. задача	Момент готовности	Групп. п. t_{start}	Групп. п. t_{end}	Дедлайн	Вирт. счет	Приоритет	Задачи (ресурс, объем)	t_{start}	t_{end}	Бонусная функц
GT1	0	7	19	9	5	0.5	T1-1 (R1,4)	7	11	-4.5
							T1-2 (R2,5)	14	19	
GT2	1	1	14	$13+1=14$	0	10	T2-1 (R1,6)	1	7	0
							T2-2 (R2,7)	7	14	

В этом случае при бесконфликтном «обтекании» суммарный показатель был бы равен -8, за счет большого штрафа задачи GT2. В случае компенсации ухудшения виртуальный счет задачи GT1 будет равен 5, что превышает

ухудшение за счет опоздания. Поэтому суммарная прибыль будет равна $9 - 0.5 \cdot (19 - 9) + 13 + 0 \cdot 10 = 17$ единиц.

2.6.4 Увеличение производительности ресурсов при невозможности компенсации

Если функции бонус/штрафов задач растут быстро, и денег на виртуальном счете задач не хватает для компенсации, то, при условии платы за производительность ресурсам может быть реализована стратегия “ускорения”. Она возможна, если стоимость увеличения производительности растет быстро с дополнительной платой за ресурс, рис. 2.23.

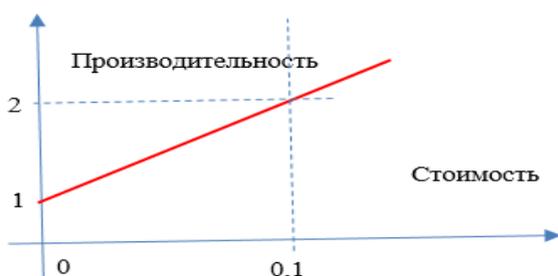


Рисунок 2.23 – Прирост производительности в зависимости от дополнительной оплаты

Интерпретация. Производительность ресурсов равна 1. При внесении на счет ресурса суммы в 0.1 ед., он увеличивает производительность в 2 (прирост на единицу) раза в течение 1-й единицы времени, или в 1.5 раза (прирост равен 0.5) в течение 2-х

единиц времени. Далее считается, что интервал прироста производительности задан. Приоритеты равны 1.

Подзадачи предполагаются неразделяемыми.

Виртуальный счет групповой задачи GT2 равен 1 (не хватает на компенсацию).

Таблица 2.7 – Параметры задач после планирования 1-й групповой задачи

Групповая задача	Момента готовности	Групповая плата	Групповая плата	Дедлайн	Виртуальный счет	Приоритет	Задачи (ресурс, объем)	t_{start}	t_{end}	Бонусная функция
GT1	0	0	9	9	0	1	T1-1 (R1,4)	0	4	0

Таблица 2.7 (продолжение)

							T1-2 (R2,5)	4	9	
GT2	1	0		13+1=14	1	1	T2-1 (R1,6)			
							T2-2 (R2,7)			

Предположим, что выполнение запущено, и подзадача T1-1 не может быть сброшена. В момент готовности задачи GT2 агент GT2, предлагая компенсацию, получает отказ. Обратившись к ресурсам R1 и R2, он расходует свой виртуальный счет на оплату увеличения производительности с момента времени, равного 1 до момента 5,5 для 1-го ресурса и с момента 5,5 до 10,5 для 2-го ресурса. На оплату пойдет $(4,5+5) \cdot 0,1 = 0,95$. В таком случае, часть задачи T1-1 (равная 1) выполнена, а после этого производительность ресурса R1 увеличивается в 2 раза, оставшаяся часть задачи T1-1 (объем равен 3) планируется на ресурсе, занимая в 2 раза меньше времени ($3/2=1,5$). Групповая задача GT2 планирует свою подзадачу T2-2 раньше подзадачи T1-2 (выгоднее по бонусам/штрафам). Расписание представлено на рис. 2.24.



Рисунок 2.24 – Конечное расписание при увеличении производительности ресурсов

Параметры задач представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8 – Параметры задач после планирования GT1, GT2 с измененной производительностью

Групп. задача	Момент готовности	Групп. п. t _{start}	Групп. п. t _{end}	Дедлайн	Вирт. счет	Приоритет	Задачи (ресурс, объем)	t _{start}	t _{end}	Бонусная функция
GT1	0	0	11.5	9	0	1	T1-1 (R1,4)	0	2.5	-2.5

Таблица 2.8 (продолжение)

							T1-2 (R2,5)	9	11.5	
GT2	1	2.5	9	13+1=14	0.05	1	T2-1 (R1,6)	2.5	5.5	+5
							T2-2 (R2,7)	5.5	9	

В результате показатель для групповой задачи GT1 будет $9-2,5=7,5$, для задачи GT2 он будет равен $13+5=18$, суммарный $=25,5$. В бесконфликтном случае было бы $9+0+13-3=19$ (табл. 2.2). На виртуальном счете GT2 остается 0,05 ед.

2.6.5 Делимость ресурсов для задач

Предполагается, что на увеличение производительности ресурсов требуется значительные затраты, т.е. коэффициент наклона производительности мал, но стоимость совместного использования за единицу времени невелика и позволяет использовать делимость. С другой стороны, эта опция может быть задана онтологически, как свойство самих ресурсов, с оплатой со стороны задач единицы времени ресурсов. Зададим стоимость ресурсов в единицу времени постоянной, рис. 2.25.

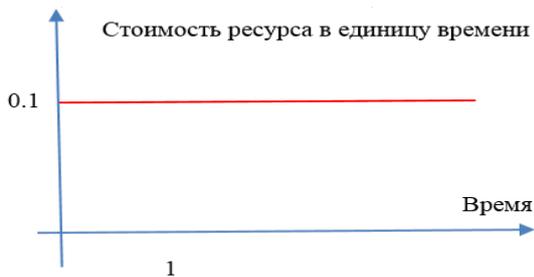


Рисунок 2.25 – Стоимость ресурсов R1, R2 в зависимости от времени

Приоритет задач одинаков и равен 1, виртуальный счет задач GT1 и GT2 – по 2. В таком случае, групповая задача GT1 начинает выполнение монопольно, затем производительность ресурсов, равная 1, делится равными долями между подзадачами GT1 и GT2, увеличивая длительность выполнения в области одновременного выполнения подзадач T1-1 и T2-1, рис. 2.26.

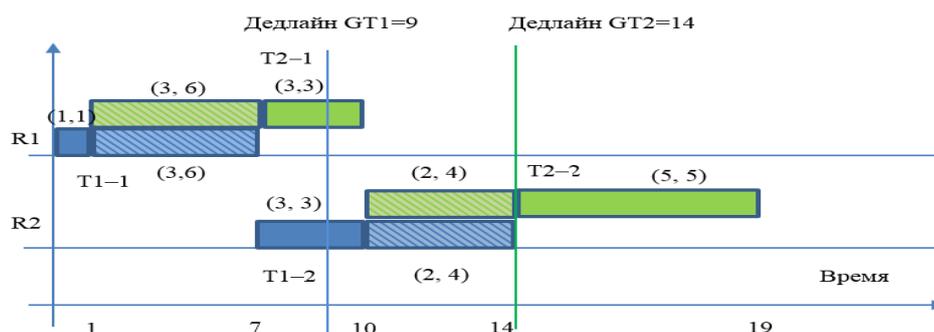


Рисунок 2.26 – План при разделении ресурсов

Штриховкой показаны части задач, выполняющиеся одновременно, с увеличением длительности. Числа над прямоугольниками на рис.2.26 показывают объем и текущую продолжительность для частей подзадач. Сами задачи неделимы, но части их выполняются одновременно, с увеличением длительности.

Параметры задач после планирования представлены в табл. 2.9.

Таблица 2.9 – Параметры задач после планирования GT1, GT2 с разделяемыми ресурсами и производительностью

Гру п. зад ача	Мо ме нт ГОТ ОВН ОСТ И	Г ру п п. t_{start}	Гру пп. t_{end}	Дедла йн	В ир т. сч ет	П ри ор ит ет	Задачи (ресурс, объем)	t_{start}	t_{end}	Бон усн ая фу нкц ия
GT1	0	0	14	9	0,6	1	T1-1 (R1,4)	0	7	-5
							T1-2 (R2,5)	7	14	
GT2	1	1	19	13+1=14	0,2	1	T2-1 (R1,6)	1	10	-5
							T2-2 (R2,7)	10	19	

Затраты на оплату ресурсов задачей GT1 будут равны $0,1 \cdot (7+7) = 1,4$, задачей GT2: $0,1 \cdot (9+9) = 1,8$, прибыль от планирования GT1 с учетом штрафов $= 1 \cdot (4+5) - 5 = 4$, прибыль от планирования GT2 с учетом штрафов равна $1 \cdot (6+7) - 5 = 8$. Суммарная прибыль равна 12 ед.

В данном случае увеличилось опоздание задач GT1 и GT2 по сравнению с бесконфликтным обтеканием, что привело к падению прибыли на 7 ед. Однако, теперь ресурсы загружены без простоев между задачами.

2.6.6 Дробление поступающих и запланированных задач

Поступающие задачи

Дробление поступающих задач эффективно при созданном расписании типа «точно в срок» (JIT) расписании, когда расписание имеет промежутки между задачами, а уплотняться влево они не могут из-за времен готовности и планирования «точно в срок». Поступившая с низким приоритетом длинная задача планируется в последнюю очередь. Допустив делимость такой задачи, возможно полностью уплотнить расписание, рис. 2.27 и 2.28:

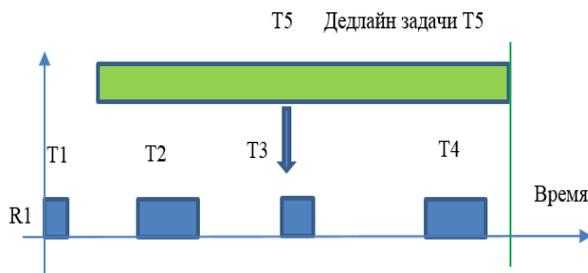


Рисунок 2.27 – Поступление продолжительной задачи

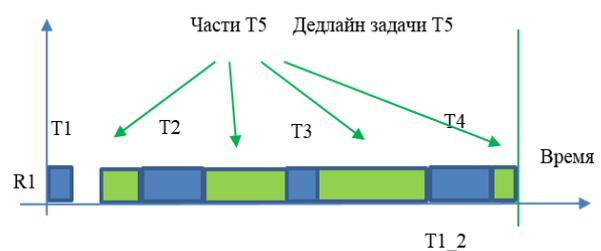


Рисунок 2.28 – Дробление поступающей задачи

Делимость запланированных задач

Допущение делимости подзадач позволяет создавать более плотные расписания и одновременно уменьшать влияние штрафов. При применении бонус-штрафных функций задач, имеющих почти плоское плато и рост в минус после дедлайна (рис. 2.29), эффект дробления приводит к улучшению по штрафам.

Небольшой отрицательный наклон до дедлайна практически не оказывает влияния на значения целевых функций, но автоматически планирует задачи по левой границе. Подзадачи (операции) групповых задач GT1 и GT2

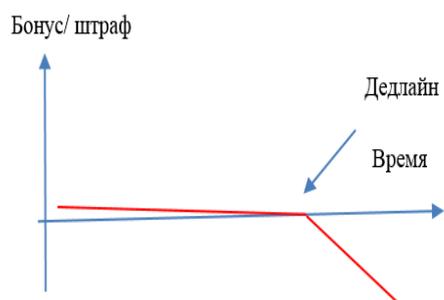


Рисунок 2.29 – Функция с почти плоским плато для планирования «как можно раньше» (ASAP)

предполагаются делимыми с шагом дискретности, равным 1. Согласно бонусной функции с почти плоским плато групповая задача GT1 планируется как можно раньше, т.е. с 0. Начальные виртуальные деньги у задач отсутствуют для предотвращения уступок и компенсаций, дедлайны заданы с запасом, приоритеты равны 0,5 и 2 для

увеличения штрафных санкций опоздания второй задачи GT2, время ее поступления равно 2.

В случае неделимости задач расписание будет следующим, рис. 2.30.

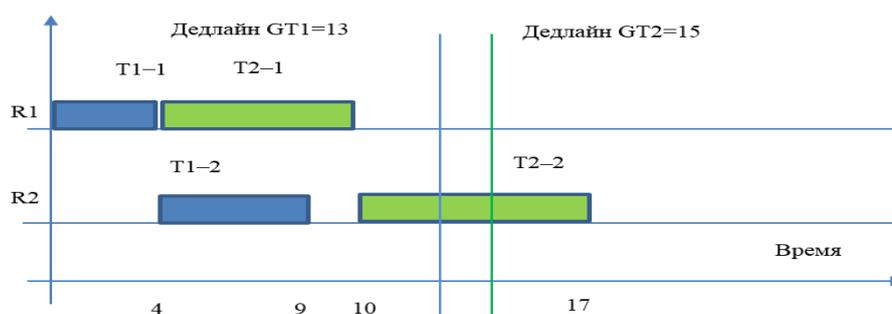


Рисунок 2.30 – Расписание при бесконфликтном обтекании

Параметры задач представлены в табл. 2.10.

Таблица 2.10 – Параметры задач после планирования GT1, GT2 без дробления

Групп. задача	Момент готовности	Групп. п. t_{start}	Групп. п. t_{end}	Дедлайн	Вирт. счет	Приоритет	Задачи (ресурс, объем)	t_{start}	t_{end}	Бонусная функция
GT1	0	0	9	13	0	0,5	T1-1 (R1,4)	0	4	0
							T1-2 (R2,5)	4	9	
GT2	1	4	17	15	0	2	T2-1 (R1,6)	4	10	-2
							T2-2 (R2,7)	10	17	

Штраф задачи GT1 равен 0, задачи GT2 равен $2 \cdot (-2) = -4$, суммарный штраф будет равен -4 единицы.

При возможности дробления из-за больших штрафов для задачи GT2 выгодно приостановить задачу T1-1, запустив T2-1 второй групповой задачи, а потом возобновить выполнение T1-1. Начинать выполнение T1-2 нецелесообразно, поскольку окончание T2-2 в таком случае выйдет далеко за дедлайн, выгоднее часть ее выполнить перед T1-2, затем прерваться на выполнение части T1-2, выполнить до дедлайна 15 задачи GT2 остаток T2-2, и затем остаток T1-2. Дробление подзадачи может быть полезно, если, например, появится дополнительный ресурс типа R2, тогда на него может быть сброшен остаток невыполненной задачи T1-2. Получившееся расписание показано на рис. 2.31, а данные задач представлены в табл. 2.11.

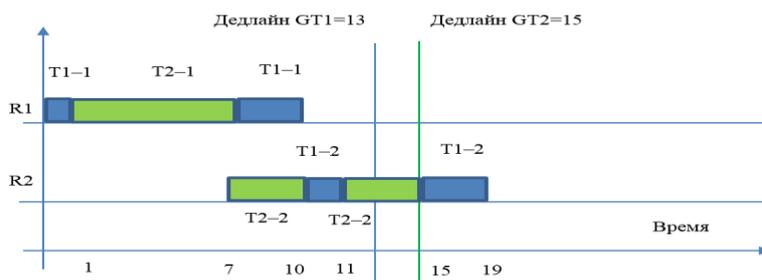


Рисунок 2.31 – Дробление запланированной задачи привходящей

Таблица 2.11 – Параметры задач после планирования GT1, GT2 с дробления

Гру п. зад ача	Мо ме нт гот овн ост и	Г ру п п. t_{start}	Гру пп. t_{end}	Дедла йн	В ир т. сч ет	П ри ор ит ет	Задачи (ресурс, объем)	t_{start}	t_{end}	Бону сная функ ция
GT 1	0	0	19	13	0	0. 5	T1-1 (R1,4)	0	10	-6
							T1-2 (R2,5)	10	19	
GT 2	1	4	17	15	0	2	T2-1 (R1,6)	1	7	0
							T2-2 (R2,7)	7	15	

Штраф для задачи GT1 будет $0,5 \cdot (-6) = -3$, штраф для GT2=0, суммарный штраф будет равен -3. Дробление запланированной задачи уменьшило суммарный штраф.

Разобраны основные модели разрешения конфликтов, которые могут использоваться при планировании связанных задач в различных подходах планирования, «как можно раньше» и «точно в срок» с предположениями о разделяемости ресурсов, делимости задач и комбинациями компенсаций и вытеснения.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Рассмотрены особенности процесса построения сложных расписаний в ходе самоорганизации агентов ПВ-сети.
2. Предложена модификация модели ПВ-сети мультиагентной системы для ситуационного управления ресурсами реального времени:
 - а) расширен состав базовых классов агентов и протоколов их взаимодействия, применимые для широкого круга транспортно-производственных задач управления ресурсами;
 - б) введены функции удовлетворенности и бонусов и штрафов, позволяющие регулировать уступки в конфликтах;
 - с) предложена модель двухуровневой микроэкономики виртуального рынка, позволяющая управлять процессами самоорганизации расписания.
3. Разработан метод «узкого звена» для ситуационного управления ресурсами в реальном времени в условиях неопределенности, позволяющий по очереди улучшать значения наихудших показателей.
4. Разработаны основные виды разрешения конфликтов между агентами задач для применения проактивных механизмов планирования в мультиагентных системах.

3 МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ

3.1 Требования к разработке мультиагентной платформы

В настоящее время на рынке известен ряд мультиагентных платформ общего назначения (JADE, Cougar, AgentBuilder и другие), которые не предоставляют никаких моделей, методов и средств для построения систем адаптивного планирования по событиям в реальном времени.

К разработке мультиагентной платформы для управления ресурсами предъявляются следующие требования:

- 1) наличие базовых классов агентов, позволяющих строить на их основе расширенные для учета особенностей предметных областей;
- 2) возможность создавать распределенные приложения;
- 3) наличие механизма создания и модификации событий и взаимодействие с очередью;
- 4) взаимодействие агентов со структурами базы знаний;
- 5) механизм применения модификации сцены мира агентов с учетом событий;
- 6) подключение новых классов событий и агентов без перепрограммирования;
- 7) введение и модификация критериев принятия решений агентами в реальном времени на основе функций бонусов и штрафов;
- 8) подключение и модификация сценариев поведения агентов;
- 9) журналирование лога сообщений агентов;
- 10) интеграция с пользовательскими интерфейсами системы.

Данные требования могут позволить существенно сократить сроки и затраты при разработке рассматриваемых систем управления ресурсами.

3.2 Обзор существующих мультиагентных платформ

Обзор мультиагентных платформ для широкого круга применений дан в [8].

Рассмотрим наиболее распространенные платформы.

Платформа JADE [118]. Распространенная среда для разработки агентов, поддерживает FIPA спецификации агентов, включает в себя графические компоненты визуального проектирования и средства отладки. Представляет собой инструмент создания приложений среднего слоя. Может функционировать в распределенной среде, позволяет использовать асинхронные сообщения между агентами и изменять конфигурацию систем во время работы. Недостатки связаны с реализацией сложной логики агента в одном потоке, что затрудняет применение в планировании систем реального времени, с организацией агентов внутри контейнеров, с трудностями настройки агентов в различных предметных областях.

AnyLogic [119]. Лидирующий на российском рынке разработчик средств имитационного, событийного и мультиагентного моделирования. Разрабатывает приложения в области логистики, управления промышленными предприятиями, бизнес-процессами, финансами, здравоохранении, анализе рынков и др. Созданы обширные библиотеки моделей для бизнес-приложений, drag-and-drop интерфейсы, инструментальные средства проектирования прикладных систем на основе классов агентов и языка Java. Имеется встроенный оптимизатор OptQuest для решения многих прикладных задач. К недостаткам следует отнести необходимость перепрограммирования логики агентов в задачах построения планов, описания целей и ограничений, трудоемкость индивидуальной настройки агентов, отсутствие поддержки переговоров.

Agent Builder [120]. Разработаны среда исполнения и графические инструментальные средства для проектирования агентов для разнообразных мультиагентных приложений на основе языка Java. Разработчикам необходимо задавать в графической среде протоколы сообщений агентов, на основе которых

генерируются правила поведения агентов в среде. Взаимодействие агентов осуществляется при помощи языка KQML. Недостатком является отсутствие средств планирования и оптимизации.

Краткий анализ существующих мультиагентных платформ показывает, что отсутствуют общие модели, методы и инструменты построения приложений для различных областей управления ресурсами.

3.3 Архитектура мультиагентной платформы

Для построения прототипов и применения мультиагентных технологий в различных отраслях планирования ресурсов была разработана мультиагентная платформа на основе расширенной модели ПВ-сетей [101,102,123].

Программные агенты ПВ-сети в среде платформы имеют характеристики (атрибуты), связанные с настройкой сети на данную предметную область, например, производственного планирования, транспортной логистики или цепочки поставок. Кроме того, в выбранной предметной области у агентов заданы целевые показатели (срок, стоимость, риск и др.) и функции удовлетворенности со значением от 0 до 1, описывающие их состояния по текущим значениям показателей. С каждым агентом связан счет в виртуальной валюте, с помощью которого в процессе переговоров они могут улучшать свои показатели. Отклонения показателей агентов от предполагаемых идеальных оценивается при помощи штраф/бонусных функций, выраженных в виртуальных денежных единицах. Итерационный процесс поиска решения останавливается в следующих случаях:

- 1) при достижении консенсуса между агентами;
- 2) при колебательном изменении показателей, когда изменения не превышают заданной величины;
- 3) при превышении отведенного на улучшение времени;
- 4) при превышении количества итераций.

3.3.1 Принципы функционирования платформы

В платформе применены следующие принципы.

1. Взаимодействие агентов осуществляется путем отправки и приема сообщений, с помощью которых изменяются переменные, описывающие внутреннее динамическое состояние агентов.
2. Различные классы агентов задач, заявок, подзадач, операций и исполняющих ресурсов настраиваются путем применения формализованных знаний из базы знаний – онтологии. Агенты различных классов имеют возможность взаимодействовать с онтологией.
3. Критерии оптимизации описываются многокомпонентными функциями удовлетворенности. Каждый показатель также определяет штрафные и бонусные функции агентов. Каждый отдельный критерий с помощью весовых коэффициентов может быть включен в общие показатели. Текущее состояние агентов оценивается при помощи функций удовлетворенности состоянием.
4. Агенты и ресурсы взаимодействуют в сцене виртуального мира, являющейся конкретной реализацией данной предметной области. Каждый агент преследует свою собственную цель – получить как можно больше виртуальной прибыли, зависящей от положения его подзадач и операций в расписании, и от соотношения затрат и дохода в каждый момент времени, повысив, тем самым, свою удовлетворенность.
5. Улучшения состояний агентов приводят к улучшению динамического плана в целом. Виртуальные счета агентов позволяют изменять состояния на более выгодные, компенсируя ухудшения других за дополнительные виртуальные деньги.

6. Динамическое выравнивание отдельных групп показателей планирования производится при сравнении компонент критериев со средними по группе агентов, и проводится в итерационном алгоритме на основе взаимовыгодного обмена виртуальных денег на состояние показателей.
7. Алгоритмы планирования работают в две стадии – бесконфликтного и проактивного планирования.
8. Бесконфликтное планирование основано на быстром включении очередной работы (заявки) в расписание, без учета критериев оптимизации, а только с условиями удовлетворения ограничений.
9. Проактивная стадия характеризуется многократным перепланированием с учетом критериев, улучшения которых инициируются использованием виртуальных денежных средств. Процессы продолжаются до тех пор, пока не достигнут критерий останова – достигнут заданный коридор изменений, исчерпан предел итераций, исчерпаны денежные средства.
10. Проактивная стадия процесса позволяет динамически приспосабливаться к различным внешним воздействиям на мультиагентную систему.
11. Глубина перепланирования задается волновым процессом – количеством перепланирований, чтобы избежать глобальных перестроек расписания.
12. Применение виртуальных денег позволяет оперативно воздействовать на направление эволюции изменения показателей планирования в заданном направлении.

Разработанная мультиагентная платформа совмещает функциональность базового адаптивного планировщика, которая может быть модифицирована для новой предметной области, с моделированием, что является полезным для

экспериментов с различными конфигурациями ПВ-сетей, методами и алгоритмами.

Архитектура платформы представлена на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Логическая архитектура мультиагентной системы

Компонентами платформы являются:

- онтология элементов предметной области, с отношениями «часть-целое, состоит из-, имеет атрибуты, связана с-», и др.;
- система ввода исходных данных, допускающая ввод задач на исполнение с необходимыми атрибутами и характеристиками;
- система генерации и ввода событий в очередь на обслуживание, очередь событий – подсистема, обеспечивающая накопление событий, приходящих из внешнего мира, и их последовательную обработку.
- мультиагентная исполняющая система, состоящая из динамического мира агентов, взаимодействующих между собой, допускающая визуализацию процессов через интерфейс пользователя. Агенты обращаются как в базу знаний, представленной онтологией, так и в базы данных, содержащих необходимую детальную техническую информацию о интересующих их компонентах. Исполняющая система обеспечивает асинхронное выполнение

программ агентов при переходе из одного состояния в другое (диспетчер агентов) и передачу сообщений между агентами;

- сцена мира представляет собой динамический временной слепок текущей ситуации, реализующей конкретную модель, построенную агентами системы на основе онтологии и поступающих внешних событиях;

- системы ограничений могут описывать жесткие рамки ограничений, которые не могут быть обойдены агентами системы без вмешательства пользователей;

- специализированные компоненты и компоненты интеграции позволяют выполнять дополнительные специализированные функции для интерфейсов, графических компонент и внешних систем, модули интеграции также предназначены для взаимодействия с подсистемами сторонних разработчиков, например, с системами навигации.

Мир агентов ПВ-сети (виртуальный рынок) – это пространство для работы агентов, в котором запускаются и исполняются экземпляры классов агентов. Агенты под управлением исполняющей системы создаются и уничтожаются, обмениваются сообщениями, обращаются в сцену для чтения информации, изменяют свое состояние.

Основные типы агентов определены в табл. 2.1 главы 2.

3.3.2 Особенности архитектуры

Конструкция мира агентов:

- мир агентов создает компьютерную модель работы предприятия и отражает все основные борющиеся между собой активные сущности, имеющих свои цели, критерии, предпочтения и ограничения, которые влияют на принятие решений и в балансе интересов которых ищется решение сложной задачи;

– предполагается, что сложность мира агентов всегда нарастает от простого к сложному: например, для мира машиностроительного предприятия сначала строятся агенты предприятия в целом, заказов и ресурсов, а затем вводятся агенты цехов, рабочих центров, производственных линий, детали-сборочных единиц т.д.;

– при этом в качестве пассивных объектов мира агентов могут оставаться технологические карты, пространственные характеристики расположения оборудования и прочие сущности, дающие ограничения.

Конструкция сцены мира:

– сцена строится как «зеркало» реальности, отражая ситуацию во внешнем мире, текущий план действий и ожидаемые результаты;

– при этом сцена строится как семантическая сеть из понятий и отношений онтологии, чтобы обеспечить возможность ее расширения без перепрограммирования;

– сцена мира строится так, чтобы сокращать перебор в ходе переговоров (от ближайших возможностей).

Концепт сцены позволяет резко сократить полный перебор:

– чем больше специфических отношений присутствует в сцене, тем есть больше возможностей для эффективного анализа ситуации и сокращения комбинаторного перебора;

– например, если агент нового заказа знает о предыдущей аналогичной задаче и остатках на складе, то он пытается встроиться вслед за ней, чтобы сократить время переналадки или даже объединится с предыдущей задачей.

Глобальный показатель системы пересчитывает лишь частично;

– когда приходит новый заказ и его агент пытается «растолкать» на ресурсы другие заказы и они, в свою очередь, «расталкивают» другие заказы
– то базовая сцена не меняется, а меняется сцена-штрих (специально

помеченная часть в базовой сцене), в которой динамически определяется разница по глобальному и локальному показателю агентов (без полного пересчета);

– в случае прихода нового заказа сумма всех улучшений состояний агентов должна превосходить сумму всех ухудшений (за счет компенсаций) по глобальному показателю – чтобы положительное решение по приему заказ было принято.

Программные компоненты разработанной платформы могут быть применены для новых предметных областей и приложений.

3.4 Средства для функционирования агентов в распределенной среде

Среда исполнения агентов предназначена для функционирования в распределенной среде. Поэтому были реализованы следующие возможности:

– взаимодействие с компонентами системы, работающими в вычислительном домене, отличном от вычислительного домена, в котором работает среда исполнения агентов;

– согласованное функционирование нескольких экземпляров модуля среды исполнения агентов в разных вычислительных доменах.

Взаимодействие с компонентами системы, работающими в различных вычислительных доменах осуществляется с помощью системы обмена сообщениями. Отправитель и получатель сообщения не зависят от реализации транспорта сообщений.

Среда исполнения агентов предоставляет средства конфигурирования таблицы маршрутизации и автоматическое составления таблицы маршрутизации.

Для автоматического составления таблицы маршрутизации среда исполнения агентов использует перечень соседних узлов, который задается для каждого вычислительного домена и содержит физические адреса узлов.

Для составления таблицы маршрутизации по этим адресам отправляется запрос на получение перечня логических адресов компонентов, доступных по этому физическому адресу.

При необходимости подключаются дополнительные экземпляры модуля среды исполнения агентов и переносятся между ними экземпляры агентов, не прерывая работы системы. В случае наличия доступных ресурсов (узлов) среда исполнения агентов переносит необходимых агентов на новый экземпляр модуля.

Входные данные модуля среды исполнения агентов:

- определения типов агентов – динамически подключаемые библиотеки (.dll) содержащие классы, соответствующие типам агентов, а также xml-файлы определяющие правила соответствия между типами агентов и сущностями сцены;
- сценарии поведения агентов – динамически подключаемые библиотеки (.dll), файлы с js-скриптами или же файлы с онтологиями в одном из поддерживаемых Конструктором Онтологий формате, содержащие описание сценариев поведения агентов;
- критерии, предпочтения и ограничения агентов – xml-файлы, содержащие описание функций удовлетворенности, их веса и функции бонусов и штрафов агентов;
- данные сцен – файлы сцен с описаниями сущностей и их свойств в одном из поддерживаемых Конструктором Онтологий формате;
- конфигурация журналирования – информация о файлах и базах данных, в которые производится запись журналов переговоров, событий и финансовых транзакций;
- таблицы маршрутизации и узлов – xml-файлы с информацией о соответствии между логическими и физическими адресами участников обмена сообщениями;

Выходные данные модуля среды исполнения и модуля интеграции:

- измененные данные сцен – файлы сцен с описаниями сущностей и их свойств в одном из поддерживаемых Конструктором Онтологий формате;
- события, возникшие в сцене – программные объекты событий, переданные в модуль управления событиями;
- журналы работы модуля – файлы содержащие журналы переговоров агентов, журналы внутренних событий сцены и журналы финансовых транзакций.

Внутренняя логика работы, реализующая функции системы

Ключевыми логическими компонентами системы являются такие концепты, как агенты и поведения агентов. Также к ключевым компонентам системы следует отнести сущности, связи между ними, их состояния, а также различные внутренние сервисы

Экземпляры агентов хранятся в репозитории. Репозиторий агентов представляет из себя хранилище экземпляров агентов, которые «живут» в системе. Основная функция сервиса репозитория – предоставления ссылки на агент по его имени или по ссылке на рабочую копию и идентификатор сущности. Для агентов репозиторий постоянно хранит созданных агентов до тех пор, пока они не прекратят свой жизненный цикл. Для агентов, которые привязаны к той или иной сущности, цикл жизни синхронизируется с временем жизни той рабочей копии, в рамках которой они были созданы.

Произвольное количество логических потоков выполнения логики работы агентов могут запрашивать выбранный слот активности. При необходимости можно указывать приоритет ожидания в очереди – новые слоты будут отдаваться только для потребителей наивысшего приоритета.

Под работой в «реальном времени» понимается адаптивное перепланирование расписания работы ресурсов по событиям в реальном

времени, при котором решение зависит от самого момента времени принятия решений.

Классы платформы предназначены для встраивания в интеллектуальные системы управления ресурсами реального времени различного назначения.

Структура исполняющей системы платформы

В текущей реализации исполняющая система сочетает возможности как стратегического, так и оперативного адаптивного планирования в реальном времени. Она включает в себя следующие основные микросервисы:

- системные микросервисы (диспетчеризации, передачи сообщений и т.д.);
- микросервисы поведений агентов, включая как начальное размещение в расписании, так и проактивного улучшения, расчета финансовых транзакций и т.п.;
- микросервис очереди событий и др.

Исполняющая система работает в оперативной памяти, куда получает все исходные данные (как начальные – настроечные, так и последующие события), и куда далее возвращает результат – новое расписание и оценку показателей своей работы.

Основной структурой данных является рабочая сцена, куда поступает входная и где формируется выходная информация.

Входные и выходные данные сохраняются в оперативной памяти.

Модули платформы могут вызываться как веб-сервис из любых других систем.

Работа агентов исполняющей системы

Агенты представляют собой наборы сценариев поведений, которые реализуются микро сервисами и связываются с обработкой событий или сообщений. При этом данные, определяющую работу каждого агента, хранятся объектами в сцене, рис.3.2.

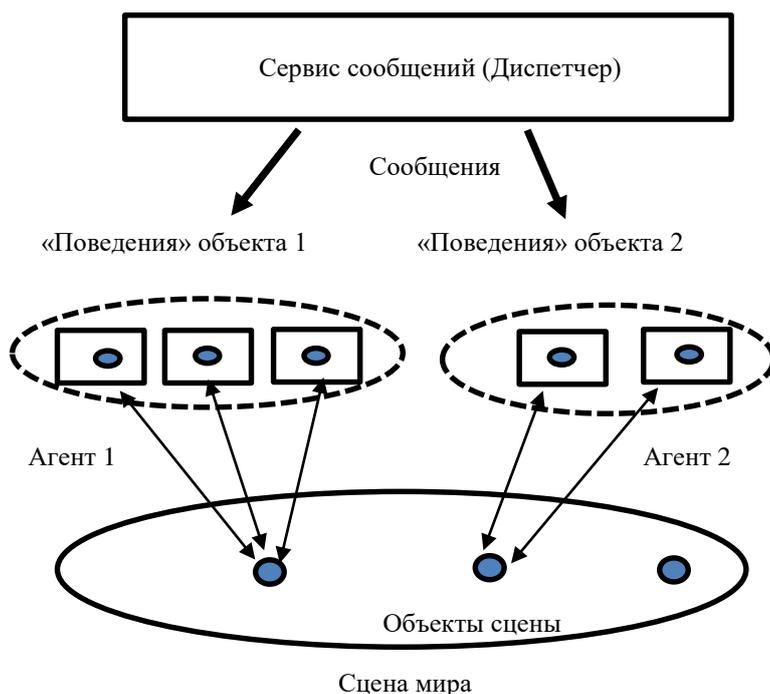


Рисунок 3.2 – Общая структура и принцип работы модуля

Имеются связи – двусторонние указатели, соединяющие между собой сервисы поведений агентов и объект данных, определяющий сущность агента.

Можно упрощенно считать, что в сцене храниться «душа (ментальное тело)» агента, а сервисы представляют его «физическое тело». Появление нового объекта задачи в сцене порождает создание агента задачи и инициализацию его поведений, например, начало размещения в расписании.

Такого рода события обрабатывает диспетчер мира агентов, включающий в себя набор таких сервисов, а также механизмы подписки на события и т.д.

Для каждого созданного экземпляра агента порождается экземпляр его сервисов – чем больше агентов, тем больше в системе активных сервисов (в общем случае, часть может быть в спящем состоянии). Физически агенты могут работать в одном или нескольких потоках, механизм позволяет обрабатывать события синхронно или асинхронно для разных типов.

После отработки реакции на сообщения соответствующие сервисы засыпают до поступления следующего сообщения или побудки от диспетчера, например, по запуску таймера.

Сцена мира

Основной структурой данных является сцена данных, определяющая модель ситуации в реальном мире и включающая в себя все начальные данные, строящееся расписание и показатели работы системы.

Сцена содержит объекты всех сущностей мира предметной области и связей между ними (семантическую сеть расписания), требуемые для планирования.

1. Групповые задачи и их атрибуты:

- желательное время завершения задачи;
- минимальное время начала задачи;
- натуральные объемы задач с требуемыми типами работ.

2. Ограничения задач:

- по продолжительности задачи (интервал времени min-max);
- по началу выполнения задачи (интервал времени min-max);
- по окончанию задачи (интервал времени min-max).

3. Ресурсы:

- типы работ ресурса;
- календарь доступности ресурса.

4. Отношения:

- «предок – потомок» – описывает вхождение задачи в групповую задачу;
- «предшественник – последователь» – задает порядок исполнения задач.

5. Расписания.

6. Финансовые счета сущностей (связаны с сущностями задач, групповых задач, ресурсов, валюты 1-го и 2-го рода).

7. Финансовые транзакции.

Формирующееся расписание строится как сеть элементов расписания, состоят из триад: «задача» - «ресурс» - «слот времени», рис.3.3.

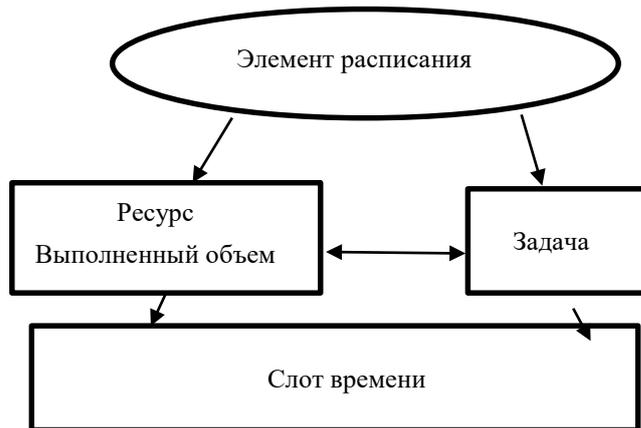


Рисунок 3.3 – Общая структура сетевого расписания

Поскольку у ресурса, как правило, есть возможность выполнения нескольких видов работ, то указывается абсолютный объем, «отъедаемый у ресурса».

Очередь событий

В очередь событий могут поступать события от различных внешних и внутренних источников. В настоящее время в модуле имеется поддержка различных источников событий:

- появление и удаление задач;
- появление и удаление ресурсов;
- изменения календарей доступности;
- изменения расписания;
- смене состояний задач и ресурсов;
- требований начального и проактивного планирований;
- тики таймеров и др.

Источниками событий могут быть как результаты работы сервисов поведений агентов, так и внешние изменения в реальном мире. Реализация протоколов взаимодействия агентов производится через сервис сообщений. Сервис сообщений является частью диспетчера, который может порождать на основе разбора событий сообщения и направлять их агентам. События могут ждать последовательного исполнения в модуле или же заводится туда и обрабатываться параллельно.

Примечание: в текущей версии модуля часть событий может «теряться» при параллельной асинхронной обработке при объединении результатов обработки таких событий. Например, второе событие обработалось с конфликтом с первым и был принят вариант изменений первого, т.е. результаты второй обработки потеряны. Но при этом генерируется сообщение о неотработанном событии – и работа по обработке второго события может быть продолжена.

Деревья вариантов

При поступлении нового события, например, появлении новой задачи, создается агент новой задачи и начинаются переговоры агентов для перестройки расписания.

В ходе переговоров агент инициатор события при поддержке диспетчера создает копию объектов сцены, которые подвергаются изменениям. Несмотря на то, что физически эти новые объекты хранятся в той же сцене (подвергаясь специальным пометкам), будем считать это новой сценой «штрих». В ходе работы из «сцены штрих» могут формироваться сцены «два штриха», «три штриха» и далее, каждая из которых оценивается по удовлетворенности.

В результате альтернативные варианты решений по изменению расписания могут строиться параллельно, что в целом ускоряет процесс решения (рис. 3.4):

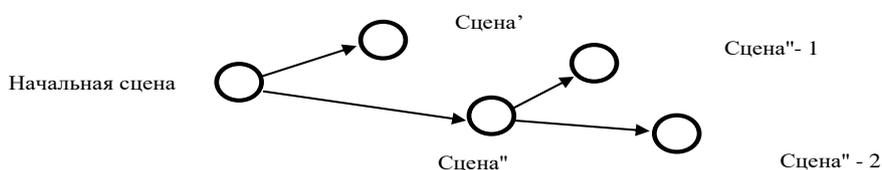


Рисунок 3.4 – Развитие дерева вариантов при построении расписания

Таким образом, в ходе решения задачи переговоры агентов формируют новые сцены, которые дают приросты или падения удовлетворенности отдельным агентам и миру в целом. Общий пересчет сцены в каждом случае не требуется, т.к. известны изменяемые объекты (агенты) и эта процедура может выполняться адаптивным образом.

После завершения построения дерева вариантов инициатором выбирается наилучший вариант в интересах системы в целом (или частных агентов), в котором имеется наибольший прирост удовлетворенности.

Получаемые варианты расписаний также могут быть сохранены и выгружены в оперативную память или указанную базу данных, а также представлены пользователю.

Лог работы среды исполнения

В среде исполнения агентов ведется лог работы системы (журналирование). Журналируется следующая информация:

- переговоры агентов;
- события в сцене;
- финансовые транзакции;

Для постоянного или временного хранения журналов предоставлена возможность хранения журналов в заданных в конфигурации системы файлах

или базе данных, а также имеется возможность расширения перечня хранилищ журналов.

Журналы логов доступны в виде файлов и записей в базе данных. Журналы используются для контроля поведения мультиагентной системы, и позволяют в ручном режиме проанализировать, каким образом агенты системы принимали решения и контролировать внутренние состояния агентов. В журналах логов по требованию выводятся заданные атрибуты агентов и состояний сцены.

Недетерминированность

Работа в системе с параллельной и асинхронной обработкой событий приносит в решения сложных задач планирования элементы недетерминизма.

Несмотря на то, что сценарии поведения агентов должны давать детерминированный отклик на события, из-за различных времен поступления событий, например, из-за разных времени обработки в разных потоках, порядок их поступления может разниться и результат построения расписаний при разных запусках модуля может отличаться.

Это также верно и для случая, когда сама логика принятия решений используется время, например, когда система может рассчитывать, сколько времени осталось до начала исполнения плана, и от этого принимать решения.

В случае отработки модуля в одном потока, и строго одних и тех же моментах запуска, а также наличии логики принятий решений агентами, не зависящих от момента времени, результат должен быть детерминированным.

Если сценарии поведения агентов в будущем будут учитывать историю (самообучение), то тогда одинаковая ситуация будет совсем невозможна в принципе, и здесь еще один источник недетерминированного поведения.

3.5 Компоненты пользовательского интерфейса

Для анализа и моделирования сценариев работы системы планирования ресурсов были разработаны компоненты пользовательского интерфейса (UI) для взаимодействия с ядром мультиагентной системы и агентами сети потребностей и возможностей. Платформа с пользовательским интерфейсом позволяет экспериментально исследовать свойства мультиагентных систем планирования с визуализацией графиков и диаграмм. Общий вид пользовательского интерфейса системы моделирования представлен на рис. 3.5.

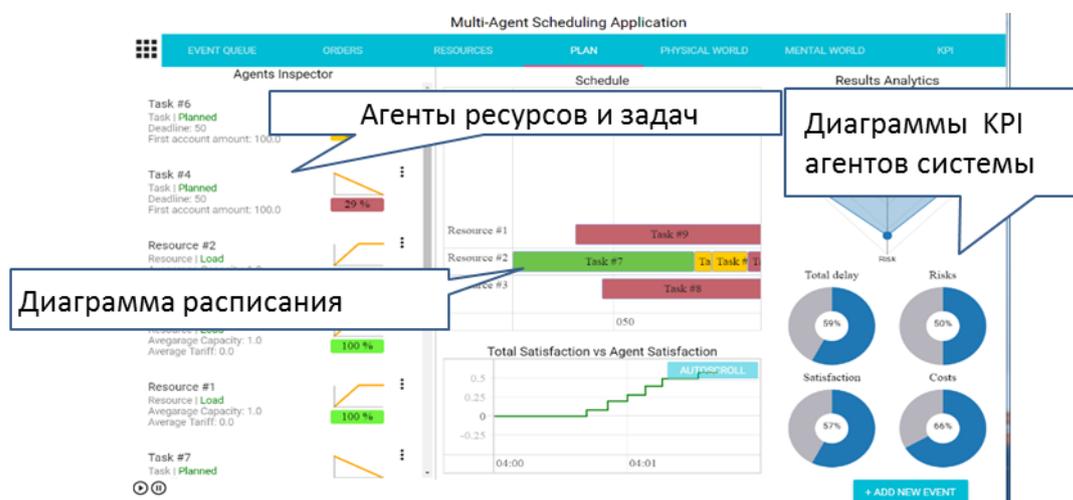


Рисунок 3.5 – Пользовательский интерфейс мультиагентной платформы с графическими компонентами для визуализации процессов моделирования

Функциональность мультиагентной системы моделирования обеспечивает возможность в интерактивном режиме указать начальную сеть ресурсов, последовательность событий сценария вручную или автоматически, или загрузить его из внешних файлов, сделать индивидуальные настройки для всех требований и ресурсов, запускать моделирование с различными параметрами и визуализировать процесс и результаты экспериментов.

Мультиагентная система дает возможность исследовать различные модели предметных областей, в том числе:

- динамическое планирование потоков работ с заданными характеристиками объемов, сроков начала и окончания, типом исполняющих ресурсов;
- планирование связанных (неатомарных и зависящих от порядка выполнения подзадач и операций на ресурсах) агрегированных задач;
- моделирование расписаний и тарифных сеток стоимостей ресурсов, с возможностью имитирования периодов недоступности, падения производительности и выхода из строя отдельных ресурсов в заданные периоды времени;
- модель планирования в стадии удовлетворения ограничений для создания первоначального достижимого плана;
- модель адаптивного планирования с динамическим перепланированием в режиме проактивности агентов для улучшения заданных показателей;
- метод «узкого звена» для систем с многокритериальными целевыми функциями агентов;
- планирование логистических транспортных задач с заданными графами стоимостей транспортировок, стоимостей эксплуатации ресурсов, объемом и типом перевозимых грузов и консолидированных заказов;
- моделирование систем планирования проектной деятельности.

Мультиагентная система моделирования включает в себя экраны отображения и экспорта в Microsoft Excel следующих диаграмм и графиков:

- диаграмма Ганта динамического расписания;
- диаграмма связей ресурсов и задач с подзадачами;
- штраф/бонусные функции агентов ресурсов и задач, по каждой компоненте критерия;
- динамика сообщений (переговоров) агентов в процессе планирования;
- доступности и стоимости (тарифа) каждого ресурса;

- удовлетворенность ресурсов от загрузки;
- динамика удовлетворенности каждого агента задачи и ресурса по времени и по каждому компоненту, суммарная и средняя удовлетворенность агентов;
- состояние и динамика виртуальной прибыли каждого агента и системы в целом;
- динамическая диаграмма (радары) состояний компонентов целевой функции каждого агента;
- гистограмма количества перепланирований;
- динамика поступивших, планируемых и выполняемых задач;
- динамика загрузки каждого ресурса и загруженности системы в целом;
- скорость поступления объемов работ;
- скорость изменения удовлетворенности агентов, характеризующая динамику изменения расписания;
- скорость изменений количества сообщений каждого агента ресурсов и задач;
- история изменений виртуальных счетов агентов;
- лог переговоров агентов.

3.6 Технология создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени

Предлагается технология создания систем управления ресурсами на основе разработанной платформы, состоящая из этапов:

- построение онтологии выбранной предметной области и связанной с ней базы знаний;
- спецификация модели ситуаций на основании онтологии;
- спецификация критериев, предпочтений и показателей планирования;

- разработка дополнительных специализированных классов агентов на основе базовых классов платформы;
- определение и спецификация событий в системе;
- разработка моделей и алгоритмов принятия решений агентами и методов разрешения конфликтов;
- построение протоколов переговоров агентов в среде исполнительной системы;
- выбор интерфейсов системы для создания автоматизированных рабочих мест.
- определение системы показателей, отображаемых на «радарх» пользователей;
- разработка сценариев тестирования.

3.7 Экспериментальные исследования планирования в мультиагентной платформе

С помощью разработанного прототипа мультиагентной платформы были проведены исследования по моделированию ситуаций разрешения конфликтов (глава 2, раздел 2.6), включающие в себя более 150 экспериментов по установлению равновесия или остановки итерационного процесса. Особенности реализации алгоритма заключаются в следующем:

- 1) останов осуществляется при достижении баланса удовлетворенности между конфликтующими агентами;
- 2) изменения удовлетворенности агентов не превышает заданного порога в 0,01;
- 3) прекращение переговоров между конфликтующими агентами при отказе одной из сторон;
- 4) отведенное количество (1000) итераций на каждого агента превышено.

В результате экспериментов было обнаружено, что процесс останавливается по балансу удовлетворенности либо по прекращению переговоров в системах с 1000-10000 агентами за менее чем 10 итерациях переговоров в каждой паре агентов. Заданное ограничение количества итераций в 1000 в экспериментах не достигалось.

При реализации алгоритмов платформы в реальных системах (Глава 4) получение решения также было гарантировано вышеприведенными особенностями алгоритма. Останов по превышению количества операций не был обнаружен.

3.7.1 Планирование задач в платформе

Применение метода «узкого звена» в планирования с несколькими критериями для ресурсов и задач в мультиагентной системе проводилась следующим способом. Для агентов задач рассматривается 2-х компонентная целевая функция, 1-й компонент учитывает риск невыполнения задачи при возможном увеличении продолжительности, 2-й – опоздание задачи по предельному сроку, рис. 3.6. У агентов ресурсов функция также двухкомпонентная, 3-й компонент – загруженность ресурсов, 4-й – приоритетность (степень важности) задачи для ресурсов, в обозначениях рисунка 3.6. На интервале модельного времени от 0 до 30 мультиагентной системой учитываются опоздания задач по предельному сроку и загруженность ресурсов (2-й и 3-й компоненты). Затем, от 30 до 60-й единицы времени используются 2-й и 4-й компоненты, на интервале от 60 до 90 единицы времени -1-й и 4-й, после 90-го момента- 1-й и 2-й компоненты. На графике суммарного качества планирования хорошо заметны моменты изменения критериев и частичное восстановление качества планирования мультиагентной системы.

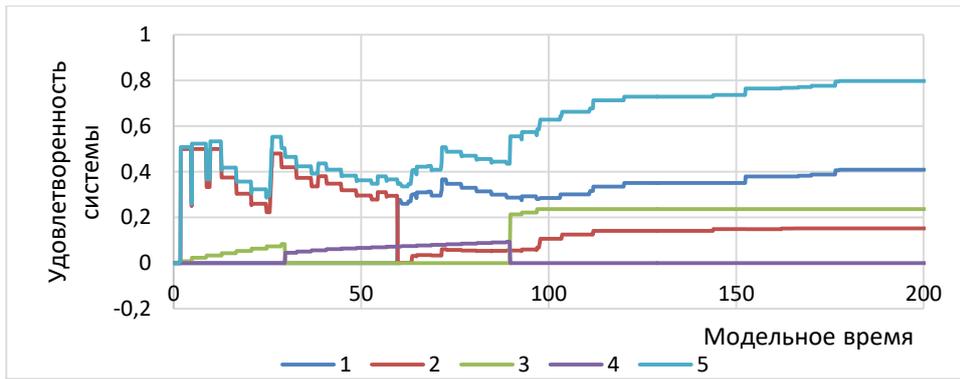


Рисунок 3.6 – Качество планирования в зависимости от модельного времени при многокритериальном планировании и динамическом изменении учитываемых показателей: 1 – минимизация рисков, 2 – срок выполнения задачи, 3 – загруженность ресурса, 4 – приоритетность задач для ресурса, 5 – суммарный показатель качества

Эксперимент показывает, что МАС подстраивается под изменение внешних условий, в данном случае на динамическое изменение критериев планирования и стремится повысить удовлетворенность системы.

3.7.2 Моделирование потока задач

Для оценки качества и производительности мультиагентной системы моделирования (ядра модуля адаптивного планирования) использовались сгенерированные связанные задачи (Job Shop Scheduling problem), которые решались в пакете IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12, для критерия минимизации максимального времени выполнения (Max span). Для каждого набора задач с помощью CPLEX были найдены точные решения. Для этих же наборов получены решения в МА платформе, которые не являлись точными и превышали решения CPLEX.

В систему из 5 ресурсов поступает поток задач, каждая из которых состоит из 5 отдельных операций, требующих выполнения на заданных ресурсах. Всего поступает 500 различных операций. Мультиагентная система моделирования планирует их на ресурсах по критерию минимизации максимального времени выполнения. Объем задач варьируется от 1 до 5 условных единиц работы,

времена поступления экспоненциально распределены на интервале в 100 единиц модельного времени. Стоимости задач пропорциональны объему.

За эффективность было взято отношение максимальной продолжительности, полученное CPLEX, к продолжительности, полученной MAS. Измерено также общее время вычислений в MAS и CPLEX. Эксперименты проводились в Win 10 на типичной рабочей станции с 4-ядерным процессором с частотой 2 ГГц и 4-мя ГБ оперативной памяти. Результаты приведены на рис. 3.7 и 3.8.



Рисунок 3.7 – Качество планирования в зависимости от модельного времени

В начале моделирования результат мультиагентной системы составлял около 85-90% (больше по опозданию) от решения CPLEX. В дальнейшем качество составило около 40%. Это объясняется тем, что в начале система ресурсов относительно свободна, и эвристический алгоритм мультиагентного планирования дает результаты, сходные с точным алгоритмом. При дальнейшем нарастании потока задач эвристический алгоритм ухудшает показатели.

Однако по вычислительной трудоемкости мультиагентная система на 20% опережает CPLEX за счет частичного перепланирования, а не поиска решения заново, рис. 3.8.

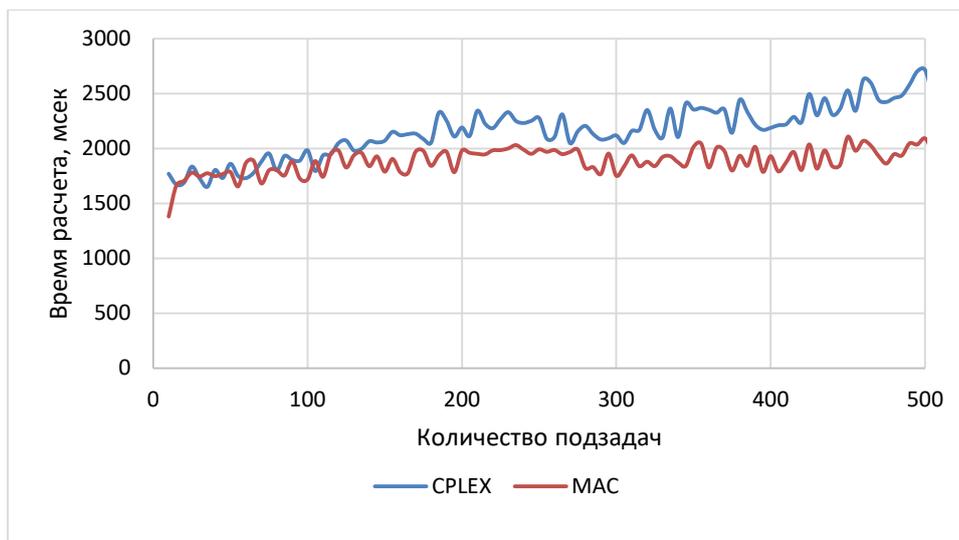


Рисунок 3.8 – Время вычислений в зависимости от количества подзадач

Также была определена эффективность МАС планирования по прибыли. Задачи были атомарными и без связей.

Эффективность планирования оценивается по прибыли, привнесенной запланированными с меньшим отклонением от предельного срока задач. Поскольку мультиагентная система планировала в первую очередь, более выгодные задачи, то эффективность планирования составила 90%, с опозданием планировались менее выгодные задачи, рис. 3.9.



Рисунок 3.9 – Эффективность планирования в зависимости от модельного времени

При моделировании потока несвязанных задач качество планирования достигает 80%, что объясняется ослаблением ограничений.

3.7.3 Влияние сложности задач на качество и время планирования

Для сравнения точного планирования пакетом CPLEX и мультиагентной системой был выделен пример 4-х задач, каждая из которых состоит из 3-х операций, которые должны быть выполнены на 3-х различных ресурсах, не допускающих одновременного выполнения задач. Задачи обладают одинаковым приоритетом, появляются в один и тот же момент времени, но их операции имеют различную длительность и порядок выполнения на ресурсах, табл. 3.1. Целевой функцией является минимизация времени выполнения.

Таблица 3.1 – Параметры операций задач и их последовательность

Работа	Последовательность ресурсов операций	Длительность операций
1	3,2,1	3,2,9
2	3,1,2	5,3,5
3	3,2,1	1,7,1
4	1,3,2	5,3,3

В результате планирования МАС и CPLEX получены следующие расписания, рис. 3.10 и 3.11:

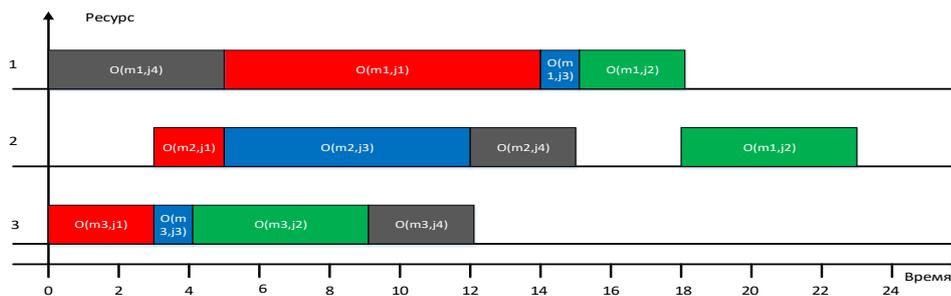


Рисунок 3.10 – Расписание, построенное МАС для примера 4-х задач

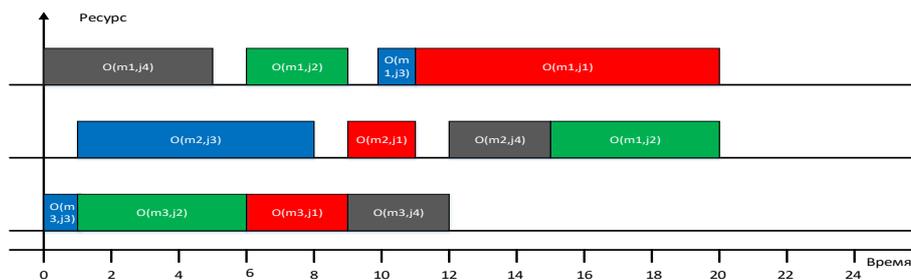


Рисунок 3.11 – Расписание, построенное CPLEX (оптимальный результат) для примера 4-х задач

Качество расписания может быть оценено как отношения максимальной длительности выполнения всех задач, в данном случае $20/23=0,86$.

Выполнен более объемный эксперимент по сравнению результатов планирования MAC и CPLEX на 300 JSSP задачах в зависимости от их количества, каждая из операций имеет длительность до 10 ед. Качество решения определялось отношением точного и MAC- решения, максимального времени выполнения всех задач. Измерялось также и время вычислений, рис. 3.12.

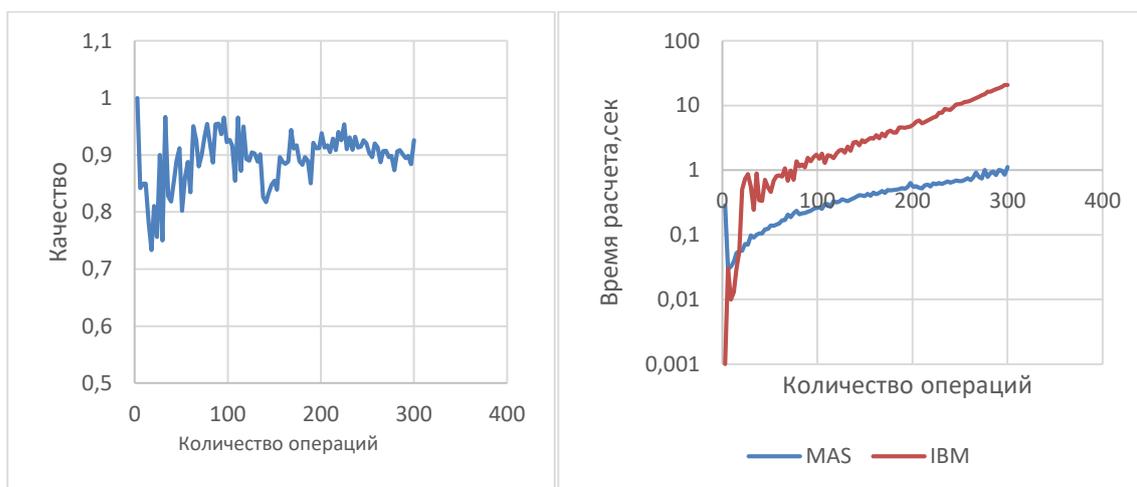


Рисунок 3.12 – Значение критерия и времени вычислений в зависимости от количества запланированных операций

Анализ эксперимента показывает, что результат MAC примерно на 10% хуже точного решения, однако по скорости вычислений в 10-20 раз превосходит CPLEX, что позволяет применять MAC в предметных областях, где требуется оперативное реагирование на изменения в поступающих задачах.

3.7.4 Качество планирования МА платформы в логистических задачах

Для оценки мультиагентной системы моделирования в логистических задачах было проведено сравнение с работой оптимизирующего алгоритма, решающего стандартную транспортную задачу.

Рассматривалась стандартная задача снабжения в сети из M источников и N потребителей. Каждый потребитель способен потребить ограниченное количество продукта, а каждый источник – поставить ограниченное количество. Доставка по каждому каналу из источника потребителю (всего $M \cdot N$ каналов) имеет свою стоимость (линейно зависит от количества), но такую, при которой доставка остается выгодной (цена реализации больше стоимости). Требуется определить, сколько нужно доставить по каждому каналу так, чтобы при доставке максимально возможного количества (т.к. доставка в любом случае прибыльна) стоимость доставки была минимальна.

Проводилась серия экспериментов, в которой количество источников остается постоянным ($M=50$), а количество потребителей N изменяется от 50 до 300. Стоимости доставки по каналам, ограничения на поставку и потребление назначаются случайно. В каждом эксперименте, применяя CPLEX, находится худшее и лучшее решение и замеряется время вычисления.

Затем для каждого набора данных в серии решение находится при помощи разработанного модуля планирования двумя методами. При этом потребности задаются во всех пунктах потребления в один и тот же момент времени. Ограничения на поставку задаются в виде текущего значения остатка на складах точек потребления.

В первом методе стоимость доставки задается непосредственно в виде линейной функции стоимости доставки по каналу. При этом размер доставки не ограничивается.

Для каждого решения полученная сумма расходов на доставку нормируется относительно диапазона (худшее решение; лучшее решение), т.е. нормированное значение показывает качество решения транспортной задачи соответствующим методом.

Решение через стоимость канала дает среднее качество 96%, рис. 3.13.

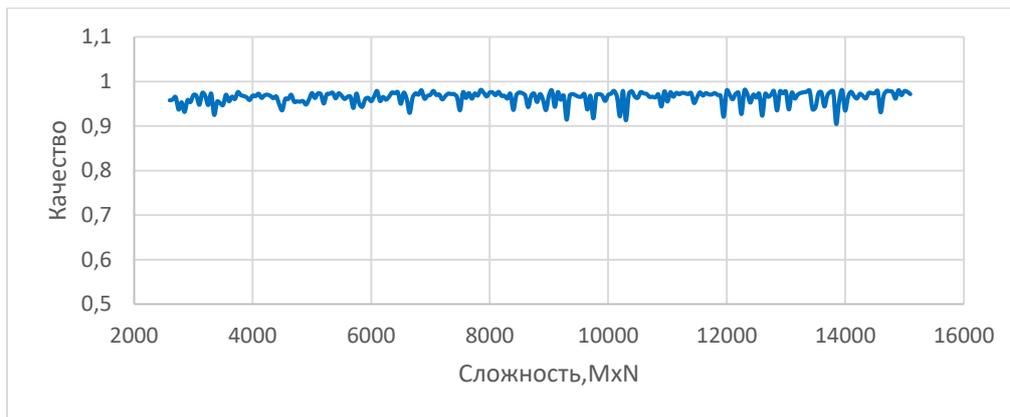


Рисунок 3.13 – Качество планирования через стоимости относительно оптимального в зависимости от сложности (размерности задачи)

Время расчета в CPLEX и MAC, рис. 3.14.

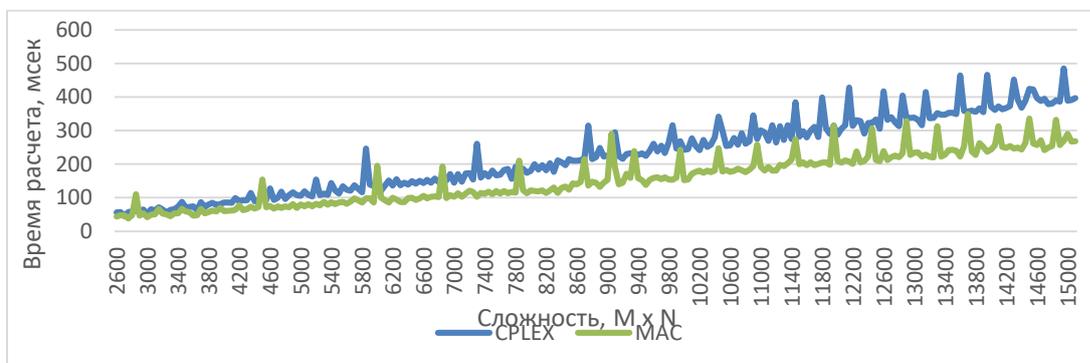


Рисунок 3.14 – Время планирования в зависимости от сложности (размерности) задач

При этом время полного перепланирования мультиагентной системой, в сравнении с временем поиска точного решения CPLEX, оптимизированным под транспортную задачу, в среднем на 40% меньше и показывает степенную зависимость от объема входных данных. Это связано с тем, что, хотя мультиагентная система учитывает потребности, распределенные по времени,

ограничения на объемы доставок и хранения, нелинейные функции стоимости доставки и хранения, многослойные сети доставки, производство и другие особенности, которые исключены из рассмотрения специализированным методом оптимизации, однако затрачивает меньшее время на оптимизацию плана, находя локальный оптимум, а не глобальный. Выбросы на графиках соответствуют непропорциональной сложности некоторых задач при случайной генерации параметров, и требующих дополнительных вычислительных затрат от мультиагентной системы или оптимизатора CPLEX.

3.7.5 Оценка степени адаптивности мультиагентной системы

Мультиагентная система, функционирующая на основе разработанного метода, адаптируется к изменениям внешней среды, поступлению новых задач, изменениям характеристик ресурсов внутри системы. Предлагается метод экспериментального определения адаптивности, разработанный автором.

Под адаптивной системой понимается самоприспосабливающаяся система, автоматически изменяющая алгоритмы своего функционирования или свою структуру с целью сохранения или достижения оптимального состояния при изменении внешних условий.

Агенты в мультиагентной системе путем обмена сообщениями стремятся повысить свою удовлетворенность, однако, это происходит лишь в том случае, если суммарная удовлетворенность агентов системы повышается и при наличии достаточного количества денежных средств на виртуальных счетах агентов для совершения операций изменения расписания [99,100].

В ходе работы в мультиагентную систему поступают заказы, которые планируются для исполнения на ресурсах.

Приходящие и уже ранее распределенные заказы динамически перераспределяются по ресурсам системы, поскольку агенты стремятся повысить свою удовлетворенность.

При появлении нового заказа, еще не распределенного системой, в первый момент времени удовлетворенность системы падает, т.к. пришедший агент не сразу находит лучшее место, а лишь через некоторое время общая удовлетворенность начинает расти за счет перепланирования и постепенного улучшения состояния агентов. Поэтому, для оценки динамики мультиагентной системы предлагается подсчитывать среднюю удовлетворенность u агентов задач и ресурсов в зависимости от времени:

$$u(t) = \frac{\sum_j u_j^{task}(t) + \sum_l u_l^{res}(t)}{M(t) + N(t)}, \quad (3.1)$$

где u_j^{task} – удовлетворенность агента j -й задачи, u_l^{res} – удовлетворенность агента ресурса l , $N(t)$ и $M(t)$ – число агентов задач и ресурсов соответственно. Эти количества зависят от времени, поскольку задачи приходят в систему, а ресурсы могут включаться и отключаться. Из (3.1) следует, что максимально возможным является значение, равное 1.

Предположим теперь, что в некоторый момент времени происходит скачкообразное падение производительности системы, например, отключение части ресурсов. Тогда средняя удовлетворенность агентов также упадет до некоторого значения u_1 , но через время T стабилизируется на новом уровне u_2 за счет перепланирования, Рисунок 3.15:

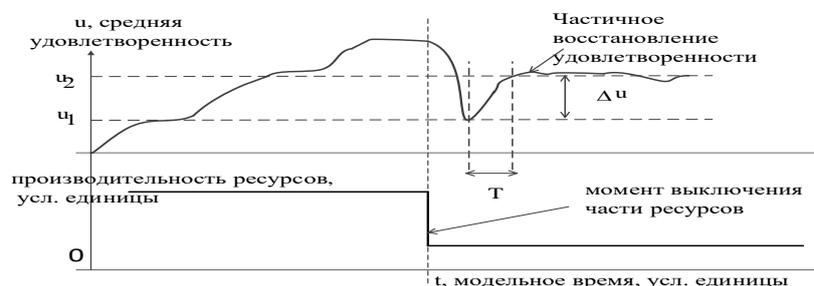


Рисунок 3.15 – Адаптивность системы по событию отключения части ресурсов. После момента максимального спада средней удовлетворенности до уровня u_1 через время T МАС приходит к новому квазиравновесному состоянию u_2

Введем безразмерную степень адаптивности γ мультиагентной системы, характеризующую скорость восстановления локального равновесия:

$$\gamma = (u_2 - u_1) \cdot \frac{1}{T}, \quad (3.2)$$

где u_1 – минимальное значение удовлетворенности после воздействия, u_2 – средние удовлетворенности агентов системы после воздействия на МАС, T – время восстановления равновесия средней удовлетворенности u_2 .

Подобный эффект частичного восстановления на может наблюдаться не только при выключении ресурсов, но и скачкообразном появлении новых потоков задач.

Разумеется, адаптивность МАС зависит от интенсивности внешних воздействий, например, при введении больших потоков задач, превосходящих производительность системы, спад удовлетворенности будет только нарастать со временем, поскольку эффект нарастания неудовлетворенности вновь поступивших агентов не будет покрываться частичным ростом из-за перепланирования.

Аналогично можно рассматривать адаптивность агентов задач γ^{task} и адаптивность агентов ресурсов γ^{res} .

Система, никак не реагирующая на воздействия, согласно (3.2), будет иметь значение $\gamma=0$. Экспериментальные исследования адаптивности МАС с помощью разработанной платформы приведены ниже.

Рассмотрим результаты экспериментов по оценке степени адаптивности системы ресурсов, в любые узлы которой поступают заявки на обслуживание (выполнение). Для каждого агента задан свой набор функций удовлетворенности агентов.

В систему, состоящую из 2-х ресурсов различной производительности с функциями удовлетворенности и стоимостью слотов времени, поступает

пуассоновский поток задач, каждая из которых характеризуется объемом работы, временем поступления и предельным временем окончания. Производится моделирование динамики МАС на горизонте в 70 условных единиц времени. Рассмотрим эксперимент отключения части ресурсов в системе планирования. В системе из 4 ресурсов обрабатывается поток задач со средним объемом в 4 единицы. В момент модельного времени $t=10$ производится отключение 2-х ресурсов, рис. 3.16.

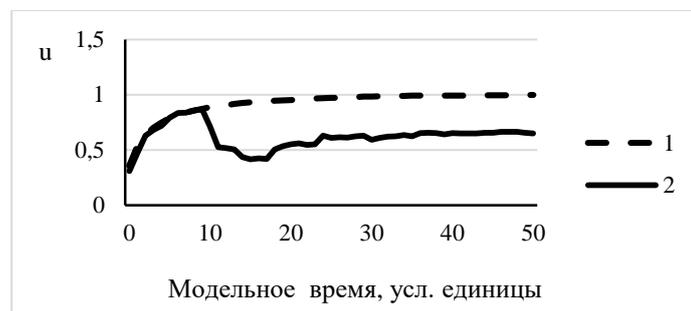


Рисунок 3.16 – Реакция МАС на отключение части ресурсов в момент $t=10$ единиц времени. График (1) – динамика системы из 4-х ресурсов, график (2) – при отключении 2-х ресурсов.

Среднее значение удовлетворенности агентов системы падает до $u_1(\approx 0,4)$, поскольку задачи перепланируются на оставшиеся ресурсы с опозданием, а затем за счет проактивности перепланируются в лучшие положения, и средняя удовлетворенность повышается до $u_2(\approx 0,61)$. На это уходит 16 единиц модельного времени. Отсюда степень адаптивности такой системы $\gamma=0,013$.

Оценка степени адаптивности МАС позволяет предположить, что включение дополнительных ресурсов даст возможность повысить среднюю удовлетворенность агентов для установившихся уровней. В экспериментах к основному потоку задач со средним объемом в 2 единицы в момент времени $t=10$ добавляются потоки задач с объемом 4...8 единиц, а в момент времени $t=15$ происходит включение 2-х дополнительных ресурсов с постоянной зависимостью удовлетворенности от загрузки (для исключения влияния

удовлетворенности ресурсов от их загрузки). Наблюдаемая динамика приведена на рис.3.17:



Рисунок 3.17 – Динамика удовлетворенности МАС при включении потока дополнительных задач со средним объемом от 4 до 8 ед. работы в момент $t=10$ модельного времени.

Включение ресурсов производится в момент $t=15$

МАС адаптируется к изменениям, показывая установившуюся среднюю удовлетворенность в 0,95, 0,85 и 0,75 при включении потока с 4,6,8 средними значениями работы. Для сравнения приведены (рисунок 3.18) графики средней удовлетворенности при начальном потоке в 2 единицы и включении дополнительного потока в 5 единиц в момент $t=10$, (график 1). График (2) показывает среднюю удовлетворенность после включения дополнительных ресурсов в $t=15$, график (3) – вычисленная установившаяся удовлетворенность по степени адаптивности $\gamma=0,011$.

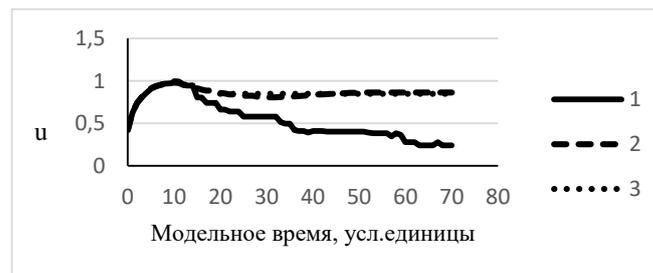


Рисунок 3.18 – Средний уровень удовлетворенности в зависимости от модельного времени: 1-включение дополнительного потока со средним объемом работ в 5 ед. в момент $t=10$, 2-включение потока в $t=10$ и дополнительных ресурсов в $t=15$, 3- вычисленный уровень средней удовлетворенности по величине степени адаптивности $\gamma=0,011$

При проведении эксперимента с планированием 500 связанных задач на 5-ресурсах было проведено планирование на горизонте в 100 ед. модельного времени.

Для имитации неблагоприятных событий произведено отключение 60% ресурсов. Мультиагентная система после кратковременного спада практически на 90% восстановила среднюю удовлетворенность. Это связано с перераспределением задач в режиме проактивности в свободные места ресурсов, рис. 3.19.

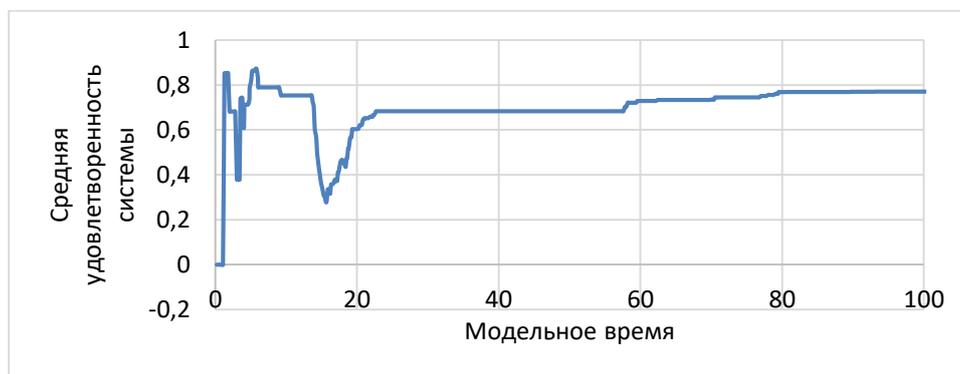


Рисунок 3.19 – Адаптивность МАС при планировании 500 задач

Введенная степень адаптивности позволяет количественно оценить реакцию исследуемой системы на внешние изменения.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Обоснованы требования к мультиагентной платформе, чтобы ускорить и удешевить разработки, а также обеспечить гибкость, производительность, масштабируемость и надежность создаваемых систем управления ресурсами.

2. Проведен анализ существующих МАТ платформ (Jade, Cougar, AgentBuilder и др.) и показано, что эти платформы не содержат механизмов управления ресурсами, а лишь автоматизируют сервисы низкого уровня;

3. Разработана архитектура мультиагентной программной платформы для ситуационного управления ресурсами, выделены основные модули и компоненты и показаны связи между ними.

4. Разработана технология создания интеллектуальной системы управления ресурсами, предполагающая этапы построения онтологии предметной области, мира агентов, классов агентов и протоколов взаимодействия, моделей ситуаций и типов событий, сценариев тестирования.

5. Разработаны основные классы агентов системы планирования: агенты заказов, технологических процессов и связанных задач, ресурсов, продуктов, подразделений (штабной).

6. Создан базовый прототип платформы, в котором реализованы следующие программные компоненты:

- a) базовые классы агентов и связей, сообщений и событий в виде основы для создания прикладных систем управления ресурсами различных предметных областей;
- b) механизм передачи сообщений между различными компонентами распределенных систем и взаимодействие с очередью событий;
- c) метод и средства создания версий сцен при анализе состояний изменения свойств агентов;
- d) механизмы ведения логов переговоров агентов (журналирование);
- e) графические компоненты пользовательского интерфейса для визуализации результатов.

7. Прототип платформы исследован на предмет качества и эффективности планирования:

- a) проведено сравнение результатов планирования потоков задач в разработанной МА платформе и системе оптимизации IBM CPLEX;
- b) показано, что качество МА планирования составляет 90% от точных значений, однако время вычислений в 10-20 раз меньше для сложных задач, что позволяет применять МАС в промышленных системах;
- c) Время событийной обработки составляет в платформе секунды благодаря адаптивности реализуемых методов и средств.

8. Предложена модель оценки степени адаптивности мультиагентных систем планирования ресурсов.

9. Показана возможность применения платформы и технологии для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени.

4 ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ

Предложенные модели, методы и средства построения интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий в реальном времени были использованы при создании промышленных систем, включая:

- управление производственными цехами предприятий машиностроения,
- управления грузопотоком Международной космической станции,
- управление грузовыми перевозками в логистике,
- управление проектами и цепочками поставок,
- управление работой роя спутников и некоторые другие.

Результаты разработки и применений указанных систем представлены в [35,36,38,97,98,123,125-131].

Ниже представлены наиболее успешные примеры промышленной реализации современных интеллектуальных систем управления реального времени, построенные в 2010-2016 гг.

4.1 Мультиагентная система производственного планирования Smart Factory

Мультиагентная система Smart Factory создана для увеличения производительности и эффективности завода, путем адаптивного распределения ресурсов, планирования, оптимизации и контроля сборочных и механических цехов, станков и персонала в реальном времени [121,129,130].

Система направлена на поддержку следующих видов деятельности предприятия:

- автоматизации оперативного планирования комплекса производственных структурных подразделений машиностроительного предприятия;

- планирования использования производственных ресурсов и распределения новых заказов по имеющимся мощностям;
- мониторинга и контроля исполнения намеченных планов;
- автоматизации подготовки данных для планирования производства сложных изделий, в том числе, при получении этих данных из смежных систем.

В рамках системы автоматизируются следующие виды деятельности:

- 1) ведение списка заказов для каждого цеха и формирование его текущего статуса;
- 2) ведение данных о структуре изделия и технологиям по каждому заказу;
- 3) формирование плана производства изделий и сопутствующих планов в цехе (план потребности в комплектующих, план межцехового взаимодействия по оказанию услуг, план на закупку сырья и материалов, план запуска в производство, план выпуска изделий, план загрузки оборудования);
- 4) ведение и контроль данных о выполненных работах и их качестве;
- 5) согласование плана межцеховых взаимодействий.

Система реализует следующие функциональные возможности по управлению ресурсами цехов производственных предприятий:

- 1) задание характеристик оборудования, процессов и технологии;
- 2) ведение базы знаний по станкам, технологическим процессам и рабочим;
- 3) автоматический импорт продукции и технологических процессов из САПР, с которыми обеспечивается интеграция;
- 4) введение нового заказа или других важных событий в любое время;
- 5) проведение моделирования и оценки того, как новый заказ влияет на предыдущие заказы, проводится его планирование и запуск на исполнение;

- 6) возможность проверки стоимости этого заказа в новых условиях;
- 7) возможность адаптивного и гибкого перераспределения и перепланирования ресурсов;
- 8) проактивную оптимизацию производственного плана (при наличии времени);
- 9) визуализацию сформированного плана в режиме реального времени;
- 10) поддержку применения различных стратегий планирования с различными критериями;
- 11) интерактивное улучшение планов для всех ресурсов;
- 12) связь с пользователями для координации и согласования действий;
- 13) назначение задач на каждый рабочий день по каждому рабочему в режиме реального времени (динамическое сменно-суточное задание);
- 14) мониторинг и контроль выполнения задач;
- 15) регистрацию обратной связи от рабочих по задачам (начало – остановка – задержка – выполнение);
- 16) оперативный контроль разницы между производственным планом по сравнению с фактом выполнения;
- 17) перепланирование в случае роста разрыва между планом и фактом;
- 18) автоматические отчеты и бизнес-радары реального времени.

Система интегрирована с существующими программами, такими как программы по складскому учету, расчету заработной платы, системами бухгалтерского учета и отчетности.

Разработанная система автоматизирует полный цикл управления цехами, от ввода заказов и планирования сменно-суточных заданий рабочим – до контроля исполнения построенного системой плана через терминалы рабочих.

Система используется на заводах, на которых характерны постоянные инновации, сложность и динамичность операций, а также высокая

неопределенность в спросе и предложении, что требует высокий уровень адаптивности в реальном времени в ответ на непредвиденные события.

Архитектура Smart Factory основана на архитектуре мультиагентной платформы, разработанной в главе 3.

Основная логика системы планирования реализована в составе агентов, которые функционируют от имени заказов, продукции, работников, станков, материалов и т.д.

Агенты постоянно пытаются реагировать на новые события, такие как поступление нового заказа, отказ оборудования, изменение приоритетов, новые срочные задачи, задержка в доставке материалов или операций рабочих и т.д., и также проактивно улучшают план работы, используя свободные станки и рабочих, путем цепочки сдвигов и перестановок ранее запланированных операций или перенося их на другие ресурсы. В результате, план работы цеха строится как баланс между интересами всех вышеперечисленных агентов.

Для взаимодействия пользователей в разработанной системе создан ряд автоматизированных рабочих мест (АРМов), реализующих полный цикл управления выполнением заказов: АРМ директора предприятия, АРМы начальников цехов, инженеров-технологов, инженеров планово-диспетчерских бюро (ПДБ), начальников участков, нормировщиков, рабочих.

Очередь событий дает руководителям и менеджерам возможность ввести информацию о новых событиях и начать перепланирование. Например, при вводе нового заказа на производство или при изменении характеристик уже запланированных заказов. На рис. 4.1 представлены совмещенные диаграммы Ганта и PERT на АРМе начальника цеха, которые показывают взаимосвязи между производственными операциями.

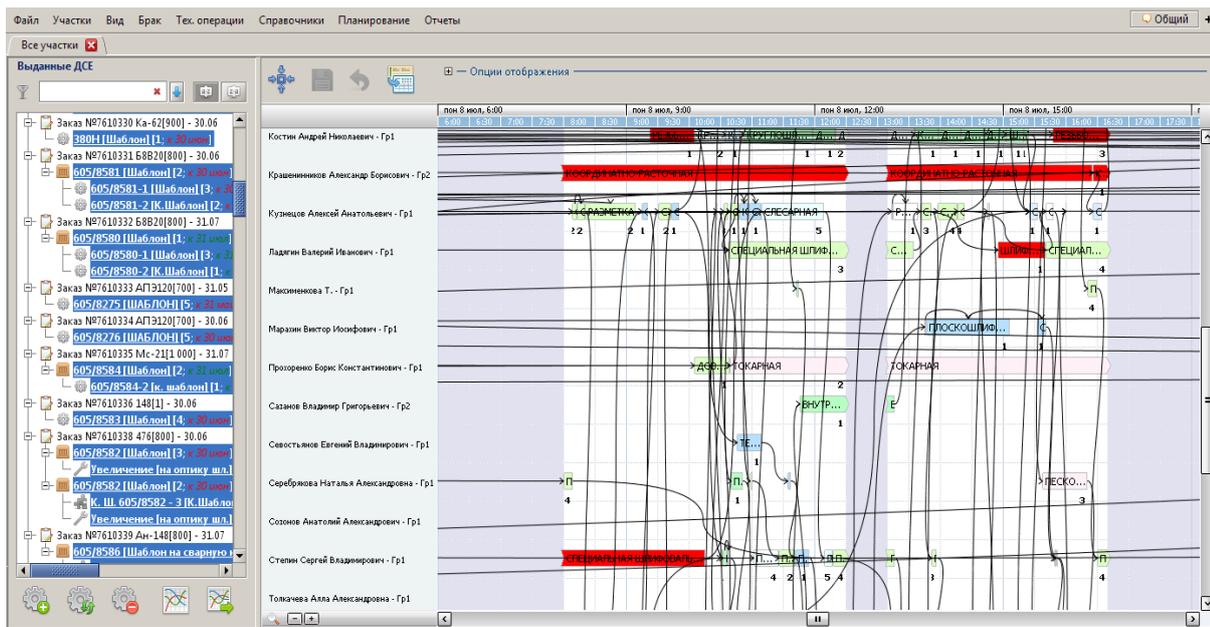


Рисунок 4.1 – АРМ начальника цеха

Руководитель подразделения может выбрать любую операцию на экране и перетащить ее к другому рабочему, а также соединить или разделить операции и подстроить план событий, запуская автоматическую цепочку изменений в плане. Для контроля исполнения на АРМах мастеров, инженеров ПДБ, начальников цехов размещены бизнес-радары контроля исполнения планов по показателям, которые доступны также в табличной форме с раскраской, сигнализирующей о проблемных заказах, рис. 4.2.

В случае, если у рабочего недостаточно навыков для операции, система выделит эту операцию красным цветом и выдаст предупреждающее сообщение пользователю. Список задач для рабочих может быть распечатан в стандартной форме или представлен на интерактивном терминале с сенсорным экраном.

Радар прогресса заказов. Зеленые – успевают, красные – нет

Да...	Но...	За...	Ос...	Ти...	Да...	Со...	Но...	Фа...	Пл...	Тр...	Ст...	Пр...	Сл...	Ус...	Сл...	Уч...	На...	Но...	Ко...	Те...	Пр...	Вы...	Те...	Пр...	За...	На...	На...	На...	Це...	
24...	222...	Хол...	[13...	вну...	29...	тех...	БИ...	-	0	0	-	1,42	№...	09	-	№...	ЗЕ...	ОБ...	3	-	-	-	Вол...	От...	не ...	не ...	001	30	№93	
11...	316...	Ко...	[13...	вну...	15...	тех...	БИ...	-	-	-	293...	9,62	№...	19	-	№...	ЗИП	ЮМ...	1	-	-	-	Зак...	От...	не ...	не ...			№95	
26...	222...	Хол...	[13...	вну...	31...	зап...	БИ...	922...	27...	11...	0	-	1,23	№...	10	-	№...	ФР...	ОБ...	12	01...	23...	26...	Вол...	Це...	не ...	не ...	001	30	№927
24...	222...	Хол...	[13...	вну...	29...	в р...	БИ...	23...	13...	0	-	1,4	№...	10	-	№...	МЕ...	ОБ...	10	30...	05...	11...	Вол...	От...	не ...	не ...	001	30	№92	
28...	222...	Хол...	[13...	вну...	30...	зап...	БИ...	16...	2,84	0	-	0,52	№...	19	-	№...	ОТ...	ОБ...	5	04...	12...	19...	Хох...	От...	не ...	не ...	001	30	№960	
11...	029	Хол...	[13...	рем...	31...	в р...	БИ...	06...	11,37	4,5	-	-	№...	-	№...	ПР...	-	1	12...	12...	-	Хох...	От...	не ...	не ...	008	17	№976		
12...	326...	Хол...	[13...	вну...	31...	зап...	БИ...	06...	12,56	5,88	-	6	№...	01	-	№...	ЗИП	ЮМ...	2	10...	14...	19...	Рус...	От...	не ...	не ...	001	33	№92	
07...	222...	Хол...	[13...	вну...	31...	зап...	БИ...	10...	11,56	5,09	-	2,8	№...	01	-	№...	ЗИП	ОБ...	3	29...	29...	10...	Ма...	От...	не ...	не ...	001	30	№92	
24...	222...	Хол...	[13...	вну...	29...	в р...	БИ...	30...	7,79	0	-	1,5	№...	10	-	№...	МЕ...	ОБ...	5	30...	05...	11...	Вол...	Це...	не ...	не ...	001	30	№93	
24...	222...	Хол...	[13...	вну...	29...	в р...	БИ...	31...	11...	0	-	1,3	№...	10	-	№...	МЕ...	ОБ...	8	30...	05...	11...	Вол...	Це...	не ...	не ...	001	30	№93	
24...	222...	Хол...	[13...	вну...	29...	в р...	БИ...	24...	13...	0	-	1,13	№...	10	-	№...	МЕ...	ОБ...	10	30...	05...	11...	Вол...	От...	не ...	не ...	001	30	№93	
24...	222...	Хол...	[13...	вну...	29...	в р...	БИ...	31...	9,996	0	-	1,3	№...	10	-	№...	МЕ...	ОБ...	7	30...	05...	11...	Вол...	Це...	не ...	не ...	001	30	№93	
24...	222...	Хол...	[13...	вну...	29...	в р...	БИ...	31...	11...	0	-	1,54	№...	10	-	№...	МЕ...	ОБ...	7	30...	05...	11...	Вол...	Це...	не ...	не ...	001	30	№93	
15...	350...	Хол...	[13...	рем...	30...	зап...	БИ...	13...	4,46	0	-	-	№...	-	№...	ПР...	-	1	30...	30...	-	Хох...	От...	не ...	не ...	008	17	№92		
11...	016...	Хол...	[13...	рем...	31...	тре...	БИ...	-	10...	0	-	-	№...	-	№...	КО...	-	1	19...	20...	-	Хох...	От...	не ...	не ...	готов	009	17	№95	
28...	222...	Хол...	[13...	вну...	30...	зап...	БИ...	02...	28...	0	-	4,9	№...	19	-	№...	ОБ...	5	06...	11...	02...	Хох...	От...	не ...	не ...	001	30	№960		
16...	-	ОА...	[13...	вне...	30...	зап...	БИ...	23...	4,32	4,26	-	-	№...	07	-	№...	ША...	-	1	19...	28...	29...	Хох...	От...	не ...	не ...	805	01	-	
25...	349...	ЗА...	[11...	вну...	06...	тре...	БИ...	08...	124...	0	-	132,6	№...	01	-	№...	ШТ...	ЮМ...	1	27...	09...	28...	Куз...	От...	не ...	не ...	805	01	№980	
11...	014...	Хол...	[11...	вну...	29...	зап...	БИ...	20...	139...	0	3381069	№...	02	-	№...	ДУ...	1	13...	19...	20...	-	Ив...	От...	не ...	не ...			№91		
12...	222	Хол...	[13...	рем...	31...	на ...	БИ...	-	-	-	-	-	№...	-	№...	НОЖ	-	4	16...	-	-	Зак...	От...	не ...	не ...			№937		
17...	014...	Хол...	[11...	вну...	31...	зап...	БИ...	13...	89...	15...	-	44,2	№...	02	-	№...	ПР...	СК...	1	08...	11...	11...	Зак...	От...	готов	готов	001	33	№935	
04...	222...	Хол...	[13...	вну...	31...	зап...	БИ...	10...	47...	0	8500	20	№...	19	-	№...	ТАРА	ОБ...	2	29...	07...	09...	Тре...	От...	готов	не ...	001	30	№967	
12...	222	Хол...	[13...	рем...	31...	не ...	БИ...	-	-	-	-	-	№...	-	№...	ПР...	-	1	-	-	-	-	От...	не ...	не ...	009	17	№921		
24...	222...	Хол...	[13...	вну...	29...	тех...	БИ...	-	0	0	-	1,8	№...	09	-	№...	МЕ...	ОБ...	20	-	-	-	Вол...	От...	не ...	не ...	001	30	№92	
12...	222...	Хол...	[13...	вну...	31...	зап...	БИ...	14...	79...	0	-	18,8	№...	19	-	№...	ТАРА	ОБ...	2	17...	15...	15...	Тре...	От...	готов	не ...	001	30	№947	
27...	222...	Хол...	[13...	вну...	31...	зап...	БИ...	09...	11,61	0	425	1	№...	08	-	№...	КА...	ОБ...	2	01...	30...	30...	Вол...	От...	не ...	не ...	001	30	№927	
23...	222...	Хол...	[13...	вну...	31...	в р...	БИ...	09...	9,16	0	1020	2,4	№...	09	-	№...	ФР...	ОБ...	5	06...	06...	11...	Вол...	От...	не ...	не ...	001	30	№927	
24...	222...	Хол...	[13...	вну...	29...	тех...	БИ...	-	224...	0	-	2,05	№...	10	-	№...	ПЛ...	ОБ...	22	-	-	-	Вол...	От...	готов	не ...	001	30	№93	
13...	316...	Ко...	[13...	рем...	30...	зап...	БИ...	09...	22...	0	-	-	№...	-	№...	ПР...	ЮМ...	1	24...	24...	-	Зак...	От...	не ...	не ...	809	01	№995		

Рисунок 4.2 – Экран инженера ПДБ. Просмотр заказов цеха

Данные решения увеличивают эффективность завода через гибкое планирование оборудования, рабочей силы и материалов в реальном времени. Оно может быть применено на любых заводах, которые требуют индивидуальный подход к каждому заказу, продукту или ресурсу, имеют небольшие производственные пакеты, требуют высокую квалификацию рабочих, имеют дело с множеством непредвиденных событий и требуют высокую эффективность и гибкость в производстве.

Основное решение «Smart Factory» реализовано для ОАО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг», ОАО «Кузнецов» и еще нескольких заводах [129,130].

Основными результатами развертывания решения являются:

- полная прозрачность ежедневных операций для заданного срока;
- увеличение производительности цеха на 15-20%;

- снижение усилий по распределению задач, планированию, согласованию, и наблюдению для текущего заказа – в 3-4 раза;
- увеличение эффективности ресурсов – от 15% и больше;
- снижение времени реакции на непредвиденные события – в 2-3 раза;
- увеличение процентного соотношения заказов предприятия, выполненных в установленные сроки – на 15-30%.

4.2 Интеллектуальная система Smart Projects оперативного управления ресурсами в проектах

Система Smart Projects предназначена для решения проблемы оперативного управления кадровыми ресурсами в проектах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИР и ОКР) при создании образцов новой авиакосмической техники, включая ракетносители, спутники и другие. Система Smart Projects автоматизирует управления проектами, поддерживая его на стадиях начала, согласования, составления планов, выполнения, контроля и наблюдения состояний, окончания [125-128].

В системе применяется разработанные автором метод «узкого звена» главы 2 в применении к составным задачам проектов. В архитектура системы используются основные компоненты, описанные в главе 3: база знаний, исполняющая мультиагентная система, сцена мира, виртуальный рынок проектов, очередь событий и компоненты интеграции.

Система обеспечивает:

- повышение качества и сокращение сроков выполнения проектов;
- прозрачность процесса выполнения проектов на любом уровне;
- эффективное использование ресурсов за счет постоянного перепланирования и поддержание плана в актуальном состоянии;
- повышение согласованности и обоснованности решений по управлению проектами;

- повышение оперативности в принятии решений и сокращение времени реакции на непредвиденные события, требующие изменения планов подразделений;
- заблаговременный прогноз «узких мест» и оптимизации ресурсов на основе анализа условий достижимости результатов;
- сокращение числа ошибок и возможности для возникновения негативных субъективных факторов при принятии управленческих решений;
- снижение рисков, связанных с обеспечением своевременного выполнения задач;
- создание условий для передачи знаний и роста производительности труда.

Взаимодействие пользователей с системой проводится через АРМы – специальные автоматизированные рабочие места исполнителей и руководителей подразделений всех уровней в виде форм журналов с таблицами, диаграммами, бизнес-радарными показателями планирования и выполнения.

Руководители могут моделировать картину того, как новые проекты влияют на существующий план по времени, и как они могут сказаться на других проектах, вытесняя менее приоритетные задачи, а также какова окажется себестоимость выполнения при данной конкретной загрузке исполнителей в подразделениях.

Система предоставляет возможность формировать расписание, исходя из актуальных данных, получаемых непосредственно с рабочих мест сотрудников.

В управлении работами система предоставляет функциональность по просмотру, корректировке и анализу плана работ. Руководитель может управлять работами через специализированный интерфейс – АРМ Руководителя, который предоставлен рядом интерфейсов:

- план работ в виде таблицы и структур;

- план работ в виде диаграммы Ганта;
- аналитические показатели по задачам и проектам;
- аналитические показатели по сотрудникам и подразделениям.

Табличный режим просмотра плана позволяет руководителю отслеживать состояние плана работ за счет статусов (не принята исполнителем, есть опоздание, есть превышение по трудоемкости) и состояния задач (не назначена, выполняется, на паузе и т.д.). В части управления руководитель может изменять временные (минимальная дата начала и срок исполнения), ресурсные (доступные исполнители, фиксированный исполнитель) ограничения по задачам, устанавливать особые отношения следования, а также задавать приоритеты или веса задач. Руководитель имеет реальную картину по каждой из задач любого проекта, рис. 4.3.

На диаграмме Ганта отображаются не только положения задач во времени, но также и связи между задачами. Руководителю обычно требуется вмешиваться лишь для распределения задач, которые остались не распределенными в ходе самоорганизации расписания проектов в подразделении.

В части управления персоналом система предоставляет функциональность по формированию профилей компетенций сотрудников (база компетенций, шкалы оценок, оценки компетенций для каждого сотрудника, с учетом истории), календарям работы, осуществлять оценку детальности сотрудников. В системе имеется также возможность сравнения профилей исполнителей между собой и анализа выполнения и качества работ.

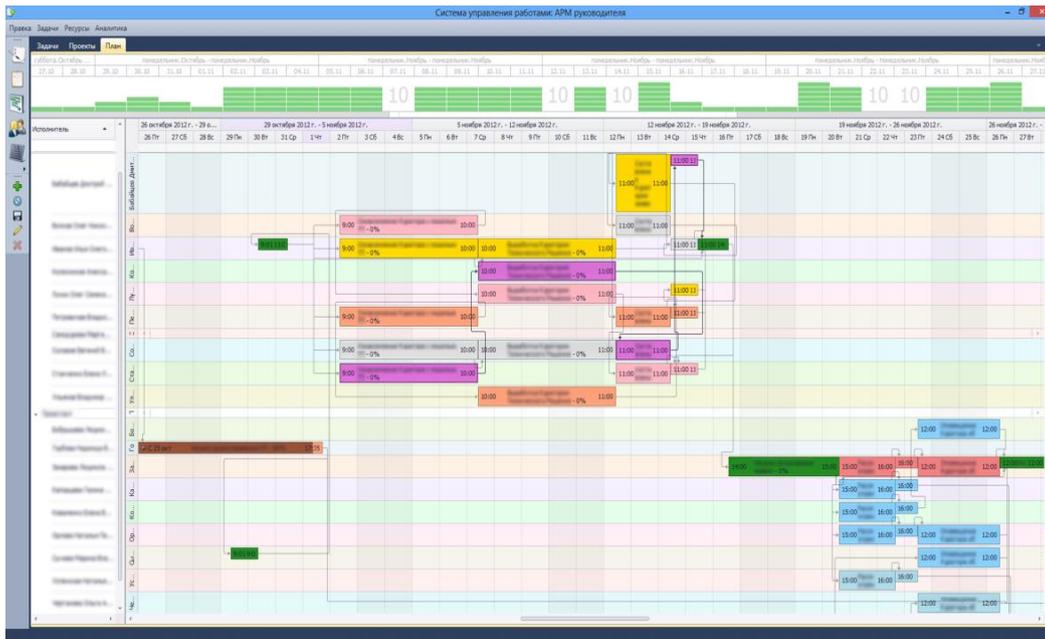


Рисунок 4.3 – Рабочее место руководителя. Представление плана в виде диаграммы Ганта

Непрерывный контроль над ходом выполнения проектов и конкретных задач дает система мониторинга показателей, отображающая их на АРМе руководителя в виде журналов и таблиц с подсветкой проблемных задач. Для наглядности показатели по критериям выполнения представляются в виде бизнес-радаров и диаграмм прогнозов выполнения по проектам, по загрузке сотрудников, рис. 4.4.

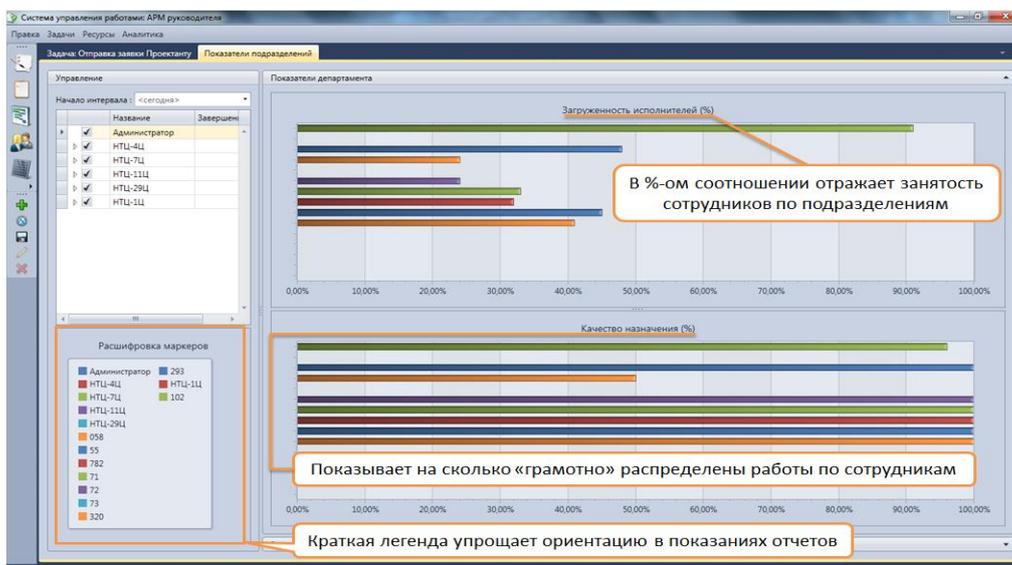


Рисунок 4.4 – Рабочее место руководителя с отображением показателей по сотрудникам

Исполнители могут просматривать свой перечень работ, создавать новые работы для своего плана, отмечать ход работ. Для поддержки согласованности планов система позволяет указать исполнителям свои ограничения и предпочтения по персональному плану, а так же осуществлять конструктивный диалог пользователя с системой.

Пользователь – инженер может указывать информацию относительно своих задач, а также о возникающих непредвиденных событиях (отсутствие необходимых документов, проблем с оборудованием и т.п.), тем самым позволяя собирать текущую информацию, которой руководитель может в данный момент не обладать. Благодаря такому динамичному сбору данных достигается высокая степень гибкости системы и, что крайне важно, актуальности планируемого графика задач предприятия.

Применение системы показало следующие результаты:

- повышение эффективности работы исполнителей (на 10-15%);
- накопление коллекции отработанных шаблонов решения задач по проектам для повторного использования, оптимизации, унификации и стандартизации производственных процессов (рост коэффициента повторного использования шаблонов до 50% и выше);
- оперативное и гибкое реагирование на непредвиденные события в реальном времени, своевременное перепланирование расписания для безусловного выполнения плана-графика (сокращение времени реакции на события в десятки раз);
- сокращение трудоемкости процессов планирования и поддержки принятия решений за счет вовлечения в них исполнителей с начала работы над проектом и автоматизации рутинных расчетов (в 4-5 раз);
- сокращение затрат на мониторинг и контроль исполнения плана в реальном времени, прогнозирование «узких мест» (в 2-3 раза).

В настоящее время система развивается в направлении создания персональных планировщиков сотрудников для контроля их загруженности и оперативного учета их квалификации и профессиональных предпочтений при разработке новых проектов, что позволит руководителям прогнозировать исполнимость новых заданий. Одновременно персональный контроль дает возможность управлять механизмом денежных поощрений с учетом индивидуального подхода к каждому сотруднику.

4.3 Мультиагентная система для построения расписания полетов и грузоперевозок для Международной космической станции

Данный проект, выполненный по заказу РКК «Энергия», был направлен на решение задачи построения программы полета и планирования грузопотока Международной космической станции (МКС).

Мультиагентная система для планирования полетов и поставки грузов на МКС предоставляет интерактивную поддержку разработки плана полетов и доставки грузов, учитывая множество настроек и ограничений: например, различные типы космических кораблей и МКС модулей, число космонавтов, расход топлива, прогнозирование, солнечная активность и баллистические эксперименты, минимальный интервал времени между операциями стыковки и отстыковки; постоянное присутствие по крайней мере одного управляемого космонавтом корабля, пристыкованного к станции и многие другие особенности [98,132]. Система планирует программу полета с учетом этих и множества других факторов, взаимодействуя с пользователем, рис. 4.5. Алгоритмы планирования агентами полетов, кораблей, грузов основаны на развитом в главе 2 методе «узкого звена» поочередного улучшения заданных критериев для каждого агента. Автором разработана модификация метода компенсаций для агентов полетов, грузов и кораблей при планировании грузопотока [98].

Основной особенностью системы является адаптивное создание программы грузопотока, по мере выявления новых потребностей станции, когда новые грузы могут вытеснять уже распределенные, имеющие меньший приоритет или сроки доставки на станцию, с учетом наличия места на ближайшем корабле или места размещения на борту, утилизации грузов и т.д.

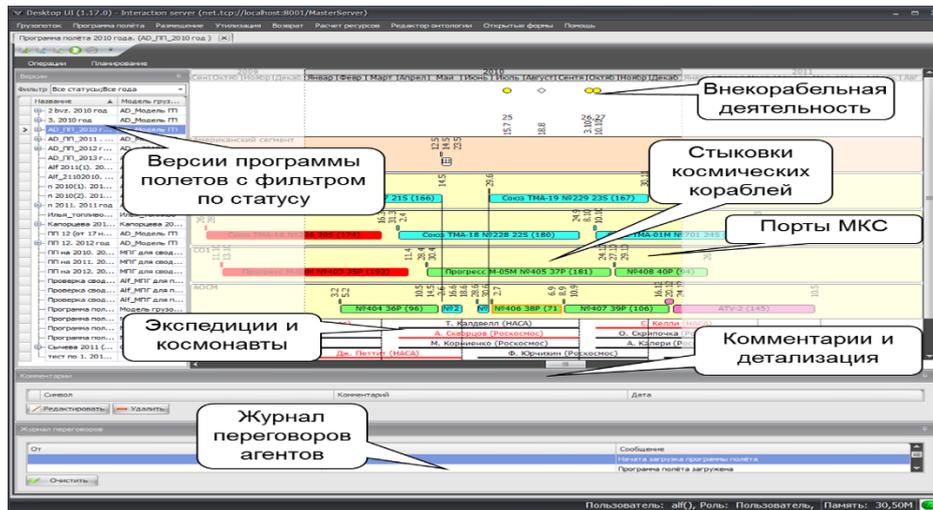


Рисунок 4.5 – Интерактивный редактор программы полетов

С использованием разработанной системы было разработано несколько программ полета на период 2010-2014 гг., а также выполнен детальный расчет ресурсов и построено расписание грузопотока на 2011-2012 гг., рис. 4.6.

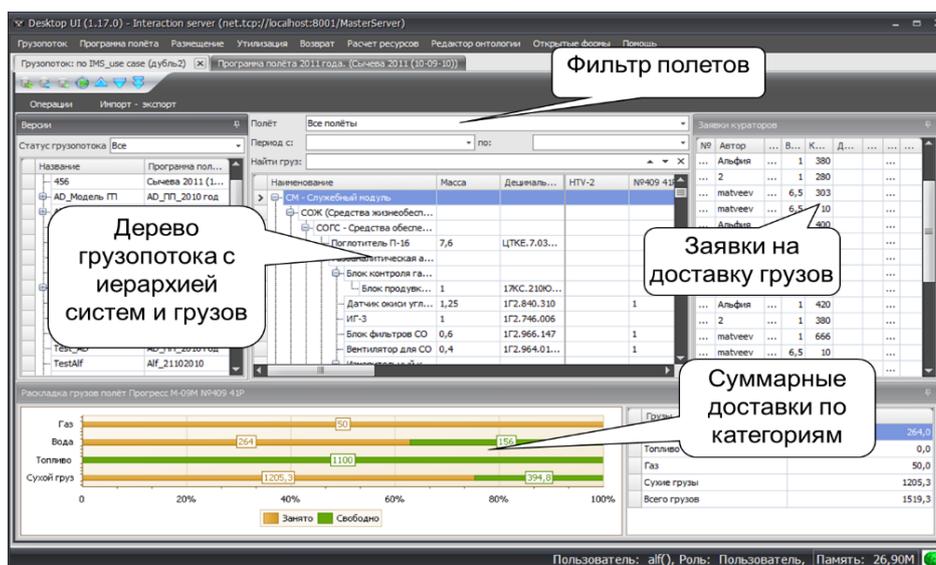


Рисунок 4.6 – Редактор грузопотока

Промышленная версия системы в настоящее время находится в эксплуатации в ПАО «РКК «Энергия». Основным эффектом внедрения был получен от сокращения времени на принятие решений при рассмотрении новых заявок и возможности моделировать различные варианты планирования для определения наилучшей реакции на поступающие события, что обеспечивает снижение рисков обеспечения станции критически важными грузами.

4.4 Мультиагентная система управления грузоперевозками Smart Trucks

Данная система была изначально разработана для заказчика, обладающего центральным офисом в Москве и более чем десятком филиалов по всей стране, организующим перевозки с использованием собственного флота из более 100 грузовиков, оснащенных датчиками GPS/ГЛОНАСС навигации, и более сотней привлеченных перевозчиков. При этом для поездок из Москвы в регионы и наоборот требуется обеспечивать поиск попутного груза, чтобы обеспечить максимальную эффективность использования машин с учетом особенностей контракта с клиентами, сроков поставок изделий, возможных рисков. Для решения задачи была разработана интеллектуальная система управления грузоперевозками, поддерживающая общее поле расписания для менеджеров центра и филиалов. В дальнейшем система была развита для использования в других задачах по грузовым перевозкам [97,105,133]. Архитектура системы основана на архитектуре платформы, описанной в главе 3.

Перечень базовых агентов включает агентов клиента, заказа, маршрута, груза, машины, водителя, поездки, а также предприятия в целом.

Критерии, предпочтения и ограничения для планирования включают в себя параметры качества предоставления транспортных услуг, себестоимости услуг, сроков и рисков.

Общая логика работы агентов определяется методом и протоколами взаимодействия на основе метод компенсаций в сети потребностей и возможностей, доработанным для мира транспортной логистики. Правила работы агентов на виртуальном рынке позволяют им вести переговоры об уступках в расписании на основе метода компенсаций. Для работы виртуального рынка поддерживается микроэкономика работы агентов 1-го рода – для расчета реальной себестоимости грузоперевозок и 2-го рода – для расчета стоимости построения расписания.

Smart Trucks обеспечивает автономный цикл управления ресурсами любого транспортного предприятия, минимизирующий использование персонала на всех уровнях, включая распределение, планирование, оптимизацию, прогнозирование, согласование и контроль исполнения планов по выполнению заявок на грузоперевозки в реальном времени.

Система подхватывает введенный заказ и пытается сначала разместить его на собственный флот, чтобы обеспечить его высокую загрузку и прибыльность. Система размещает заказы на наиболее подходящие свободные машины, а если таковых нет – выявляет конфликты с уже размещенными грузами и пытается выполнить подвижки заказов или перераспределение ресурсов. Если возможности прибыльно разместить заказ на своем флоте нет, то заказ выносится на третий флот привлеченных перевозчиков. Строятся оптимальные маршруты для каждого грузовика, рис. 4.7.

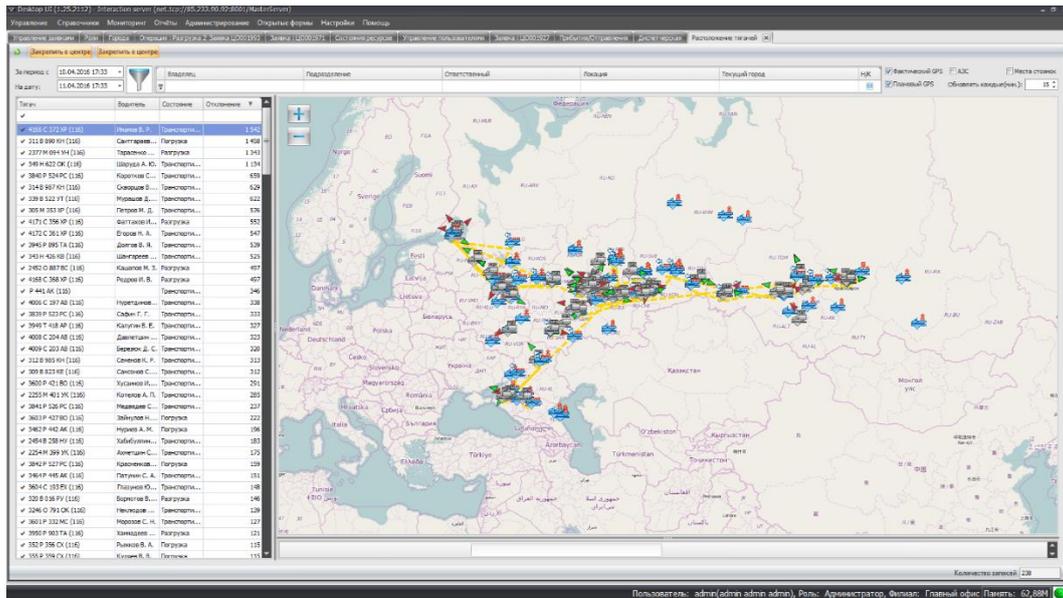


Рисунок 4.7 – Заказы и маршруты грузовиков

Формирующееся расписание грузовиков и водителей в виде диаграммы Ганта показано на рис. 4.8, где указаны операции перегона грузовика, разгрузки и погрузки, движения, отдыха и т.д.

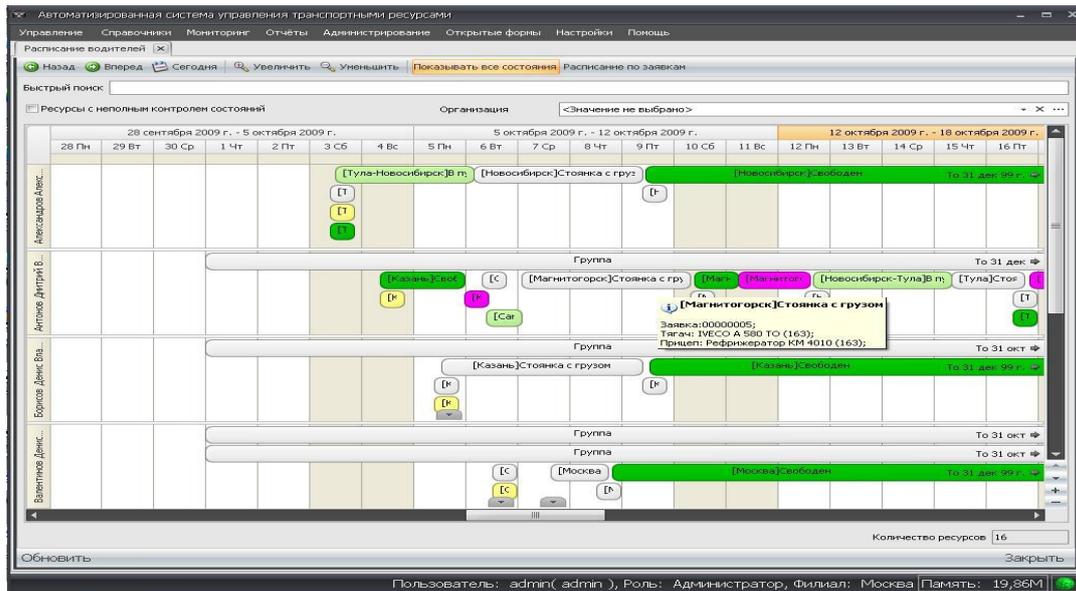


Рисунок 4.8 – Расписание грузовиков и водителей

Система реализует полный цикл управления ресурсами в реальном времени и предоставляет возможность автоматически контролировать бизнес-процесс получения заявки, загрузки и выгрузки груза. При этом в случае

расхождения плана и факта система автоматически перепланирует цепочки зависимых операций, формируя постоянно изменяющееся расписание.

В числе заказчиков данной системы – транспортно-экспедиционные компании «РусГлобал» и «Prologics» (Москва), «Лорри» (Екатеринбург), «Multi-Solutions» (Хельсинки), ООО «Техно Транс» и ряд других отечественных и зарубежных компаний.

По средним оценкам в результате внедрения системы уже в первый год работы примерно на 4.5% возрастает число выполненных заказов, причем наряду с общим ростом числа заявок на 2.7% увеличивается и коэффициент использования грузовика собственного флота, снижается на 3.5% число опозданий к клиенту, бизнес компании становится менее зависим от человеческого фактора, уменьшается трудоемкость расчетов и число ошибок. Разработанные методы и средства обеспечивают повышение уровня сервиса для клиентов, эффективности использования ресурсов, сокращение времени и стоимости услуг, минимизацию рисков и рост других важных показателей использования ресурсов.

4.5 Интеллектуальная система управления цепочками поставок товаров Smart Supply Chain

Система была разработана по заказу международной корпорации Лего, заинтересованной в повышении эффективности цепочек поставок товаров в магазины.

В качестве первой задачи была выбрана розничная сеть магазинов компании на территории США и Канады, в которой были выбраны 20 крупнейших магазинов Brand Retail Store и несколько центров дистрибуции (DC). Ежедневно в каждом магазине совершается около 1000 покупок (2000 товаров), информация о которых сохраняется в базах учетной SAP системы.

Поскольку процесс планирования поставок достаточно трудоемок и не автоматизирован, то в результате в каждом магазине из-за неточностей прогноза и жесткой периодичности поставок возникает недостаток некоторых наименований товаров или, наоборот, накопление излишков товаров по некоторым позициям. Это приводит к снижению возможной прибыли и дополнительным расходам на перераспределение остатков.

Система позволяет гибко реагировать на изменения спроса в каждом магазине, адаптивно создавать и пересматривать планы поставки около 600 наименований товаров в режиме реального времени, по мере того, как покупатели приобретают товары, и, тем самым, более полно удовлетворить спрос с меньшими издержками [131].

Реализованная в соответствии с изложенными в главах 2 и 3 принципами система управления поставками представляет собой комплекс из:

- мультиагентного модуля планирования, имеющего собственный программный интерфейс, который можно встраивать в уже существующие системы и, передавая на вход начальные данные и события, получать на выходе расписание сети или его изменения;
- web-сервиса, принимающего авторизуемые сетевые подключения пользователей, который обеспечивает хранение, фильтрацию и группировку данных, передаваемых между клиентами и модулем планирования, который встроен в него;
- клиентского web-приложения, которое запускается в окне браузера и подключается к серверу через интернет (рис. 4.9).

Система планирует движение продукции в сети поставок таким образом, чтобы общая прибыль сети была как можно больше, обеспечивая при этом быструю реакцию на все изменения и, как следствие, постоянное наличие актуального плана действий, ориентированного на извлечение максимума из текущей и предполагаемой в будущем ситуации [134].

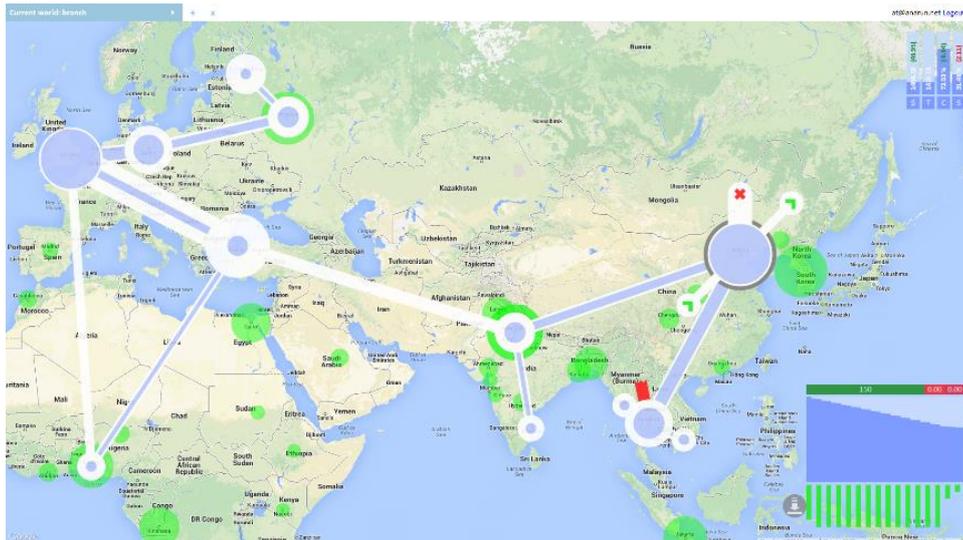


Рисунок 4.9 – Общий вид клиентского web-приложения

Логика работы системы Smart Supply Chain состоит в следующем. В систему вносится описание сети, включая все фабрики, центры дистрибуции, склады, магазины, каналы доставки, ограничения по пропускной способности, доступное для хранения пространство, производственные линии, реализуемую продукцию и используемые материалы, формулы расчета стоимости хранения, транспортировки, производства, и многие другие параметры, если их нужно учитывать.

Затем в систему поступает информация о текущих остатках разной продукции на складах во всей сети и прогнозы реализации во всех частях сети. Остатки, прогнозы или отдельные заказы, цены, стоимости и другие параметры могут меняться в реальном времени, вызывая частичное перепланирование и адаптацию плана действий к изменившимся условиям. План содержит информацию о том, что, где и когда надо закупать, производить, транспортировать, хранить и реализовывать. Запланированные действия распространяются на тот горизонт в будущее, на который известен (задан) прогноз спроса.

Функциональные возможности системы включают:

- планирование по отдельным заказам и по прогнозу спроса на любой горизонт и с любой детализацией (минуты, часы, дни, недели);
- учет пропускных способностей каналов и вместимости транспорта (грузовиков);
- учет доступного места для хранения продукции и материалов;
- гибкие модели учета стоимости транспортировки и хранения;
- ситуативный выбор наиболее эффективных каналов доставки (маршрутов в сети);
- планирования многостадийного производства с учетом потребности в материалах, оборудования;
- учет контрактных обязательств по объемам поставок и производства;
- учет различных цен на продукцию в разных частях сети;
- формирование страховых запасов для управления уровнем сервиса;
- управляемое планирование задержек заказов в условиях ограниченных возможностей сети;
- формирование предложений по изменению параметров сети;
- балансировку спектра реализуемой продукции, когда доставить все невозможно;
- консолидацию грузов и минимизацию стоимости доставок;
- учет графика доступности и рабочего времени отдельных узлов сети;
- учет длительности доставок и производства;
- учет карантина на продукцию.

Пользовательский интерфейс максимально интерактивен и нагляден, рис. 4.10. Управление сетью выполняется на карте, где видно расположение узлов сети, связывающие их каналы и основные параметры. Размеры узлов и каналов характеризуют их пропускную способность и величину потока продукции через них. Выделяя канал или узел (фабрика, склад, магазин), можно

посмотреть детали – график поставок, прогноз спроса, график остатков, упущенные продажи и поменять настройки, такие как размер склада, канала, текущие остатки, прогноз на конкретный день. Финансовые (прибыль, доход, расходы на доставку, хранение) и другие показатели (загрузка каналов, складов) представлены как для всей сети, так и для отдельных узлов.

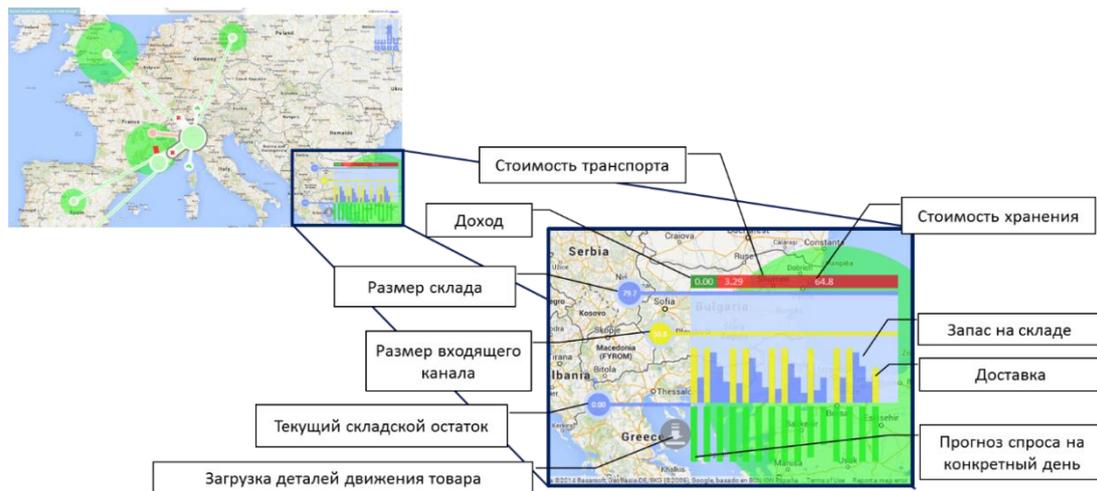


Рисунок 4.10 – Элементы пользовательского интерфейса

Система применяется для управления в реальном времени, когда она в автоматическом режиме обрабатывает события изменений и показывает, что нужно изменить в работе, чтобы наиболее эффективно сработать в изменившейся ситуации. Например, в таком режиме появление нереализованного товара на складе одного из магазинов (продажи ниже, чем ожидалось), может сразу показать, что надо поменять порядок производства и график закупок материалов.

Кроме того, адаптивный характер обработки изменений позволяет использовать систему для интерактивного моделирования сетей, когда пользователь делает копию сцены текущей ситуации с реальными остатками и прогнозами спроса и затем вносит изменения в конфигурацию сети, например, новый центр дистрибуции, другие каналы, другая модель производства, или меняет параметры отдельных узлов и каналов. Система немедленно

перепланирует потоки продукции под вносимые изменения и показывает прибыль или убыток от вносимых изменений.

В различных ситуациях, при разных типах модели бизнеса, решаемые системой задачи могут фокусироваться на формировании графика поставок, на выборе наиболее эффективных каналов из доступных, на балансировке дефицитных ресурсов, на производстве или на других возможностях.

Важной функциональной возможностью системы является уточнение прогноза в ходе работы. Поступающие в систему события продаж изменяют текущие состояния склада магазина по каждому продукту. Система строит прогноз расходования каждого товара на заданный период по времени и согласованно перестраивает поставку, которая фиксируется, находясь еще в будущем относительно текущего времени. Затем формируется следующая поставка, состав и объем которой учитывают не только прогноз потребления, состояние склада, но и поставки, находящиеся в будущем относительно текущего времени, но уже находящиеся в пути. Система отслеживает состояния товаров на основе данных, поступающих из внешних учетных систем, и оперативно реагирует на все изменения. При уменьшении спроса на какой-либо товар его поставки происходят с большими промежутками, а при возрастании спроса – их частота увеличивается. Время фиксации поставки планировщика зависит от условий транспортировки и может составлять до нескольких дней. На рис. 4.11 показан экран системы адаптивного планирования, представляющий текущие продажи, прогноз и атрибуты заказов.

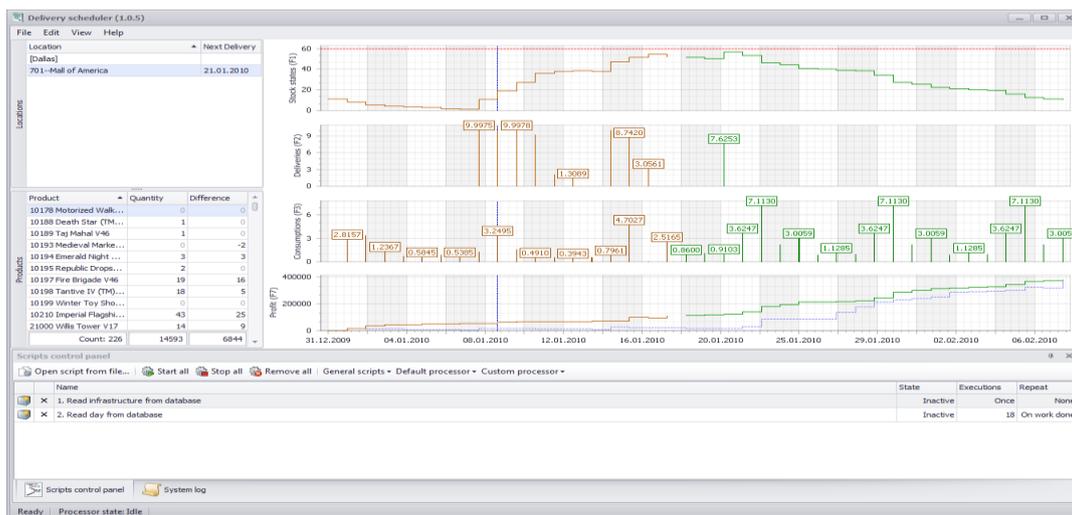


Рисунок 4.11 – Представление графика текущих продаж и прогноза продаж

С использованием разработанной системы, на основе сравнения с данными по продаже игрушек известного бренда за 1 год в 20 выбранных магазинах США, были получены следующие результаты:

- снижение убытков от потерянных продаж с 40% до 16%;
- повышение уровня сервиса магазинов с 66% до 86%;
- повышение рентабельности продаж с 56% до 81%.

Полученные данные показывают большой потенциал для повышения эффективности продаж в цепочках поставок при переходе к динамическому прогнозированию и адаптивному планированию даже для компаний с весьма совершенными бизнес-процессами, большим опытом и высоко квалифицированным персоналом.

Другие промышленные приложения разработанных мультиагентных систем для управления ресурсами в реальном времени описаны в [97].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Представлен краткий обзор мультиагентных систем, разработанных в 2010-2016 гг. с участием автора, в которых применяются разработанные модели, методы и средства.

2. Показано, что мультиагентные технологии уже сегодня позволяют решать сложные задачи и создавать промышленные системы для управления ресурсами в реальном времени. В результате внедрения обеспечивается повышение качества и эффективности работы предприятий, сокращаются затраты, уменьшается зависимость от человеческого фактора.

3. Разработанные методы и средства создания мультиагентных систем применимы для решения широкого круга сложных задач, таких как управление машиностроительными предприятиями (Smart Factory), управление проектами в аэрокосмической области (Smart Projects), управление доставкой грузов на Международную космическую станцию, управление грузоперевозками и транспортной логистикой (Smart Trucks), цепочками поставок (Smart Supply Chain), что свидетельствует о высокой действенности развиваемого подхода.

4. Результаты внедрений свидетельствуют о возможности значительного повышения эффективности использования ресурсов на 15-25% за счет перехода к принятию решений в реальном времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном диссертационном исследовании разработаны новые модели, методы и средства ситуационного управления ресурсами в реальном времени на основе мультиагентных технологий.

Рассмотрен подход к построению расписаний в мультиагентных системах как к динамическому процессу самоорганизации и установления равновесия (баланса интересов) в сети агентов потребностей и возможностей. Предложена модификация метода сопряженных взаимодействий, заключающаяся в расширении состава базовых классов агентов (заказы, техпроцессы, задачи, продукты и ресурсы, штабной) и протоколов их взаимодействия, а также во введении функций удовлетворенности и функций бонусов-штрафов агентов. Введены валюты 1-го (для реальных затрат) и 2-го рода (для виртуальных затрат на планирование), позволяющие управлять процессами планирования в системе.

Предложен метод «узкого звена» для ситуационного управления ресурсами в мультиагентной системе, заключающийся в итерационных улучшениях наихудших показателей в процессе переговоров.

Предложен подход к оценке степени адаптивности системы к событиям в результате переходного процесса восстановления равновесия.

Разработана и реализована архитектура мультиагентной платформы, включающая базовые классы агентов, сцену мира предметной области как копию реальности, очереди событий и другие.

Разработана технология создания интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий в реальном времени.

Проведено исследование качества и скорости планирования в мультиагентной платформе по сравнению со стандартными планировщиками.

Разработанные методы и средства были применены для создания промышленных систем управления цехами предприятий, планирования грузоперевозок, управления проектами, в системе планирования грузопотока на Международную космическую станцию, в системах цепочек поставок, в системах управления беспилотными летательными аппаратами и показали свою эффективность.

Основные результаты работы

1. Выполнен системный анализ существующих методов управления ресурсами предприятий и показана их ограниченная применимость к типовым задачам ситуационного управления ресурсами.
2. Расширена модель ПВ-сети и предложена двухуровневая модель микроэкономики виртуального рынка, использующая функции бонусов-штрафов для управления качеством и эффективностью планирования.
3. Предложен метод ситуационного управления ресурсами в реальном времени, использующий модифицированные классы агентов и протоколы их взаимодействия в ПВ-сетях, основанные на применении функций удовлетворенности и бонусов-штрафов.
4. Разработана архитектура мультиагентной платформы и технология для построения интеллектуальных систем ситуационного управления.
5. На основе платформы создан ряд промышленных интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени: Smart AeroSpace, Smart Factory, Smart Projects, Smart Trucks, Smart Supply Chain, повышающих на 15-25% эффективность использования ресурсов.
6. Предложена оценка степени адаптивности создаваемых интеллектуальных систем управления ресурсами.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПВ-сеть – сеть потребностей и возможностей.

МАС – мультиагентная система.

МАТ – мультиагентные технологии.

БД – база данных.

ERP-система – Enterprise Resource Planning.

KPI – Key Performance Indicator, ключевой показатель эффективности.

ЛПР – лицо, принимающее решения.

АРМ – автоматизированное рабочее место.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родов А.С., Крутянский Д.И. План, поток, ритм. – Ростов: Ростовское книжное издательство, 1964. – 71 с.
2. Синго С. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства. / Пер. с англ. – М: Издательство ИКСИ, 2006. – 312 с.
3. Бурков В.Н. и др. Механизмы управления: Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль. / Под ред. Новикова Д.А. – М.: Ленанд, 2013. – 216 с.
4. Burkov V.N. et al. Introduction to theory of control in organizations. – CRC Press, 2015. – 346 с.
5. Губко М.В., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Управление организационными системами: современные научные направления // Проблемы теории и практики управления. – 2011. – № 12. – С. 62-71.
6. Новиков Д. А., Губко М. В. Оптимизационные и теоретико-игровые модели управления структурой сложных систем // Материалы Седьмой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2013), 30 сентября – 2 октября 2013., Москва. – М.: ИПУ РАН, 2013. – С. 99-101.
7. Скобелев П.О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии. – 2013. – №. 1. – С. 1-32.
8. Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry. / Edited by Leitão P., Karnouskos S. – Morgan Kaufmann, 2015. – 476 p.

9. Граничин О.Н., Скобелев П.О. Суперкомпьютеры и мультиагентные технологии для решения сложных задач управления ресурсами в реальном времени // Суперкомпьютеры. – № 4(16). – 2013. – С.54-59.
10. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука, 1986. – 228 с.
11. Pinedo M. Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems. – Springer, 2016. – 670 p.
12. Pinedo M., Zacharias C., Zhu N. Scheduling in the service industries: An overview // Journal of Systems Science and Systems Engineering. – 2015. – V. 24. – №. 1. – P. 1-48.
13. Baker K. R., Trietsch D. Principles of sequencing and scheduling. – John Wiley & Sons, 2013. – 512 p.
14. Palmer D. Maintenance planning and scheduling handbook. – McGraw-Hill Professional Publishing, 1999. – 544 p.
15. Just-in-time Systems. / Edited by Rios R., Ríos-Solís Y. A. – Springer Science & Business Media, 2012. – 308 p.
16. Скобелев П.О. и др. Обзор систем адаптивного планирования производства // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – №. 11. – С. 28-36.
17. Ovacik I.M., Uzsoy R. Decomposition methods for complex factory scheduling problems. – Springer Science & Business Media, 2012. – 213 p.
18. Framinan J.M., Leisten R., García R.R. Manufacturing scheduling systems: an integrated view on models, methods and tools. – London: Springer, 2014. – 400 p.
19. Sule D.R. Production planning and industrial scheduling: examples, case studies and applications. – CRC press, 2007. – 560 p.
20. Chapman S. N. The fundamentals of production planning and control. – Prentice Hall, 2006. – 272 p.

21. Driessel R., Mönch L. Variable neighborhood search approaches for scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times, precedence constraints, and ready times // *Computers & Industrial Engineering*. – 2011. – V. 61. – №. 2. – P. 336-345.
22. Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing // *Journal of intelligent manufacturing*. – 2000. – V. 11. – №. 4. – P. 403-419.
23. *Handbook of scheduling: algorithms, models, and performance analysis.* / Edited by Leung J.Y.T. – CRC Press, 2004. – 1224 p.
24. Лазарев А. А., Гафаров Е. Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: Физический факультет МГУ. – 2011.
25. *Vehicle routing: problems, methods, and applications.* / Edited by Toth P., Vigo D. – Siam, 2014. – 463 p.
26. *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges.* / Edited by Golden B.L., Raghavan S., Wasil E.A. – Springer Science & Business Media, 2008. – 591 p.
27. Laporte G. Fifty years of vehicle routing // *Transportation Science*. – 2009. – V. 43. – №. 4. – P. 408-416.
28. Labadie N., Prins C., Prodhon C. *Metaheuristics for Vehicle Routing Problems.* – John Wiley & Sons, 2016. – 194 p.
29. Ganesh K., Narendran T. T. *Composite Heuristics for a Class of Vehicle Routing Problems: Consideration of Delivery, Pick-up and Time Windows.* – LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 220 p.
30. Anbuudaysankar S. P., Ganesh K., Mohapatra S. *Models for Practical Routing Problems in Logistics.* – Springer, 2014. – 165 p.
31. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит. – 2009. – 280 с.

32. Амелин К.С., Граничин О.Н. Мультиагентное сетевое управление группой легких БПЛА // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2011. – № 6. – С. 64-72.
33. Eun Y., Bang H. Cooperative task assignment/path planning of multiple unmanned aerial vehicles using genetic algorithm // Journal of aircraft. – 2009. – V. 46. – №. 1. – P. 338-343.
34. Morbidi F., Freeman R. A., Lynch K. M. Estimation and control of UAV swarms for distributed monitoring tasks // Proceedings of the 2011 American Control Conference. – IEEE, 2011. – P. 1069-1075.
35. Будаев Д.С., Вошук Г.Ю., Гусев Н.А., Майоров И.В., Мочалкин А.Н. Разработка интеллектуальной системы адаптивного планирования действий групп летательных аппаратов для согласованного выполнения задач // III Всероссийская научно-техническая конференция «РТИ Системы ВКО – 2015»: труды конференции. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – С. 506-514.
36. Будаев Д.С. и др. Разработка мультиагентной среды для моделирования процессов управления ресурсами мониторинга космического пространства // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 (Москва, 16 – 19 июня 2014 г.): Труды. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 8934-8941.
37. Иванов А.Б. и др. Адаптивное планирование сеансов связи малых космических аппаратов в сети наземных пунктов приема информации на основе мультиагентных технологий // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16 – 19 июня 2014 г.: Труды. [Электронный ресурс] – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 8975-8983.
38. Калашников Д.А. и др. Метод адаптивного планирования сеансов связи ЦУП с группировкой космических аппаратов по критериям надежности и

- экономичности связи // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2015. – №. 1. – С. 58-70.
39. Katyul M., Mishra A. A Comparative Study of Load Balancing Algorithms in Cloud Computing Environment // International Journal of Distributed and Cloud Computing. – 2015. – V. 1. – №. 2. – P. 5-11
40. Cheng A. M. K. Real-time systems: scheduling, analysis, and verification. – John Wiley & Sons, 2003. – 552 p.
41. Амелина Н. О., Граничин О.Н. Управление балансировкой загрузки в вычислительных сетях // Глава 13 в монографии «Проблемы сетевого управления» – СПб.: Наука. – 2015. – С.297-318.
42. Амелина Н.О. Мультиагентные технологии, адаптация, самоорганизация, достижение консенсуса // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2011. – Т. 7. – №. 1. – С. 149-185.
43. Граничин О.Н., Молодцов С.Л. Создание гибридных сверхбыстрых компьютеров и системное программирование. – СПб, 2006. – 108 с.
44. Kerzner H. R. Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling. – John Wiley & Sons, 2013. – 1296 p.
45. Neumann K., Schwindt C., Zimmermann J. Project scheduling with time windows and scarce resources: temporal and resource-constrained project scheduling with regular and nonregular objective functions. – Springer Science & Business Media, 2012. – 385 p.
46. Melchior P. Dynamic and Stochastic Multi-project Planning. – Springer, 2015. – 673 p.
47. Лазарев А.А., Мусатова Е.Г. Целочисленные постановки задачи формирования железнодорожных составов и расписания их движения // Проблемы управления на железнодорожном транспорте. — ИПУ РАН Москва, 2012. – С. 161–169.

48. Лазарев А.А. Садыков Р.Р. Задача управления парком грузовых железнодорожных вагонов // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – Москва. – 2014. – С. 5083-5093.
49. Тимченко В.С. Алгоритмизация процессов оценки пропускной способности железнодорожных участков в условиях предоставления окон //Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2013. – №. 5 (48). – С. 34 – 37.
50. Хуснуллин Н.Ф. Построение расписания движения поездов при проведении ремонтных работ на двухпутной железной дороге //XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 Москва. – 2014. – Т. 16. – С. 19.
51. Corman F. et al. Railway dynamic traffic management in complex and densely used networks //Intelligent Infrastructures. – Springer Netherlands, 2010. – С. 377-404.
52. Hu H., Li K., Xu X. A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving //Journal of Modern Transportation. – 2013. – Т. 21. – №. 1. – С. 9-16.
53. Monczka R. M. et al. Purchasing and supply chain management. – Cengage Learning, 2015. – 888 p.
54. Bowersox D. J., Closs D. J., Cooper M. B. Supply chain logistics management. – New York: McGraw-Hill, 2002. – 656 p.
55. Christopher M. Logistics and supply chain management: creating value-added networks. – Pearson education, 2005.
56. Novack R. A. et al. Transportation: A supply chain perspective. – South-Western Cengage Learning, 2011. – 528 p.
57. Данциг Д. Линейное программирование, его применения и обобщения. – М.: Прогресс, 1966. – 600 с.

58. Танаев, В. С., Шкурба В. В. Введение в теорию расписаний. – М.: Наука, 1975. – 256 с.
59. Bellman R., Esogbue A.O., Nabeshima I. Mathematical Aspects of Scheduling and Applications: Modern Applied Mathematics and Computer Science. – Elsevier, 2014. – 344 p.
60. Conway R.W., Maxwell W.L., Miller L.W. Theory of scheduling. – Courier Corporation, 2003. – 294 p.
61. Brucker P., Knust S. Complex Scheduling. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – 342 p.
62. Kaban A.K., Othman Z., Rohmah D.S. Comparison of dispatching rules in job-shop scheduling problem using simulation: a case study // International Journal of Simulation Modelling. – 2012. – V. 11. – №. 3. – P. 129-140.
63. Goldberg D.E. Genetic Learning in optimization, search and machine learning – Addison Wesley Professional, 1994 – 432 p.
64. Godinho Filho M., Barco C.F., Neto R.F.T. Using Genetic Algorithms to solve scheduling problems on flexible manufacturing systems (FMS): a literature survey, classification and analysis // Flexible Services and Manufacturing Journal. – 2014. – V. 26. – №. 3. – P. 408-431.
65. Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications / Edited by Abraham A., Xhafa F. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008 – 346 p.
66. Euchi J. Metaheuristics to solve some variants of vehicle routing problems: Metaheuristics algorithms for the optimization of some variants of logistics and transport problems. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 156 p.
67. Bio-inspired algorithms for the vehicle routing problem. / Edited by Pereira F. B., Tavares J. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 216 p.

68. Yagmahan B., Yenisey M.M. A multi-objective ant colony system algorithm for flow shop scheduling problem // *Expert Systems with Applications*. – 2010. – V. 37. – №. 2. – P. 1361-1368.
69. Abdallah H. et al. Using ant colony optimization algorithm for solving project management problems // *Expert Systems with Applications*. – 2009. – V. 36. – №. 6. – P. 10004-10015.
70. Del Valle Y. et al. Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems // *IEEE Transactions on evolutionary computation*. – 2008. – V. 12. – №. 2. – P. 171-195.
71. Sha D.Y., Lin H.H. A multi-objective PSO for job-shop scheduling problems // *Expert Systems with Applications*. – 2010. – V. 37. – №. 2. – P. 1065-1070.
72. Sache M.R.G. Neural Network for Solving Job-Shop Scheduling Problem // *IOSR Journals (IOSR Journal of Computer Engineering)*. – V. 1. – №. 16. – P. 18-25.
73. Modi P.J. et al. An asynchronous complete method for distributed constraint optimization // *AAMAS*. – 2003. – V. 3. – P. 161-168.
74. Tambe M. Towards flexible teamwork // *Journal of artificial intelligence research*. – 1997. – V. 7. – P. 83-124.
75. Yokoo M. Distributed constraint satisfaction: foundations of cooperation in multi-agent systems. – Springer Science & Business Media, 2012.
76. Yokoo M. et al. The distributed constraint satisfaction problem: Formalization and algorithms // *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*. – 1998. – V. 10. – №. 5. – P. 673-685.
77. Petcu A. A class of algorithms for distributed constraint optimization. – Ios Press, 2009. – 277 p.
78. Meisels A. Distributed Search by Constrained Agents: algorithms, performance, communication. – Springer-Verlag London, 2008. – 216 p.

79. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы // М.: СИНТЕГ. – 1999. – 128 с.
80. Wooldridge M. An introduction to multiagent systems. – John Wiley & Sons, 2009. – 484 p.
81. Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets/ Edited by Jennings N.R., Wooldridge M.J. – Springer, 2002. – 325 p.
82. Tambe M. Towards flexible teamwork // Journal of artificial intelligence research. – 1997. – V. 7. – P. 83-124.
83. Rzevski G. A practical Methodology for Managing Complexity // Emergence: Complexity and Organization. – 2011. – V. 13. – №. 1/2. – P. 38.
84. Rzevski G. Using complexity science framework and multi-agent technology in design // Embracing complexity in design/ Edited by Alexiou K., Johnson J., Zamenopoulos T. – London-New York: Routledge, 2009. – P. 61-72.
85. Rzevski G., Skobelev P. Managing complexity. – Wit Press, 2014. – 216 p.
86. Тарасов В. Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – №. 2. – С. 5-63.
87. Городецкий В. И. и др. Мультиагентные технологии для оперативного управления ресурсами в реальном времени // Третья мультikonференция по проблемам управления (12-14 октября 2010 г., Санкт-Петербург): материалы конференции. – Санкт-Петербург: ОАО «Концерн ЦНИИ Электроприбор», 2010. – С. 12-14.
88. Городецкий В.И. Информационные технологии и многоагентные системы // Проблемы информатизации. – 1998. – №. 1. – С. 3-14.
89. Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В. Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – Т. 2. – С. 64-117.

90. Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В. Многоагентная технология принятия решений в задачах объединения данных //Труды СПИИРАН. – 2002. – Т. 1. – №. 2. – С. 12-37.
91. Виттих В.А., Моисеева Т.В., Скобелев П.О. Принятие решений на основе консенсуса с применением мультиагентных технологий // Онтология проектирования. – 2013. – №. 2 (8) – С. 20-25.
92. Виттих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. – 2009. – Т. 45. – №. 2. – С. 84-86.
93. Виттих В. А., Скобелев П.О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №. 1. – С. 177-185.
94. Скобелев П.О. и др. Разработка мультиагентной системы планирования, прогнозирования и моделирования производства //Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №. 1. – С. 22-30.
95. Скобелев П.О. Метод компенсаций для поддержки процессов принятия решений при динамическом распределении ресурсов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2002. – Т. 4. – №. 1. – С. 104-112.
96. Скобелев П.О. Самоорганизация и эволюция в открытых мультиагентных системах для холонических предприятий // Труды Международного конгресса «Искусственный интеллект», Дивноморское 3-8 сентября, 2001. – М.: Физматлит, 2001. – Т. 1. – С. 314-338.
97. Скобелев П.О., Майоров И.В. Мультиагентные технологии в интеллектуальных системах управления ресурсами в реальном времени // Морские информационно-управляющие системы. – 2015. –№1(7). – С. 24-39.

98. Бидеев А.Г., Карбовничий В.П., Майоров И.В., Новиков А.Л., Скобелев П.О, Сычева М.В. Метод адаптивного планирования грузопотока в интерактивной мультиагентной системе расчета программы полета, грузопотока и ресурсов российского сегмента Международной космической станции // Космическая техника и технологии. – 2014. – №1(4). – С. 29-38.
99. Скобелев П.О. и др. Об одном подходе к оценке степени адаптивности мультиагентной системы для управления ресурсами в реальном времени // Труды XVI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 30 июня-03 июля 2014г. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 270-281.
100. Skobelev P. et al. Measuring Adaptability of «Swarm Intelligence» for Resource Scheduling and Optimization in Real Time // Proceedings of the International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART), Lisbon, Portugal, 2015. – 2015. – V.2. – p. 517-522.
101. Skobelev P. et al. Multi-agent Platform for Designing Real Time Adaptive Scheduling Systems // International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems. – Springer International Publishing, 2014. – С. 383-386.
102. Skobelev P. et al. Practical Approach and Multi-agent Platform for Designing Real Time Adaptive Scheduling Systems //International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems. – Springer International Publishing, 2014. – С. 1-12.
103. Skobelev P. et al. Real Time Scheduling of Data Transmission Sessions in a Microsatellites Swarm and Ground Stations Network Based on Multi-Agent Technology // Proceedings of the 6th International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications (ECTA 2014). – 2014. – P. 153-159.

104. Skobelev P.O. et al. Multi-agent tasks scheduling system in software defined networks // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2014. – V. 510. – №. 1. – P. 012006.
105. Skobelev P., Mayorov I. and Lada A. Solving the initial transport resources allocation subproblem in a special FTL real-time transportation optimization problem by the Hungarian method // MICNON. – 2015. – P. 638-643.
106. Valckenaers P. et al. Schedule execution in autonomic manufacturing execution systems // Journal of manufacturing systems. – 2007. – V. 26. – №. 2. – P. 75-84.
107. Valckenaers P., Van Brussel H. Holonic manufacturing execution systems //CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2005. – V. 54. – №. 1. – P. 427-432.
108. Groover M.P. Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing. – Prentice Hall Press, 2007.
109. Leitão P., Colombo A. W., Karnouskos S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges //Computers in Industry. – 2016. – V. 81. – P. 11-25.
110. Mosterman P. J., Zander J. Industry 4.0 as a cyber-physical system study //Software & Systems Modeling. – 2016. – V. 15. – №. 1. – P. 17-29.
111. Питеркин С. В. и др. Точно вовремя для России. Практика применения ERP-систем //Russian Journal of Mathematical Physics. – 2016. – Т. 23. – №. 2. – С. 207-218.
112. SAP [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sap.com/product/enterprise-management.html>.
113. Oracle. Набор приложений Oracle E-Business Suite [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.oracle.com/ru/products/applications/ebusiness/overview/index.html>.

114. Microsoft Dynamics AX [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.microsoft.com/ru-ru/dynamics/default.aspx>.
115. Infor [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.infor.com/solutions/erp/>.
116. Галактика [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.galaktika.ru>.
117. 1С:ERP Управление предприятием 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://v8.1c.ru/erp/>.
118. JADE. JAVA Agent DEvelopment Framework [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://jade.tilab.com/>.
119. The AnyLogic [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.anylogic.ru>.
120. Agent Builder [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.agentbuilder.com/Documentation/Pro/index.html>.
121. Майоров И.В. Постановка задачи адаптивного планирования производственных ресурсов предприятий в мультиагентном подходе // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2015. – №. 3. – С. 47-55.
122. Майоров И.В., Скобелев П.О. Модель динамики агентов потребностей и возможностей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVII Международной конференции (22-25 июня 2015, Самара, Россия) / Под ред. Е.А. Федосова, Н.А. Кузнецова, В.А. Виттиха. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2015. – С.79-87.
123. Майоров И.В. Применение мультиагентной платформы для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – №1. – С. 37–41.
124. Mayorov I., Skobelev P. Toward thermodynamics of real-time scheduling // Complex Systems: Fundamentals & Applications. – 2016. – V. 90. – P. 79.

125. Клейменова Е.М. и др. Интеллектуальная система «Smart Projects» для оперативного управления ресурсами в проектах НИР и ОКР в реальном времени // Информационные технологии. – 2013. – №. 6. – С. 27-36.
126. Клейменова Е.М. и др. Метод оценки рисков в мультиагентной системе управления проектами НИР и ОКР в реальном времени // Информационно-управляющие системы. – 2013. – №. 2. – С. 29-37.
127. Клейменова Е.М. и др. Мультиагентная технология адаптивного планирования для управления проектами НИР и ОКР в аэрокосмических приложениях // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – №5. – С. 58-63.
128. Клейменова Е.М. и др. Оценка эффективности применения адаптивного планирования проектов // Материалы международной научно-практической конференции «Теория активных систем» (ТАС 2014), Москва, 17-19 ноября, 2014г./ Под ред. В.Н. Буркова. – М.:ИПУ РАН, 2014 – С. 109-110.
129. Прилепский И.В., Майоров И.В., Шепилов Я.Ю. Опыт внедрения мультиагентной системы управления «Smart Factory» в инструментальном цехе № 50 ОАО «Авиаагрегат». – Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVII Международной конференции (22-25 июня 2015, Самара, Россия) / Под ред. Е.А. Федосова, Н.А. Кузнецова, В.А. Виттиха. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2015, – С.88-96.
130. Симонова Е.В., Скобелев П.О., Майоров И.В., Шепилов Я.Ю., Казанская Д.Н. Интеллектуальная система управления производственным цехом машиностроительного предприятия: уч. пособие – Самара: ПГУТИ – ООО «НПК «Разумные решения», 2015 – 183 с.
131. Царев А.В., Майоров И.В., Очков Д.С. Мультиагентная система управления цепочками поставок // Труды XVI Международной конференции

- «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 30 июня-03 июля 2014 г. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 129-142.
132. Лахин О.И., Майоров И.В. Метод адаптивного планирования грузопотока РС МКС на основе мультиагентной технологии // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – №12. – С. 847–852.
133. Амелина Н.О. и др. Исследование моделей организации грузовых перевозок с применением мультиагентной системы для адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени // Проблемы управления. – 2011. – №. 6. – С. 31-37.
134. Tsarev A., Skobelev P., Mayorov I. Self-regulation of Agents Using Individual Profit Expectations in Multi-agent Scheduling for Supply Management // Proceeding of 28th International Conference on Computer Applications in Industry and Engineering (CAINE – 2015). – CAINE, 2015 – P. 197-202.
135. Shoham Y., Leyton-Brown K. Multiagent systems: Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations. – Cambridge University Press, 2008. – 504 p.
136. Vardakas J.S., Zorba N., Verikoukis C.V. A survey on demand response programs in smart grids: Pricing methods and optimization algorithms // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – V. 17. – №. 1. – P. 152-178.
137. Saad W. et al. Game-theoretic methods for the smart grid: An overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications // IEEE Signal Processing Magazine. – 2012. – V. 29. – №. 5. – P. 86-105.
138. Nagarajan M., Sošić G. Game-theoretic analysis of cooperation among supply chain agents: Review and extensions // European Journal of Operational Research. – 2008. – V. 187. – №. 3. – P. 719-745.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ
РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013617616

**Мультиагентная система моделирования производственных
процессов**

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

Авторы: *Кожевников Сергей Сергеевич (RU), Кольбова Элина Владимировна
(RU), Майоров Игорь Владимирович (RU), Новиков Валерий Владимирович
(RU), Павлова Дарья Викторовна (RU), Симонова Елена Витальевна (RU),
Скобелев Петр Олегович (RU), Терновский Алексей Анатольевич (RU),
Царев Александр Вячеславович (RU), Шепилов Ярослав Юрьевич (RU)*

Заявка № **2013615380**

Дата поступления **28 июня 2013 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **20 августа 2013 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ МАЙОРОВА И.В. В РКК
«ЭНЕРГИЯ»**

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
конструктора ПАО «РКК «Энергия»,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор


В.А. Соловьёв

«20»  2016 г.

Акт о внедрении

результатов диссертационной работы Майорова Игоря Владимировича
«Мультиагентные модели и технологии ситуационного управления ресурсами
предприятий в условиях неопределенности»

Комиссия в составе:

председатель Бидеев А.Г. – начальник отделения ПАО «РКК «Энергия»;

члены комиссии:

Григорьев К.Ю. – начальник отдела ПАО «РКК «Энергия»;

Сычева М.В. – начальник сектора ПАО «РКК «Энергия»

составили настоящий акт о том, что при разработке «Интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов российского сегмента международной космической станции» (МАС «Программа полета и грузопоток»), которая успешно прошла апробацию и была введена в штатную эксплуатацию в ПАО «РКК «Энергия», использованы следующие результаты диссертационной работы Майорова И.В. на тему «Мультиагентные модели и технологии ситуационного управления ресурсами предприятий в условиях неопределенности»:

1) метод ситуационного управления ресурсами для разработки системы планирования грузопотока Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС);

2) модель виртуального рынка агентов в применении к агентам полетов, грузов, оборудования, ресурсов для оптимизации показателей планирования при построении программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС;

3) мультиагентная платформа для построения интеллектуальных систем взаимодействующих агентов.

Использование мультиагентной платформы позволило разработать адаптивные механизмы планирования в системе «Программа полета и грузопоток» и оперативно согласовывать решения специалистов различных подразделений ОАО «РКК «Энергия», включая планирование работы 8 основных специалистов-проектантов, а также более 120 кураторов заявок.

Внедрение платформы позволило добиться следующих результатов:

- снижение трудоемкости доработок по ходу развития интерактивной мультиагентной системы построения плана грузопотока – в 2-3 раза;
- увеличение качества и эффективности принимаемых решений – в 1.5-2 раза.

Перспективы развития системы связаны с разработкой гомеостатических принципов построения стратегических и оперативных планов для ПАО «РКК «Энергия» в части грузопотока РС МКС.

Председатель комиссии:



Бидеев А.Г.

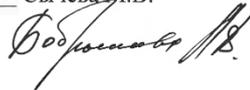
Члены комиссии:



Григорьев К.Ю.



Сычева М.В.



**ПРИЛОЖЕНИЕ В. РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЕ ПИСЬМО ООО
«ТЕХНО ТРАНС» О ВНЕДРЕНИИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ
СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ГРУЗОПЕРЕВОЗКАМИ**

ООО "Техно Транс"

423580, РФ, РТ, г. Нижнекамск, промзона ОАО
"Нижнекамскшина"

ИНН: 1651059020, КПП: 165101001
Тел/факс: 88555497795

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЕ ПИСЬМО

Данным письмом подтверждаем успешное внедрение и результаты повышения эффективности управления мультиагентной системы оперативного управления грузоперевозками.

В процессе работ с ноября 2015 по март 2016 было проведено ряд работ в главном офисе и производственных подразделениях ООО «Таграс-Транссервис»:

- анализ существующих и внедряемых в ближайшее время процедур (регламентов) планирования работ;
- изучение должностных обязанностей, ролей и прав сотрудников, логики принятия решений при управлении заявками, критериев планирования, показателей эффективности выполнения заявок, а также методов их оценки;
- выявление перечня событий, на которые требуется реакция системы, и протоколов (регламентов) их обработки;
- описание процессов планирования на оперативном уровне, взаимодействия согласования планов, требований по автоматизации этих процессов;
- автоматизация гибкого оперативного планирования до уровня конкретных исполнителей;
- интеграция системы с внешними информационными системами и базами данных;
- обучение и сертификация пользователей;
- сопровождение системы в период опытной эксплуатации.

В результате зафиксировано:

- рост производительности диспетчера в 2 раза;
- увеличение объема заказов на 3%;
- уменьшение холостого хода на 5%;
- уменьшение простоев на 4%;
- уменьшение суточных расходов на 4%;
- повышение грузооборота на 5%.

Руководитель логистического центра ООО «Техно Транс»

Плетнев А.П.



**ПРИЛОЖЕНИЕ Г. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ МАЙОРОВА И.В. ООО «НПК
«РАЗУМНЫЕ РЕШЕНИЯ»**

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «НПК «Разумные решения»




С.И. Томей
«10» *ноября* 2016 г.

Акт о внедрении

результатов диссертационной работы Майорова Игоря Владимировича
«Мультиагентные модели и технологии ситуационного управления ресурсами
предприятий в условиях неопределенности»

Комиссия в составе:

Председатель

Максимов В.С. – директор центра разработок ООО «НПК «Разумные решения»;

члены комиссии:

Кожевников С.С. – директор центра аналитики
и развития ООО «НПК «Разумные решения»;

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

составили настоящий акт о том, что при разработке в ООО «НПК «Разумные решения» систем Smart Factory, Smart Projects, Smart Trucks, Smart Supply Chain были использованы следующие результаты диссертационной работы Майорова И.В. «Мультиагентные модели и технологии ситуационного управления ресурсами предприятий в условиях неопределенности»:

- 1) метод ситуационного управления ресурсами для разработки систем планирования ресурсов;
- 2) модель виртуального рынка агентов в применении к агентам заказов, технологических процессов, ресурсов, персонала, грузов, транспортных средств;
- 3) компоненты мультиагентной платформы для построения интеллектуальных систем взаимодействующих агентов.

Использование мультиагентной платформы позволило разработать адаптивные механизмы планирования в системах реального времени Smart Factory, Smart Projects, Smart Trucks, Smart Supply Chain по управлению ресурсами.

Внедрение платформы позволило добиться следующих результатов:

- снижение затрат времени проектирования систем– в 2-3 раза с 12 месяцев до 3-6 месяцев;

- увеличение доли повторно применяемых программных компонент и решений на 30-40%;

- уменьшения рисков незавершения работ;

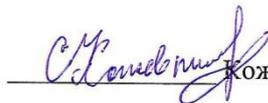
- уменьшении стоимости разработок на 20-40%.

Перспективы развития платформы связаны с дальнейшей разработкой принципов самоорганизации агентов, использованием баз знаний и применением в предметных областях управления транспортом и построения систем планирования производства в авиационной промышленности.

Председатель комиссии:

 Максимов В.С.

Члены комиссии:

 Кожевников С.С.

 Симонова Е.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ «SMART FACTORY» НА ОАО «КУЗНЕЦОВ»



ОАО «Кузнецов»
Заводское шоссе 29, г. Самара, 443009
Тел: 8 (846) 992-60-10, 955-16-12
факс: 8 (846) 992-64-65
e-mail: motor@kuznetsov-motors.ru
09.02.2015 № 17/15-37

Результаты внедрения распределенной интеллектуальной системы согласованного управления производственными цехами ОАО «Кузнецов» на основе мультиагентных технологий

Настоящим письмом подтверждаю, что Обществом с ограниченной ответственностью «Научно-производственная компания «Разумные решения» (НПК «Разумные решения») разработана и внедрена в промышленную штатную эксплуатацию распределенная интеллектуальная система «Smart Factory» для согласованного управления производственными цехами ОАО «Кузнецов» на основе мультиагентных технологий.

Основания работ по проекту

Работы проводились на основе Государственного контракта Министерства Образования и Науки РФ «2012-2.4-07-524-0039-001» ГК № 07.524.12.4022 от «11» июля 2012 г. в период 2012 – 2014 гг.

Назначение системы

Разработанная мультиагентная система (Smart Factory) предназначена для согласованного распределения, планирования, оптимизации, контроля и прогнозирования производства изделий в цехах в реальном времени и интегрирована с имеющейся корпоративной информационной системой АСУ «Кузнецов».

Результаты проекта

Основная цель проекта – повышение эффективности работы цехов за счет введения механизмов адаптивного планирования по событиям.

В настоящее время автоматизированные рабочие места системы установлены в двух цехах предприятия (литейно-заготовительный, механосборочный).

Система используется ежедневно, причем наиболее успешным образом – в механосборочном цехе, первым освоившем систему.

В числе основных пользователей системы – начальник производства, начальники цехов и их заместители, начальники участков, мастера, распределители работ, основные рабочие, контролеры цехов.

Результат проекта – достижение планируемого повышения на 15-25% эффективности работы цеха в течение ближайших 6-9 месяцев.

Процесс внедрения

Для начала внедрения был выбран самый подготовленный цех, с точки зрения наличия данных в электронном виде – механосборочный цех, на базе которого была отработана общая процедура оперативного планирования механических и

сборочных групп.

В процессе внедрения внесено в систему или выверено и исправлено более 2500 технологических процессов.

Закуплено, установлено и подключено к общезаводской компьютерной сети более 40 компьютеров. В ряде помещений заменены электрические сети.

Следующим шагом было принято решение в подключении заготовительного литейного цеха, который поставляет в механосборочный цех заготовки и оказывает ему услуги по выполнению некоторых операций.

В литейно-заготовительном цеху система в настоящий момент работает в режиме опытной эксплуатации.

В результате комплексирования систем организована работа связки цехов: заготовительного и механосборочного. В этом режиме события каждого цеха могут автоматически вызывать согласованное перепланирование другого.

После подключения заготовительного цеха мастера из механообрабатывающих групп механосборочного цеха могут видеть плановые сроки поступления ожидаемых заготовок и загрузку рабочих с их учетом поступления.

В настоящее время в механосборочном цехе на планировании постоянно находится не менее 4000 деталей (более 250 000 операций) и 89 основных рабочих, более 100 единиц оборудования. Несмотря на такой большой объем данных, система позволяет работать в режиме реального времени.

За год работы системы в планировании участвовало более 25000 деталей. В сборочном цехе предприятия собраны требования и совершены необходимые доработки системы для соответствия требованиям. На текущий момент подготавливаются необходимые данные для внедрения системы в сборочные цеха.

Доработки по завершению проекта

Помимо разработки логики работы и функциональных возможностей системы для нужд предприятия по сборке таких сложных изделий, как авиационные двигатели, по результатам опытной эксплуатации системы потребовалось выполнение следующих важных специфических для нашего предприятия работ:

1. Обеспечен импорт данных всех справочников и перечня заказов из АСУ в Smart Factory выбранных цехов, а также экспорт ожидаемых сроков завершения работ по заказам.
2. Реализована адаптивная реакция Smart Factory по изменению планов в режиме реального времени на основные виды событий, возникающие в АСУ «Кузнецов» и непосредственно на производстве.
3. Обработка и проверка данных, поступающих из АСУ «Кузнецов», разработка механизмов и протоколов передачи данных.
4. Данные о выполненных операциях рабочими из Smart Factory передаются для формирования акт-наряда в АСУ «Кузнецов» для расчета заработной платы, что позволяет замкнуть цепь «планирование – исполнение - учет».
5. Интеграция позволила системам завода согласованно функционировать в рамках единого информационного пространства предприятия: данные по работе производственно-диспетчерских бюро, технологических бюро, бюро труда и заработной платы из системы АСУ «Кузнецов» оперативно передаются и используются в системе Smart Factory.

Результаты внедрения

В ходе внедрения системы были получены следующие основные результаты:

1. Повысилась прозрачность и согласованность работы цехов, позволив наладить сквозной контроль планов работы предприятия.
2. В системе поддерживается полный жизненный цикл деталей: от включения в план заготовительного цеха - к планированию сквозного технологического процесса, отметкам факта выполнения операций и сводного анализа плановых и фактических сроков изготовления деталей.
3. Производственный график изготовления деталей цехов в режиме реального времени перестраивается и согласовывается оперативно и гибко в отношении ресурсов, причем с учетом индивидуальных особенностей каждого цеха, участка, рабочего.
4. Принимаемые системой решения обоснованы, согласованы и точны, уменьшают влияние субъективного человеческого фактора.
5. Автоматизированы все основные операции по планированию производства, что снижает трудоемкость управления. Например, сменно-суточные задания для рабочих формируются автоматически с учетом доведенного плана производства, график производства поддерживается в актуальном и постоянно согласованном со всеми цехами состоянии.
6. Планирование изготовления деталей в механосборочном цехе привязано к началу сборочных операций в сборочном цехе, что позволяет снизить цикл изготовления, объемы незавершенного производства и исключить срывы сроков поставки изделий заказчику.
7. Важные субъективные знания мастеров о станках, технологиях и рабочих становятся объективными и используются для повышения качества планирования благодаря накоплению в системе информации о компетенциях работников, возможностях оборудования и др.
8. Создана платформа для интенсивного развития производственных ресурсов предприятия.

Главным результатом проекта стало достижение высокой управляемости в деятельности цехов, обеспечивающей согласованное выполнение заказов различного приоритета. Это позволяет с опережением планировать сроки завершения работ и выявлять «узкие места» производства, чтобы своевременно, гибко и оперативно перераспределять ресурсы и организовывать работу цехов.

Такой подход приводит к значительному повышению эффективности управления предприятием.

На основе созданной и внедренной системы выработаны предложения по развитию управленческой системы предприятия, включая ввод новых показателей результативности подразделений и специалистов в целях мотивации сотрудников по результату.

Перспективы развития

Разработанная система также показала важные преимущества сетецентрического подхода:

- легкость подключения новых цехов к интегрированной системе планирования;
- согласованность планов между цехами;

- обеспечение заданной производительности (распределенные вычисления);
- гибкость перепланирования по событиям в режиме реального времени;
- надежность и живучесть системы за счет распределения данных.

Внедрение мультиагентной системы оперативного управления цехами позволило сформулировать постановку задачи создания мультиагентной системы стратегического планирования деятельности предприятия, которая бы позволяла планировать загрузку и координировать работу цехов на значительный горизонт времени (2-3 года и более) – причем во взаимодействии с разработанными системами оперативного планирования цехов.

Данная разработка в настоящее время выполняется в рамках Программы развития инновационного территориального аэрокосмического кластера Самарской области на 2013-2015 годы.

В ОАО «Кузнецов» запланировано внедрение системы Smart Factory во все цеха предприятия.

Распространение результатов проекта

Результаты проекта опубликованы в научных журналах и докладывались в ряде отечественных и международных научных конференций по управлению предприятиями и новым информационным технологиям, что подтверждает научную новизну разработки.

Кроме того, результаты работы были одобрены на специальном семинаре ОАО «ОПК «Оборонпром», проведенном в 2013 году на территории ОАО «Кузнецов», посвященном автоматизированным системам оперативного планирования.

Заместитель исполнительного директора
по информационным технологиям



А.В. Шишов

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ МАЙОРОВА И.В. В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ САМАРСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по учебной работе
Самарского университета,
кандидат физико-математических наук,
доцент



А.В. Гаврилов

«01» декабря 2017 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы аспиранта СамГТУ
Майорова Игоря Владимировича «Мультиагентные модели и технологии
ситуационного управления ресурсами предприятий в условиях неопределённости»,
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук,
в учебном процессе Самарского университета

Результаты кандидатской диссертации аспиранта СамГТУ Майорова И.В. (руководитель д.т.н. Скобелев П.О.) на тему «Мультиагентные модели и технологии ситуационного управления ресурсами предприятий в условиях неопределённости» внедрены в учебный процесс Самарского университета на основании **решения заседания кафедры** конструкции и проектирования летательных аппаратов от **14.11.2016 г. протокол №4** и используются в курсе «**Онтология производственной сферы**» для подготовки бакалавров по направлению 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», специализация «Автоматизированное управление жизненным циклом продукции».

В частности, в лекционном курсе рассматриваются принципы самоорганизации в сложных системах управления, принятием решений, применение концепции мультиагентного планирования, модели взаимодействия агентов на виртуальном рынке системы при распределении ресурсов.

Заведующий кафедрой конструкции и проектирования
летательных аппаратов, д.т.н., профессор

В.А. Комаров

Начальник управления образовательных программ,
к.т.н., доцент

А.В. Дорошин

Отдел сопровождения научных исследований,
к.т.н., доцент

А.М. Гареев

И.М. Борова

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ МАЙОРОВА И.В. В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ

«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор ФГБОУ ВО «Нововолжский
государственный университет
телекоммуникаций и информатики»,
доктор технических наук, профессор
Д.В. Мишин
«01» октября 2017 г.

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук аспиранта СамГТУ Майорова Игоря Владимировича на тему «Мультиагентные модели и технологии ситуационного управления ресурсами предприятий в условиях неопределенности» в учебном процессе Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики

Настоящим актом подтверждаем, что результаты, полученные в диссертационной работе И.В. Майорова на тему «Мультиагентные модели и технологии ситуационного управления ресурсами предприятий в условиях неопределенности», а именно модели виртуального рынка систем взаимодействующих агентов с учетом различных видов микроэкономики, модификации сетей потребностей и возможностей, а также программное обеспечение мультиагентной платформы для моделирования планирования внедрены в учебный процесс на кафедре инженерии знаний и используются в курсе «Методология управления» при подготовке бакалавров в рамках образовательной программы 09.03.01 – Информатика и вычислительная техника (профиль программы – Программное обеспечение средств вычислительной техники и автоматизированных систем).

И.о. декана факультета
информационных систем и технологий
к.т.н., доцент

Заведующий кафедрой инженерии знаний
д.т.н., профессор

Секретарь кафедры
к.э.н., доцент

М.А. Богомолова

В.А. Виттих

Т.В. Моисеева