

WIT Press

Ржевский Г.А., Скобелев П.О.

## Как управлять сложными системами?

Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями

Перевод с английского

2015

Перевод с английского языка

George Rzevski, Petr Skobelev

Managing Complexity

Published by

WIT Press

Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton, SO40 7AA, UK

Tel: 44 (0) 238 029 3223; Fax: 44 (0) 238 029 2853

E-Mail: [witpress@witpress.com](mailto:witpress@witpress.com)

<http://www.witpress.com>

## Оглавление

Предисловие к русской версии .....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
Благодарности.....	10
<i>ЧАСТЬ 1 – ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ.....</i>	<i>12</i>
<i>ГЛАВА 1: Что такое сложные системы? .....</i>	<i>12</i>
1.1. Век растущей сложности .....	12
1.2. Определение сложной системы.....	13
1.3. Виды сложных систем .....	15
1.4. Сложность и неопределенность .....	18
1.5. Семь критериев сложности.....	19
1.6. Отрицательные и положительные аспекты сложности.....	22
1.7. Эволюция сложных систем .....	24
1.8. Совместное развитие технологии, экономики и общества .....	25
1.9. Сложность и информационное общество .....	26
1.10. Сложность и философия.....	35
Выводы: .....	37
Список литературы.....	37
<i>ГЛАВА 2: Методология управления сложными адаптивными системами.....</i>	<i>39</i>
2.1. Принцип адаптивности .....	39
2.2. Параметры управления сложностью.....	39
2.3. Моделирование сложных адаптивных систем .....	46
2.4. Что нужно делать, чтобы быть адаптивным? .....	59
2.5. Проектирование адаптивных решений.....	62
Выводы: .....	65
Список литературы.....	65
<i>ГЛАВА 3: Мультиагентные технологии для адаптивного управления.....</i>	<i>67</i>
3.1. Начальные сведения .....	67
3.2. Базовые определения .....	68
3.3. Холонический подход к созданию сложных систем.....	70
3.4. Сети потребностей и возможностей.....	72
3.5. Пример мира транспортной логистики .....	74
3.6. Модели микроэкономики агентов .....	76
3.7. Как достигать качества решений с ростом сложности и динамики?.....	78
3.8. Метод компенсаций для адаптивного планирования ресурсов в ПВ-сетях .....	81
3.9. База знаний для адаптивного планирования.....	87
3.10. Виртуальный мир.....	89
3.11. Машина принятия решений.....	91
3.12. Переговоры агентов .....	93
3.13. Архитектура MAC по управлению ресурсами в реальном времени .....	95

3.14. Мультиагентная платформа .....	98
3.15. Оценка МАС как сложных систем.....	100
Выводы: .....	101
Список литературы .....	102
<i>ГЛАВА 4: Эмерджентный интеллект.....</i>	<i>104</i>
4.1. Интуитивное понимание .....	104
4.2. Эмерджентный интеллект в природе и бизнесе.....	107
4.7. Развитие моделей эмерджентного интеллекта .....	118
4.8. Работа с эмерджентным интеллектом.....	130
4.9. Оценка уровня адаптивности системы .....	133
Выводы: .....	135
Список литературы .....	135
ЧАСТЬ 2 - КОММЕРЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ .....	138
<i>ГЛАВА 5: Адаптивное планирование морских танкеров.....</i>	<i>138</i>
Проблема .....	138
Решение .....	139
Результаты внедрения .....	141
Список литературы .....	141
<i>ГЛАВА 6: Адаптивное планирование такси.....</i>	<i>142</i>
Проблема .....	142
Решение .....	143
Результаты .....	147
Список литературы .....	148
<i>ГЛАВА 7: Адаптивное планирование сдачи автомобилей в аренду.....</i>	<i>149</i>
Проблема .....	149
Решение .....	150
Результаты .....	157
Список литературы .....	158
<i>ГЛАВА 8: Адаптивное планирование грузоперевозок.....</i>	<i>159</i>
Проблема .....	159
Решение .....	161
Результаты .....	167
Список литературы .....	168
<i>ГЛАВА 9: Адаптивный анализ «Больших данных».....</i>	<i>171</i>
Проблема .....	171
Решение .....	171
Результаты .....	179
Список литературы .....	182
<i>Глава 10: Адаптивное понимание семантики текста на естественном языке.....</i>	<i>184</i>
Проблема .....	184

Решение.....	185
Результаты .....	190
Список литературы.....	192
<i>ГЛАВА 11: Адаптивное проектирование сложных изделий .....</i>	<i>193</i>
Проблема.....	193
Решение.....	193
Результаты .....	195
Список литературы.....	196
<i>Глава 12: Адаптивное планирование сетей поставок .....</i>	<i>197</i>
Проблема.....	197
Решение.....	199
Результаты .....	206
Список литературы.....	209
<i>Глава 13: Адаптивное построение программы полета, планирование грузопотока и расчета ресурсов Российского сегмента Международной Космической Станции.....</i>	<i>210</i>
Проблема.....	210
Решение.....	211
Результаты .....	217
Список литературы.....	218
<i>Глава 14: Адаптивное планирование группировки спутников .....</i>	<i>220</i>
Проблема.....	220
Решение.....	221
Результаты .....	225
Список литературы.....	226
<i>ГЛАВА 15: Адаптивное планирование поездов.....</i>	<i>228</i>
Проблема.....	228
Решение.....	229
Результаты .....	235
Список литературы.....	236
<i>ГЛАВА 16: Адаптивное планирование цехов машиностроительного производства .....</i>	<i>238</i>
Проблема.....	238
Решение.....	239
Результаты .....	250
Список литературы.....	251
<i>ГЛАВА 17: Адаптивное управление мобильными бригадами .....</i>	<i>254</i>
Проблема.....	254
Решение.....	255
Результаты .....	262
Список литературы.....	263
<i>ГЛАВА 18: Адаптивное управление проектами НИОКР .....</i>	<i>264</i>
Проблема.....	264

Решение .....	265
Результаты .....	271
Список литературы .....	271
ЧАСТЬ 3 – ДОРОГА В БУДУЩЕЕ.....	273
<i>ГЛАВА 19: Концепция и идеи</i> .....	273
Переход от персональных - к бизнес-приложениям .....	273
Интернет Вещей.....	274
Цифровое Предприятие .....	274
Умный Город .....	276
Умная Логистика .....	278
<i>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</i> .....	280
<i>Материалы в помощь</i> .....	281
<i>Примеры мультиагентных систем</i> .....	282
<i>Учебные пособия по теме</i> .....	284
<i>Контрольные вопросы для самопроверки</i> .....	285
<i>Краткая справка об авторах</i> .....	287

# Предисловие к русской версии

Уважаемые читатели!

Мы рады представить вам русскую версию нашей книги, которая выходит в России примерно через год после опубликования в Англии.

Этот год мы были заняты новыми перспективными проектами по управлению сложными системами на основе мультиагентных технологий, которых в последние годы становится все больше и в России.

Уже в самое ближайшее время вокруг нас будет появляться все больше сложных систем с встроенным интеллектом, демонстрирующих автономное поведение (и первый Гугл-мобиль - тому наглядное подтверждение), но еще больше изменений ожидает нас с появлением такого рода «систем систем», способных сначала к относительно простому взаимодействию (автомобили в США скоро смогут координировать действия при проезде перекрестка), а далее – и к более сложным процессам самоорганизации и эволюции, яркие примеры которых мы наблюдаем пока лишь в живой природе.

В предлагаемой книге рассматриваются как общие принципы и подходы, модели, методы и средства построения таких систем, так и конкретные решения сложных проблем в области управления ресурсами в реальном времени.

Однако, в дополнение к английской версии, в настоящем издании существенно расширен материал как теоретических разделов, так и разделов по практическим применениям разработанных систем и технологий, а также даны учебные материалы. Для упрощения восприятия теоретические главы дополнены выводами, а главы с практическими результатами – списком публикаций по теме, которые помогут расширить и углубить понимание для пытливых читателей.

Мы надеемся, что это позволит использовать книгу в России как учебное пособие для студентов и аспирантов факультетов информационных технологий, а также широкого круга других специальностей.

От авторов

Лондон-Москва-Самара

10-15 мая 2015 г.

# ВВЕДЕНИЕ

Эта книга написана для тех, кто стремится достигнуть успеха в условиях быстро растущей сложности мирового рынка, все больше использующего Интернет и другие информационные технологии.

Вдохновителем этой работы стал лауреат Нобелевской премии проф. Илья Пригожин, которого обычно называют основателем науки о сложных системах. Ключевые идеи и принципы этой науки в этой книге впервые переносятся в мир самых современных интеллектуальных информационных технологий.

Первые две главы книги посвящены исследованию природы растущей сложности окружающего мира и предлагают новую методологию адаптивного управления сложными системами, применение которой позволяет на практике решать сложные задачи в самых различных сферах применения: от планирования и оптимизации ресурсов – до понимания текстов и извлечения знаний из данных.

Главная идея книги при этом состоит в том, что адаптивное управление сложными системами на практике требует создания распределенных систем, части (элементы) которых обладают высокой степенью автономности, и потому способны в любой момент времени быстро реагировать на непредвиденные события, самостоятельно принимать решения и согласованно взаимодействовать с себе подобными - чтобы достигать того уровня качества и эффективности функционирования, которые демонстрируют нам устойчиво развивающиеся окружающие нас разнообразные биологические и социальные системы.

В этой связи третья глава целиком посвящена мультиагентным технологиям, позволяющим создавать интеллектуальные системы нового поколения, базирующиеся на принципах самоорганизации и эволюции, для решения сложных задач, где существующие классические математические модели имеют или очень ограниченное применение или не применимы вовсе.

Разработанные на основе мультиагентных технологий новые модели, методы и алгоритмы решения сложных задач находят свое обобщение в четвертой главе, описывающей конкретные механизмы реализации разработанного подхода в прикладных интеллектуальных системах «эмерджентного (вспыхивающего) интеллекта», отвечающего за высокую адаптивность создаваемых приложений.

Этот новый подход авторы постарались провести красной нитью через все представленные в книге многочисленные примеры решения сложных проблем различной природы, включая планирование в реальном времени 2,000 Лондонских такси и 10% мирового числа морских танкеров, перевозящих нефть по всему земному шару; доставку грузов на Международную космическую станцию, семантическую обработку текстов научных статей по молекулярной биологии; извлечение знаний из больших объемов данных о продажах товаров в магазинах беспопытной торговли в аэропортах и управление цепочками поставок игрушек в магазины или управление совместным проектированием крыла самолёта – наиболее интересные из которых подробно рассмотрены в отдельных главах.

Удивительным образом предлагаемые примеры решения столь различных по своей природе сложных задач неожиданно оказываются объединены ключевыми понятиями, важными принципами и общими подходами только еще формирующейся новой науки о сложных адаптивных системах, управление которыми целиком базируется на современных информационных технологиях, в первую очередь, онтологиях и мультиагентных технологиях.

Наиболее подробно рассматриваются особенности применения указанных выше технологий при создании интеллектуальных систем для решения сложных задач при управлении ресурсами в реальном времени.

В историческом плане книга охватывает проекты, выполненные авторами в ходе почти 25-ти лет совместных научных исследований и разработок преимущественно в Великобритании и



России – ряд этих проектов оказались в числе первых в мире, которые доказали важные преимущества мультиагентных технологий и позволили вывести это новое направление из лабораторий в промышленные применения.

В ходе этой работы авторам пришлось заниматься не только решением сложных фундаментальных и прикладных научных задач, но и брать на себя предпринимательские инициативы и риски в этой новой сфере, обеспечивая практическую реализацию, промышленное внедрение и сопровождение создаваемых мультиагентных систем управления ресурсами.

Приобретенные новые знания, ставшие предметом данной книги, принесли значительную пользу для заказчиков, пройдя суровую проверку реальной жизнью, а созданная группа компаний теперь разрабатывает проекты не только в Великобритании и России, но и в Германии и Финляндии, США и других странах. Следует отметить, что этот путь был весьма тернистым, и ключевые принципы рассматриваемой новой науки о сложности были во многом выстраданы авторами на собственном опыте, формируя новое мировоззрение построения действительно сложных систем для управления бизнесом.

При выборе проектов для книги авторы отдавали приоритет наиболее сложным задачам, которые были слишком трудны для решения с использованием традиционных математических подходов и требовалось строить системы, способные без остановки и перезапуска, оперативно, гибко и эффективно реагировать на события изменений в реальном времени. Насколько авторам известно, конкурирующих аналогичных решений для представленных в книге сложных проблем пока еще не существует, что подтверждается патентами на изобретения, полученными в Англии и США.

Изложение сопровождается ссылками на дополнительные публикации, которые помогут заинтересованным читателям разобраться в теоретических и прикладных аспектах предлагаемой концепции и подходов, моделей, методов и алгоритмов.

В заключении книги обсуждаются перспективы развития данного направления, и показывается возможный облик будущих систем, появление которых ожидается уже в самое ближайшее время.

Авторы очень надеются, что книга будет полезна самому широкому кругу читателей, включая предпринимателей, руководителей предприятий, инженеров и специалистов, ученых, аспирантов и студентов в самых различных сферах деятельности, на практике сталкивающимся с вызовами современной глобальной экономики и информационного общества и быстро растущей сложностью решаемых задач, а также всем тем, кто интересуется перспективами развития новых информационных технологий.

Ведь один из главных секретов успеха в новом веке состоит в том, чтобы понимать природу растущей сложности окружающего мира и уметь гибко адаптировать свое поведение «на лету» по событиям в реальном времени.

И именно в этом нам призваны помогать мультиагентные системы, о которых пойдет речь в предлагаемой книге.

Приятного вам чтения и успехов в решении сложных задач!

# Благодарности

Мы выражаем глубокую признательность нашим семьям, коллегам и друзьям, которые помогли нам в нашем интересном, но трудном предприятии.

Наши жены Елена и Вера поддерживали нас дома с любовью, заботой и терпением в течение многих лет тяжелой работы, а также вдали от дома, в частых поездках для встреч с заказчиками и партнерами и обсуждения результатов наших исследований на конференциях, лекциях и семинарах.

Профессор, д.т.н. Владимир Андреевич Виттих, основатель и первый директор Института проблем управления сложными системами Российской Академии Наук, а еще известный математик и джазовый композитор, познакомился с Георгием на научной конференции в Кембридже (Англия) в 1989 году и пригласил его посетить Самару с серией лекций по мультиагентным технологиям. Это была первая поездка Георгия в Россию, сопряженная с возможностью отыскать свои древние фамильные корни, восходящие к князьям Ржевским - основателям города Ржев, Рюриковичам и князю Владимиру, крестившему Русь. Здесь и произошло знакомство авторов настоящей книги, положившее начало долгому и результативному сотрудничеству.

А Владимир Андреевич с первых дней стал и остается нашим «крестным отцом» в общечеловеческих, научных и деловых отношениях - и с тех пор мы непрерывно работаем все вместе, поддерживая крепкую дружбу. Во многом благодаря Владимиру Андреевичу и много лет проводимой им международной конференции в Самаре по проблемам управления и написана наша книга, в связи с чем мы выражаем Владимиру Андреевичу свою глубочайшую благодарность и признательность за искреннюю поддержку и помощь во всех наших начинаниях.

Глубокую благодарность выражаем Елене Симоновой, которая прошла с нами весь путь создания новой научной школы по мультиагентным технологиям в Самаре, нашла и воспитала много талантливой молодежи, активно участвовала в создании наших систем, а также вдохновляла и поддерживала нас в написании книги.

Большую благодарность мы выражаем Игорю Майорову, который с самого начала наших работ видел важную связь теории сложных адаптивных систем с мультиагентными системами, и внес большой вклад в разработку моделей, методов и алгоритмов для создания самоорганизующихся систем, адаптирующихся к событиям в реальном времени.

Искреннюю благодарность мы выражаем Бьорну Мэдсену из широко известной во всем мире корпорации Lego, который начал активно сотрудничать с нами в создании мультиагентной системы управления цепочками поставок, а потом решил присоединиться к нашей совместной компании в Англии. Особую благодарность мы хотим выразить Бьерну за тщательную вычитку всех версий этой книги.

Нам очень помогла Яна Богданова, которая выполнила все иллюстрации для книги в самый короткий период времени, и Анастасия Жилкина, которая помогала с переводом и организацией материала.

В ходе выполнения наших проектов мы работали с замечательными заказчиками и партнерами, способными видеть перспективы на десятилетия вперед и разделять с нами риск идти первыми, а также с десятками и сотнями умных, энергичных и трудолюбивых ученых, управленцев и специалистов-предметников, постановщиков задач, бизнес-аналитиков, программистов, внедренцев и тестеров из России, Англии, Финляндии, Германии, США и Японии, которые были воодушевлены новыми идеями создания самоорганизующихся мультиагентных систем и их внедрения в реальные приложения.

Наш опыт международных проектов на практике доказывает, что растущая сложность современного мира не только создает новые трудности для всех нас, но и открывает

совершенно новые удивительные возможности для совместного претворения в жизнь самых смелых новых идей и технологий.

Однако ни одна из наших идей, так трудно рождавшихся в спорах и обсуждениях в самых разных городах мира, не могла бы быть успешно реализованной, если бы не команда талантливых разработчиков и программистов, работающих в Самаре.

Мы отдаем дань уважения их увлеченности и тяжелому труду с непрерывно возрастающими требованиями к разработке новых моделей, методов и алгоритмов, постоянными сверхурочными ночными работами, многочисленными поездками по всему миру и очень ответственными сдачами сложнейших проектов.

И очень благодарны всем, кто прошел с нами весь путь или просто поддерживал на разных этапах, участвовал в обсуждении возникавших идей, своевременно выявлял и решал проблемы, работал над проектами и помогал добиваться результатов.

Мы очень надеемся, что наши новые и самые интересные проекты еще впереди!

# ЧАСТЬ 1 – ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

## ГЛАВА 1: Что такое сложные системы?

### 1.1. Век растущей сложности

Частое возникновение непредсказуемых событий, влияющих на наши планы, создаёт *неопределенность*.

До последнего времени мы не уделяли должного внимания происходящим вокруг нас неожиданным событиям: наша существующая образовательная система приучила нас рассчитывать на стабильность мира, по крайней мере, в рамках одного поколения. Полагаясь на учение Ньютона, мы привыкли к определенности. Мы ждем, что рано или поздно будет открыт новый фундаментальный закон природы, который объяснит все и позволит предсказывать будущее. Конечно, всегда очень хорошо было бы строить планы и с уверенностью наблюдать за их воплощением. Неопределенность, и тем более, неожиданные события, напротив, пугают нас. Сталкиваясь с ними, мы задаемся многочисленными вопросами: «Что происходит? Кто за этим стоит? Что мне теперь делать?» - но, к сожалению, готовых ответов на эти вопросы и, тем более, универсальных решений для неожиданно возникающих проблем часто не существует. Многие, встретив серьезную преграду на своем пути, могут отказаться от борьбы, но что будет, если мы все сойдем с дистанции? Неужели сдаться – лучшее решение?

Перечислим примеры только некоторых глобальных проблем, которые мы не можем решить сегодня:

- глобальное потепление, механизм которого мы не понимаем;
- бедность, неравенство и преступность – до сих пор все наши попытки искоренить их терпели неудачу;
- увеличение пропасти между богатыми и бедными вследствие глобализации;
- терроризм, борьба с которым не приносит желаемых результатов;
- проблема военных и политических вмешательств, зачастую приносящих больше вреда, чем пользы.

Все упомянутые выше проблемы являются *сложными*, и это не значит, что они были созданы намеренно или возникли вследствие чьей-то ошибки; они появились в результате миллионов взаимодействий, как мы далее будем говорить, *эмерджентно* – как непредвиденные последствия бесчисленных решений, которые мы сами принимаем каждый день.

Такие проблемы могут быть решены только с применением новой методологии, основанной на науке о сложности. Основы этой науки не так давно были заложены бельгийским ученым проф. И. Пригожиным [1-2], русским по происхождению, получившим Нобелевскую премию по химии в 1978 г. за исследование процессов самоорганизации и явления автокаталитических реакций в растворах органических жидкостей. Эти работы были развиты исследователями из Института Санта-Фе в США, в частности, проф. Кауфманом [3] и проф. Холландом [4-5], продолживших изучение феноменологии самоорганизующихся систем в окружающей нас неживой и живой природе, а также в социально-экономических системах.

Однако, мы упорно продолжаем решать проблемы теми же методами и средствами, как делали это в прошлом, совершенно упуская из вида тот факт, что новые задачи требуют и новых подходов.

Вот некоторые примеры, показывающие, к чему приводит наш консервативный образ мышления:

- мы по-прежнему создаем большие компьютерные системы, которые, как правило, разрабатываются с задержками и превышением бюджета, и многие из них работают совсем не так, как задумывались;
- мы создаем большие организации и объединяем их в еще более громоздкие корпорации и концерны с вертикальным управлением, уповая на мудрость и прозорливость, а также бесконечный ресурс здоровья, сил и времени их руководителей, которым платим огромные зарплаты, несмотря на тот всем очевидный факт, что небольшие организации являются более открытыми, гибкими и эффективными, и, в конечном счете, более прибыльными, ориентированными на заказчиков, и комфортными для своих сотрудников. Действительно ли нам нужны очень крупные национальные предприятия и банки «слишком большие, чтобы разориться», как это постоянно утверждалось в общественном мнении в США в период последнего финансового кризиса?
- мы постоянно увеличиваем масштабы научных и учебных учреждений, хотя известно, что небольшие образовательные школы предоставляют более качественные услуги и в академическом плане являются более успешными.

Возможно, стоит остановиться на мгновение и поразмыслить над прозорливым утверждением Эйнштейна: *«Ты никогда не решишь проблему, если будешь думать так же, как те, кто её создали».*

Важно понимать, что большие системы были экономически эффективны в стабильном и предсказуемом мире, где критическим фактором успеха была *экономия на масштабе*<sup>1</sup>. Недавние изменения, в частности, нарастающая сложность рынков и нашей социальной среды, выявили низкую эффективность крупных систем, чрезмерно громоздких и жестких для адаптации к частым изменениям.

Поймем ли мы когда-нибудь суть фразы Шумахера «Красота в малом» [6]?

Стоит лишь кратко взглянуть на процессы, идущие на современных рынках, и мы сразу увидим, как их сложность постоянно растёт, порождая проблемы, решение которых требует нового образа мышления, а именно, понимания *природы сложных систем*.

Часто цитируемое утверждение выдающегося физика Стивена Хокинга, сделанное им в конце 20-го века, лучше всего иллюстрирует то, как важно уметь управлять сложными системами:

*«Я думаю, следующий век будет веком сложных систем».*

Посмотрим, как наука о сложных системах может помочь в решении сложных проблем.

## 1.2. Определение сложной системы

Казалось бы, мы все интуитивно понимаем, что подразумевается под сложностью.

Одной из важных характеристик сложных систем является их нелинейность, когда при малом входном воздействии система неожиданно реагирует в ответ большими изменениями на выходе, равно как и наоборот, причем возможно, с существенными задержками, и даже колебаниями или другими неожиданными явлениями, часто ставящим в тупик наблюдателя.

Мы страшимся нелинейности не случайно – ведь с эпохи Возрождения и до 2-ой половины XX века в нашей науке царил «линейное мышление», в котором считается, что результат суммарного воздействия на систему обычно равен сумме воздействий. И многие наши законы линейны, например, Ньютона (механика), Ома (электричество), Гука (теория упругости), Мальтуса (рост популяций), Максвелла (электродинамика) и другие. Из математических свойств линейных систем следует однозначный детерминизм: следствие однозначно определяется причиной, существует одно правильное решение ...

<sup>1</sup> Экономией на масштабе называется снижение затрат на единицу продукции при укрупнении производства.

Линейная наука с успехом изучает устойчивые процессы, воспроизводимые в эксперименте, но ведь далеко не все явления природы линейны, устойчивы и воспроизводимы, например, живые системы (от клетки - до человечества), зарождение атмосферных вихрей, образование галактик и пятен планктона в океане, творческая деятельность и другие подобные процессы.

В математике одним из хорошо известных примеров сложных систем является аттрактор Лоренца – один из наиболее известных «странных» аттракторов, открытый при изучении погодных явлений. Выражается 3 формулами для описания модели погоды:

$$\begin{aligned} dx/dt &= -ax + ay; \\ dy/dt &= bx - y - xz; \\ dz/dt &= -cz + xy. \end{aligned}$$

Наиболее часто используются значения  $a=5$ ,  $b=15$ ,  $c=1$ .

Решение уравнения, определяющее поведение такой сложной системы, представлено на рисунке 1.1.

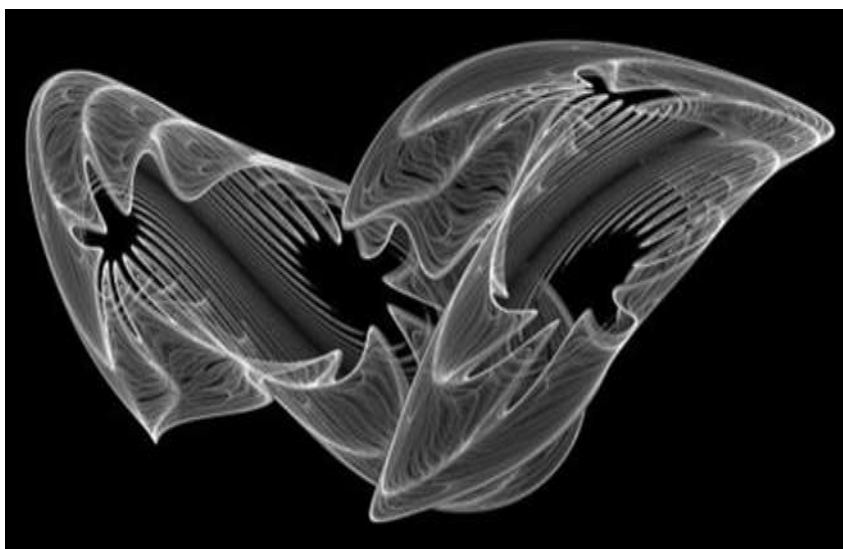


Рисунок 1.1. Пример странного аттрактора Лоренца

Примеры решений других подобных уравнений, полученные с помощью Chaoscope - 3D-рендера «странных» аттракторов, представлены на рисунке 1.2 (<http://www.chaoscope.org/gallery.htm>). Не правда ли, есть своя красота в сложности? Или, может быть, только сложность рождает красоту?

И можно ли написать уравнения, описывающие работу производственного цеха машиностроительного предприятия или цепочки поставок товаров от фабрик через склады в магазины и другие похожие системы?

К сожалению, феномену сложности нет никакого точного определения. Многие ученые, работающие в науке о сложных системах, разочарованы этим фактом, но, с другой стороны, так и должно быть: мы никогда не сформулируем точного определения сложности, потому, что сложность неоднозначна по своей природе.

По той же причине у нас нет точных определений для таких понятий как знание, разум, эмоции или творчество. Но отсутствие точного определения совершенно не препятствует тому, чтобы мы эффективно использовали эти понятия.

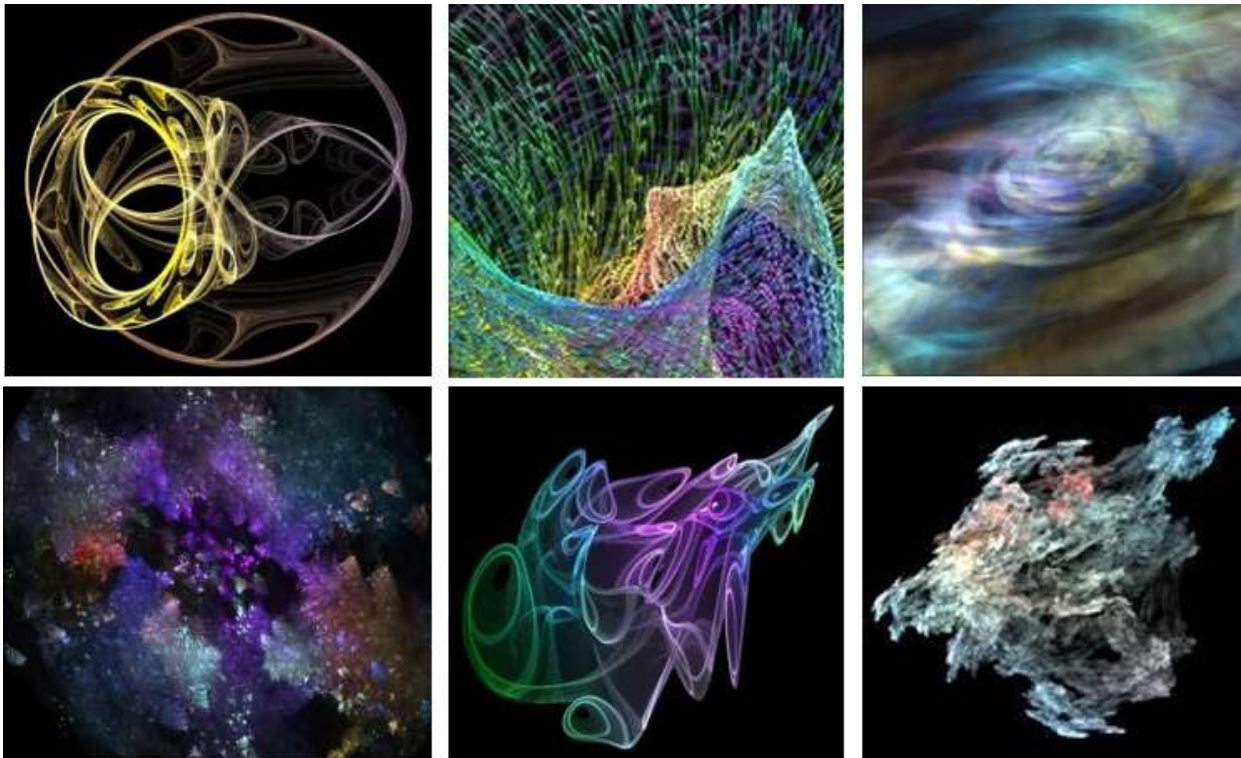


Рисунок 1.2. Есть красота в сложности или только сложность рождает красоту?

Мы предлагаем определить сложность следующим образом:

*Сложность является свойством открытой системы, которая состоит из большого числа разнообразных, частично автономных, активно взаимодействующих элементов, называемых агентами. Сложная система не имеет централизованного управления, а ее поведение определяется взаимодействием агентов, и поэтому, не будучи хаотичным, является неопределенным (недетерминированным), поскольку в каждой ситуации определяется свободой выбора агентов и зависит от принимаемых ими решений.*

Ключевыми характеристиками сложной системы являются:

- открытость, предопределяющая активное взаимодействие со средой;
- разнообразие, частичная автономность и взаимосвязь агентов;
- отсутствие централизованного управления;
- эмерджентность поведения – решение системы возникает спонтанно, в непредвиденный момент времени, как результат цепочки взаимодействий агентов для нахождения согласия (консенсуса) между ними.

В нашем понимании, сложная система – это самоорганизующаяся система, построенная на поиске и поддержании баланса (гармонии) интересов агентов.

Интеллект такой системы проявляет себя цепочками взаимодействий и согласованных решений для достижения консенсуса агентов, которые развиваются подобно автокаталитическим реакциям в растворах органических жидкостей в терминах нелинейной термодинамики И.Пригожина.

Вся феноменология поведения рассматриваемых систем связана с «устойчивыми неравновесиями» или «неустойчивыми равновесиями» в согласии агентов.

Не правда ли, слово «гармония» для технических систем звучит как-то неожиданно?

### 1.3. Виды сложных систем

В английском языке существует два похожих слова, обозначающих сложность, но имеющих совершенно разные понимания или смысловые значения.

Первое слово *Complex* – по смыслу переводится как «сложный в своем поведении», а второе – *Complicated*, переводится как «состоящий из многих частей». Для того, чтобы более точно выделить класс интересующих нас сложных систем и определить его главные отличия, мы предлагаем говорить о классах «сложных адаптивных» и «сложных неадаптивных» системах.

**Сложная неадаптивная система** (complicated system) - состоит из множества частей, каждая из которых, в свою очередь, возможно, обладает множеством своих составных частей, т.е. имеется много уровней вложенности, однако, состав элементов и связи между ними не меняются динамически в результате взаимодействий. Располагая достаточным запасом времени, мы можем разобраться в том, как работает такая система, для чего обычно достаточно разделить ее на вложенные подсистемы, что обычно с успехом и реализуется в системном анализе. Если подсистемы также являются составными, мы можем далее делить каждую из них на подсистемы следующих уровней и продолжать такое деление до тех пор, пока не достигнем уровня, на котором поведение системы не станет полностью однозначным и понятным исследователю.

Поведение такой сложной системы является полностью предсказуемым (детерминированным), даже если для описания модели ее работы требуются сложнейшие системы дифференциальных или алгебраических уравнений. Типичными системами такого рода являются самолет, реактивный двигатель, компьютер, алгоритм, технологическая линия (конвейер) массового производства или иерархически организованная компания, действующая по жестким бизнес-процессам.

Такие системы обычно строятся «сверху-вниз», реализуя некоторый общий замысел и план действий своего создателя.

В своих обсуждениях мы постоянно боремся с внутренним желанием называть сложные неадаптивные системы «простыми», но отдавая дань большого уважения ученым и инженерам, создающим современные двигатели, автомобили и самолеты, мы по традиции продолжаем называть эти системы сложными.

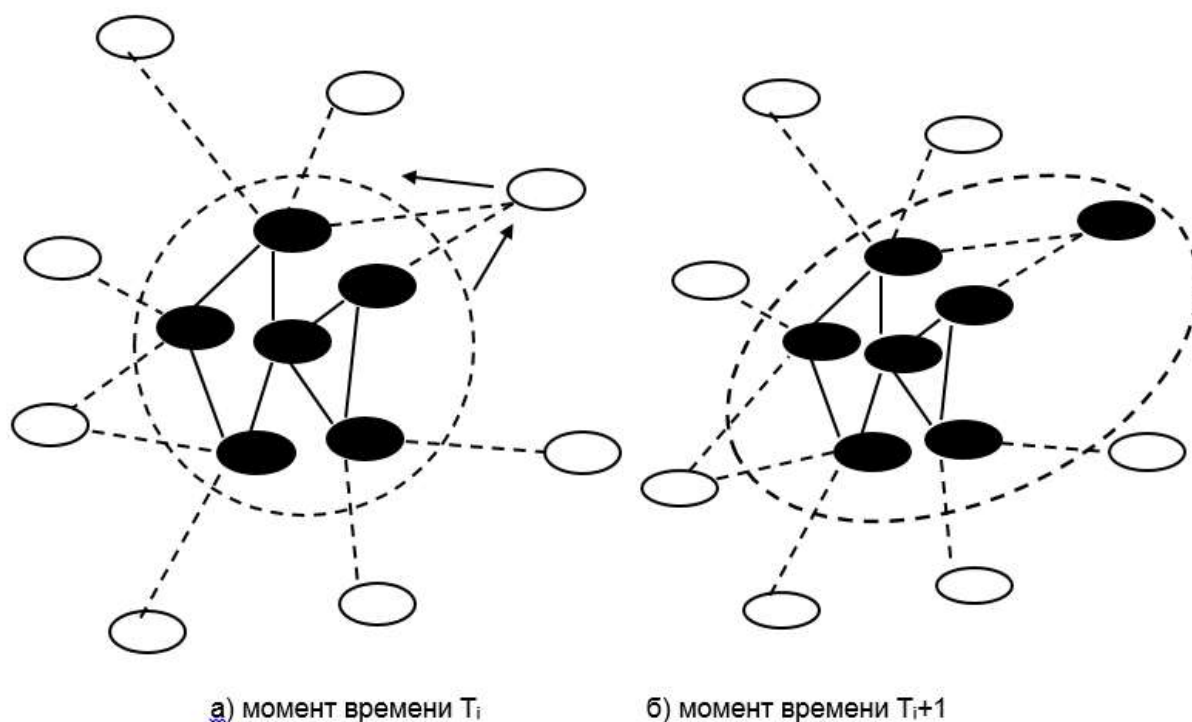
**Сложная адаптивная система** (complex system) - состоит из автономных (самостоятельных) элементов (агентов), вступающих в связи или разрывающих эти связи в результате взаимодействий и собственных решений, предпочтений и ограничений. Иными словами, целостность сложной системы формируется «снизу-вверх» путем самоорганизации образующих ее элементов, что рассматривается как более высокая ступень в организации систем, предопределяя ее открытость, гибкость и эффективность, надежность и живучесть.

Невозможно разделить сложную систему способом, как это делается обычно в системном анализе, когда система разделяется на подсистемы и независимо анализируется поведение ее составных частей - поскольку разрыв связей между элементами сложной системы неминуемо повлечет изменение моделей и методов работы ее элементов, и, как следствие, поведения всей системы в целом.

Поведение сложной адаптивной системы трудно предсказать в связи с недетерминизмом в том смысле, что оно не диктуется одним заданным сверху общим «замыслом», алгоритмом или бизнес-процессом (пусть даже сколько угодно составным и ветвящимся), а определяется взаимодействием ее элементов (агентов), вступающим в связи или разрывающими эти связи по собственной инициативе, с учетом изменений в среде или в отношениях между агентами, но без какого-либо принуждения со стороны.

На рисунке 1.3 представлен пример изменения конфигурации открытой системы за счет присоединения еще одного нового узла в ходе взаимодействий, например, нового заказа или ресурса.





Рисунке 1.3. Изменения состояния системы за счет присоединения еще одного узла в ходе взаимодействий

Примерами сложных адаптивных систем в окружающем нас мире являются экология, климат, мировой рынок, семья, команда, рой пчел, человеческий мозг, человеческое общество, эпидемии, террористические сети, дорожное движение, жизненный цикл самолета или автомобиля.

Примеры сложных адаптивных и неадаптивных систем [7], характеризующие их значимые свойства, приведены в таблице 1.1 ниже.

Таблица 1.1. Виды сложных систем

<b>СЛОЖНЫЕ АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ</b>	<b>СЛОЖНЫЕ НЕАДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ</b>
Мировой рынок, основанный на интернет-технологиях	Централизованная плановая экономика
Гибкая производственная система	Конвейер массового производства
Команда по междисциплинарному проекту	Начальник отдела и подчиненные
Адаптивная система планирования	Пакетная система планирования
Мультиагентная система	Большая монолитная компьютерная программа
Жизненный цикл самолета	Самолет

Более близким к технике примером может служить «умный автомобиль» будущего, который через датчики в шинах может почувствовать изменение сцепления с трассой при сходе с

шоссе на грунтовку и предложить раме поднять подвеску, которая, в свою очередь, попросит двигатель сбросить еще обороты, и каждый из этих элементов самостоятельно, но согласованно примет решения, опираясь на результаты анализа развития текущей ситуации.

Другой пример – «умный холодильник», который скоро также «на лету» сможет начать взаимодействовать с пакетом молоком, который ставится в холодильник, что приведет к такому изменению режима работы холодильника, который обеспечит наилучшую сохранность молока – но с учетом интересов и всех тех продуктов, которые уже хранятся в холодильнике, а еще принимая во внимание постоянно уточняемый и пересчитываемый прогноз потребления продуктов хозяином, изменения в прогнозе погоды и ряд других факторов.

Тут нельзя не отметить и новую тенденцию тотального появления встроенных «умных» (smart) систем и образуемых ими системы «повсеместного интеллекта» (ambient intelligence), каждая из которых по определению должна иметь возможности восприятия, принятия решений и коммуникации с другими.

## 1.4. Сложность и неопределенность

Мы предлагаем использовать неопределенность в качестве одного из важных параметров, по которому можно отличать сложные адаптивные системы от неадаптивных систем, как это показано в Таблице 1.2.

Термин «детерминированный» здесь подразумевает, что неопределенность системы равна нулю, в то время как термин «случайный» означает, что неопределенность системы равна единице.

Все сложные адаптивные системы имеют показатель неопределенности между нулем и единицей.

Таблица 1.2. Сложность в сравнении детерминированности и недетерминированности

<b>НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ</b>	<b>СЛОЖНЫЕ АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ</b>	<b>ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ</b>
Неопределенность = 1 (полная неопределенность – хаос, беспорядочность)	$1 > \text{Неопределенность} > 0$ (частичная определенность – частичный порядок)	Неопределенность = 0 (полная определенность – жесткий порядок)
Элементы системы полностью автономны и никак не связаны между собой (каждый принимает решения сам по себе)	Элементы системы (агенты) частично автономны и частично связаны между собой (имеют свободу выбора)	Элементы системы не автономны и жестко связаны между собой (например, следуют приказам и не имеют свободы выбора)
Неорганизованность (хаотичность и спонтанность)	Самоорганизация и эволюция (частичный порядок и гибкий план, работа по ситуации)	Высокая организованность (полный порядок и четкий план, ситуация не влияет)
Совершенно непредсказуемое поведение	Согласованное эмерджентное поведение (взаимодействие для выработки и согласования решений)	Полностью предсказуемое поведение, жесткий алгоритм

Таблица выше показывает связь между сложностью и неопределенностью (недетерминизмом): неопределенность является следствием сложности, с нарастанием которой она увеличивается.

Системы невысокой сложности имеют неопределенность, стремящуюся к нулю, и их поведение мало отличается от поведения детерминированных систем.

Системы с повышенной сложностью, неопределенность которых стремится к единице, балансируют на грани хаоса.

Поведение таких систем характеризуется необычными свойствами, обусловленных наличием большой нелинейности, например, даже при небольшом изменении на входе системы - могут возникать большие изменения на ее выходе («эффект бабочки»), может наблюдаться неожиданная смена траектории в линии поведения (бифуркация), возникает эффект резонанса и многие другие.

Подобное поведение будет присуще и любым интеллектуальным системам, построенным как сложные адаптивные системы.

## 1.5. Семь критериев сложности

В результате наших исследований мы выделили семь ключевых свойств, которые отличают сложные адаптивные системы от детерминированных систем [8]: *связность, автономность, эмерджентность, неравновесность, нелинейность, самоорганизация и эволюция.*

Мировой рынок, все больше использующий Интернет-технологии, является, возможно, самым интересным примером сложной адаптивной системы [9], который может быть наглядно использован в качестве иллюстрации указанных свойств.

### 1.5.1. Связность

Сложная адаптивная система состоит из большого количества разнообразных элементов (агентов), которые связываются в ходе взаимодействия друг с другом. При этом связи между агентами могут различаться еще и по своей силе, отражающей тот факт, насколько агенты подходят друг другу.

Более высокая степень связности системы, отражающая насколько одни агенты могут связываться с другими агентами, в сочетании с более слабыми связями, которые могут быть легко разорваны и сформированы заново, подразумевают более высокую сложность всей системы. Сложная система больше походит на размытое облако, чем на устоявшуюся жесткую структуру: у нее нет постоянной жесткой конфигурации, как нет и четких границ между самой системой и ее средой.

Представьте себе мировой рынок, который состоит из большого количества поставщиков, потребителей, производителей, инвесторов, банкиров и других агентов, связанных друг с другом торговыми отношениями. Степень связности, а следом и сложность мирового рынка, многократно увеличились в связи с широким использованием Интернета, где каждый может легко найти каждого, кто ему интересен или полезен. Сила связей между участниками рынка является весьма изменчивой: некоторые являются почти постоянными, как долгосрочные отношения поставщиков и потребителей, но многие связи очень слабы, и постоянно меняются, например, некоторые потребители постоянно меняют свои заказы и своих поставщиков.

Другие примеры: виртуальные организации, состоящие из совместителей, работающих в других организациях, дружба, в которой связи усиливаются или ослабевают с течением времени, спортивные навыки, требующие высокой координации движений, теряемые с течением времени или восстанавливаемые путем тренировок и т.д.

### 1.5.2. Автономность

Агенты управляются не централизованно; они имеют определенную степень автономности, хотя их поведение всегда подчинено определенным законам, правилам или нормам, принятым для системы.

Высокая автономность агентов и их большая свобода принимать разнообразные решения подразумевает более высокую сложность системы.

У мирового рынка нет централизованной системы управления, и все же «свободный рынок» не совсем свободен; участники рынка подчиняются национальным и международным законам, регламентам, установленным нормам поведения и прочим формам давления или влияния на принятие решений. Степень автономности участников рынка влияет на его сложность, однако может быть скорректирована разными предписаниями, позволяющими увеличивать или снижать сложность, когда это необходимо.

Другой пример повышения уровня автономности агентов – компания, построенная как набор самостоятельных бизнес-центров, в которой руководители этих центров могут самостоятельно вести переговоры и заключать контракты, на основе соглашений о разделе прибыли, принятых в компании.

### 1.5.3. Эмерджентность

Общее поведение сложных систем формируется путем взаимодействия их агентов - что, в свою очередь, ограничивает поведение агентов.

Известный принцип Кауфмана гласит, что в самоорганизующихся системах локальные взаимодействия формируют глобальные структуры, которые влияют на порождающих их элементы путем отрицательных (ослабляющих) или положительных (усиливающих) обратных связей, что, как известно, может приводить как к «раскачке» системы и появлению самоускоряющихся (автокаталитических) процессов и даже резонансных явлений или торможению всех процессов и возврату системы в состояние равновесия.

Эмерджентное поведение в системе формируется в ходе взаимодействий агентов и потому непредсказуемо, но оно является отнюдь не случайным. Оно обычно следует некоторым поведенческим шаблонам и ведет к установлению нового порядка в системе (более устойчивого равновесия), но всегда зависит от ситуации, как правило, чем более сложна система, тем более она чувствительна к ситуации, тем большая перестройка может осуществляться в ходе даже самых малых воздействий.

Эмерджентные свойства сложной системы не присутствуют в составляющих ее агентах и трудны для изучения – простейший пример эмерджентного поведения связан с тем, как образуется и распространяется пробка на дороге – пробка движется против движения машин, влияя на принятие решений водителями. Чтобы понимать возникновение этого феномена нужно уметь анализировать сотни и тысячи решений, принимаемых водителями, и для управления этим феноменом нужно уметь влиять на принятие решений водителями.

На мировом рынке глобальное распределение поставок формируется в результате местных торговых операций. Такое распределение непредсказуемо, однако, и в нем можно обнаружить определенные шаблоны, например, экономические циклы с фазами подъема, спада, рецессии и т.д.

На примере компаний эмерджентное поведение часто демонстрируют междисциплинарные команды по проектам, члены которых оказываются способными рождать ценные идеи, которые сотрудникам невозможно было бы получить по отдельности, изолированно работая в своих отделах.

#### 1.5.4. Неравновесность

Во внешней среде сложной системы или внутри нее часто происходят события, нарушающие состояние равновесия системы, например, приход нового важного заказа или выход из строя важного ресурса.

В реальной жизни у сложной системы может не быть времени вернуться в состояние равновесия в период времени между двумя событиями, и потому система вынуждена работать вдали от равновесия. То же обычно можно сказать и о каждом агенте – например, агент заказа на перевозку может найти грузовик, который лишь частично соответствует требованиям заказа (приезжает позже срока), но у агентов уже нет больше времени продолжать поиск новых вариантов, приходит пора принимать окончательное решение и выезжать к заказчику.

Байнхокер [9] утверждает, что рынки всегда функционируют далеко от равновесия, ведь все время заключаются новые торговые сделки, и даже сделки, заключенные ранее, меняются с высокой скоростью. В результате у рынка не хватает времени на возвращение к равновесию между двумя событиями.

При определенных условиях в таких системах возникают колебания (осцилляции), связанные с циклическим переходом от одного состояния равновесия – к другому.

Этот феномен также наблюдается в жизни компаний – например, растет недовольство сотрудника, и он увольняется из компании, а на смену ему приходят более продуктивные люди, которые превращают убыточное направление в прибыльный бизнес, и тогда ушедший сотрудник возвращается.

Заметим, что даже в существующей связи удовлетворенность партнером с каждой стороны может быть совершенно различной, что означает неравновесие и в силе связи, подобно тому, как это бывает в семьях.

Понимание силы связей между элементами может помочь прогнозировать «узкие места» и в будущем управлять поведением сложной системы.

#### 1.5.5. Нелинейность

Нелинейность означает, что результат поведения сложной системы не сводится к результатам поведения ее отдельных частей (агентов).

Действительно, если агенты постоянно взаимодействуют, обращаясь друг к другу с предложениями или меняя что-то в общей для всех ситуации, то это немедленно приводит к изменению условий, влияющих на принятие решений другими агентами.

Как и в обычной жизни, все часто начинается с незначительных событий (возмущений), последствия которых могут накапливаться и в какой-то момент приводить к резкому преодолению порога, радикально меняющего все поведение системы.

Характерным примером являются автокаталитические реакции в самоорганизующихся системах, открытые И.Пригожиным в сложных растворах органических жидкостей. Для нашего случая технических систем взаимодействия в небольшой группе агентов могут также приводить к ситуации, когда все больше агентов вынуждены менять решения – процесс изменения решений может развиваться с нарастающей силой, кардинально меняя поведение системы в целом.

Спусковым крючком для автокаталитической реакции могут быть самые малые события и даже совершенно случайные флуктуации, которые впоследствии перерастают в критические события («эффект бабочки»). Мы знаем много примеров и в технике, когда наличие многих незначительных, но связанных изменений в течение долгого времени создает в итоге совершенно неожиданный критический сбой – катастрофу, имеющую далеко идущие последствия. Момент, когда незначительные изменения вдруг превращаются в критическое событие, влекущее полную перестройку связей внутри самоорганизующейся системы, называют переломным моментом.

Финансовый кризис 2008 года [10] – показательный пример критического события. Талеб [11] предупреждает, что в случае увеличения сложности мирового рынка, использующего Интернет-технологии, критические события могут стать все более частыми и опасными.

Так и в жизни компаний – появление важного нового клиента и большого заказа могут вызвать лавинообразную цепную реакцию, ведущую к скачку в развитии компании.

### 1.5.6. Самоорганизация

Сложные адаптивные системы *самоорганизуются*, т.е. сами изменяют свою структуру и поведение, чтобы устранить или сократить влияние событий, нарушающих их состояние, с больше или меньшей степенью адаптивности и устойчивости.

Помимо такой реактивной самоорганизации, у агентов, образующих систему, может быть способность к проактивной самоорганизации, например, через внутренние попытки повысить эффективность уже принятого решения.

Такая способность может позволить агентам совместными усилиями остановить процесс постепенной деградации системы и роста отказов, или даже проявить созидательные возможности «эмерджентного разума», позволяющего сообща находить принципиально новые решения.

Важной возможностью для усиления самоорганизации должна со временем стать способность агентов получать новые знания из своего опыта.

Такие способности очень характерны для агентов мирового рынка, когда участники вносят поправки к законам о торговых операциях для повышения эффективности торговли – новые законы (глобальные структуры) начинают влиять на локальные взаимодействия, принятие решений и поведение тех, кто их порождает.

Аналогичным образом, в компаниях создаются иницируемые снизу рабочие группы для решения выявленных важных проблем, действия которых далее оказываются часто более эффективны для организации, чем приказы сверху.

### 1.5.7. Эволюция

Если мы определяем окружающую среду системы как набор всех других систем, с которыми эта система взаимодействует, тогда мы можем утверждать, что сложные системы открыты: они адаптируются к своей среде, но и, в свою очередь, изменяют её.

Процесс такого взаимодействия обычно необратим – как оказывается, невозможно «откатить» назад любое решение, полученное в самоорганизующейся системе, поскольку исходные условия, при которых оно было получено, на практике уже нельзя восстановить.

Другими словами, сложные системы и их среды развиваются параллельно и асинхронно, оказывая влияние друг на друга, т.е. *коэволюционируют*.

Совместное развитие сложных систем мировой экономики, технологий и общества будет для примера показано в Таблице 1.3 ниже.

## 1.6. Отрицательные и положительные аспекты сложности

Мы изучаем сложные системы, прежде всего, потому, что они очень существенно влияют на тех, кто в них живет и работает.

Цель наших исследований состоит в том, чтобы создавать модели, методы и средства управления сложными системами, которые позволят не только извлечь положительную пользу из сложности, но и минимизировать или полностью нейтрализовать отрицательные особенности сложных адаптивных систем.

В большинстве случаев, самыми важными и трудными вызовами сложных систем является необходимость быстро реагировать на частые и плохо предсказуемые события, нарушающие наши планы (равновесие), а также нелинейность системы в реакции на эти события, затрудняющая какое-либо прогнозирование результатов.

Примеры возмущающих событий включают в себя: постоянные изменения спроса и предложения, нарушения сроков поставок, изменение цен на услуги в результате повышения конкуренции, изменения в ранее заключенных соглашениях, заказах и обязательствах; задержки и отмены поставок товаров и услуг; нарушения правил безопасности, мошенничество и хакерство, так, около миллиарда атак было предпринято в последней четверти прошлого года.

Часто возникающие и непредсказуемые события препятствуют целенаправленному планированию и нашим успехам в реализации планов.

Частные компании и государственные организации встречаются с большими трудностями в управлении распределением ресурсов, так как спрос и предложение становятся все более индивидуальными, изменчивыми и трудно прогнозируемыми.

Еще больший вред наносят непредвиденные события, вызванные нелинейностью сложных систем, начиная с внезапной потери важного клиента и закачивая мировым финансовым кризисом. Постепенный отказ системы вследствие накопления множества незначительных ошибок в обслуживании и управлении привел по крайней мере к одной авиакатастрофе [12]. Подобные трагедии служат предупреждением для руководителей и специалистов, не признающих того, как важно понимать природу сложных систем, несмотря на очевидные доказательства непригодности старых методов управления.

С другой стороны, самоорганизация и эволюция в последнее время все чаще считаются положительными сторонами сложных систем.

Подумайте, как полезно и приятно для каждого из нас было бы быть частью системы, например, частной компании, государственной организации или социальной группы, способной быстро, гибко и эффективно самоорганизовываться для устранения последствий нежелательных событий, повышения своей продуктивности и эффективности, устойчивого поступательного развития в полной гармонии с окружающим миром.

Еще одной важной полезной особенностью сложных систем является разнообразие агентов, которое гарантирует надежность и живучесть всей системы. На планете Земля живет приблизительно семь миллиардов человек, и каждый из нас уникален, отличен от других. Будем надеяться, что никакая атака, никакие эпидемии не смогут уничтожить нас всех разом – разнообразие обеспечит сохранение нашего вида.

Примером чрезвычайно сложной системы, способность которой к быстрой самоорганизации обеспечивает наше здоровье, а часто, и сохранение самой жизни в условиях постоянных внешних атак, является иммунная система человека.

Другим прекрасным примером является Интернет – выход из строя одного из узлов или даже целой группы не нарушает работоспособность системы в целом.

Менее приятным примером самоорганизации являются современные сети террористов, которые становятся все более устойчивыми к действиям спецслужб и действуют уже во все более глобальном масштабе.

Конечно, понятия “положительный” и “отрицательный” в отношении вышеупомянутых систем с высокой самоорганизацией весьма относительны. Высокая дееспособность вирусов к распространению эпидемии или террористической сети к организации массовых взрывов является положительным аспектом для вспышки болезни и для террористов соответственно, но чрезвычайно отрицательным фактором для их жертв и общества в целом.

Итак, наш вывод состоит в том, что *сложность системы влечет за собой неопределенность, а неопределенность (недетерминизм) порождает новые возможности,*

*на которые могут чутко реагировать другие сложные системы, создавая новые условия и планы для роста и преуспевания.*

Когда-то, на заре появления Интернета, дочь одного из авторов, обучавшаяся в Российском университете, получила задание для курсовой работы по малоизвестной американской писательнице и была в большом расстройстве, поскольку долго не могла найти материалов в библиотеке своего университета. Но когда попыталась найти материал в Интернете, то нашла лишь только ссылку на труды ректора одного из университетов в США, который оказался специалистом по этой писательнице. На вопрос «А почему бы тебе не написать ректору и не попросить его труды?» дочь ответила: «Кто я, и кто он? Разве может он мне ответить?». Однако после отправленного краткого письма ректору уже на следующий день пришел ответ – очень занятый известный ученый чутко отреагировал и нашел время ответить, прислал требуемые труды и дал важные рекомендации – курсовая работа оказалась одной из лучших на факультете.

Разве это не пример сложной системы, позитивной неопределенности и недетерминизма агентов, свободы выбора и принятия решений, открывающих для каждого человека новые возможности, где бы он не находился?

Эта книга призвана помочь читателям использовать открывающиеся новые возможности в эволюции сложных систем.

## 1.7. Эволюция сложных систем

Откуда же появляется сложность и почему в настоящее время так быстро растет число все более сложных проблем?

Существуют убедительные доказательства того, что одновременно с развитием человечества неуклонно растет сложность различных сфер нашей жизни – социальной, политической, культурной, экономической и других, которые все больше переплетаются и коэволюционируют между собой. Этот процесс *необратим* и проявляется в увеличении *разнообразия* и *взаимной зависимости* возникающих новых структур и видов деятельности, а также в увеличении *неопределенности* в процессах нашей деятельности, именно поэтому все больше требующих новых знаний и творческого подхода в любой деятельности.

*Естественный отбор, который управляет эволюцией, благоприятствует развитию способностей к адаптации и разнообразию нашей жизни (а значит, и ее сложности), как выигрышным свойствам сложных систем.*

Мы должны учиться у эволюции сложных систем и при разработке продукции и услуг рассматривать сложность как новое потенциально полезное свойство.

И учиться использовать свойства сложных систем, такие как самоорганизация и эволюция, для повышения эффективности деятельности организаций, технических и программных продуктов и даже нас самих.

Мы признаем, что наша идея сознательного усложнения нашей жизни парадоксальна и во многом, казалось бы, противоречит нашей интуиции. И все же, мы неоднократно видели в своей практике, что лучшей стратегией при столкновении со сложными проблемами, является управление ситуацией за счет изменения степени автономности отдельных узлов или регулирования силы связей между ними, что часто позволяет быстро приспособиться и устранить, или, по крайней мере, сократить последствия событий, совершенно неподвластных нам.

Представьте себе две организации, работающие на передовом рубеже инноваций. При этом одна из них ведет очень закрытую деятельность, а другая открыта и развивает многочисленные связи с университетами, партнерами, ассоциациями пользователей, ученым сообществом и т.д. У кого больше шансов выжить и иметь более интенсивное развитие? Ответ, казалось бы, во многом очевиден, но на самом деле зависит от ситуации. Если рынок



хорошо предсказуем – то первая организация, не тратя время и силы на многочисленные связи, может быстрее завершить прорывной продукт и вывести его на рынок. Но если неопределенность на рынке продукции и труда высока, что обычно и бывает – то выиграет вторая организация, которая может победить за счет кооперации в поиске клиентов и подготовке кадров.

Другой пример - когда-то при создании одной из первых наших платформ для создания мультиагентных систем мы были вынуждены запустить сразу два конкурирующих проекта разработки вместо одного, поскольку видели несколько путей создания будущих систем и еще не имели никаких аргументов в пользу единственного выбора любого из них, что позже дало нам гораздо большую эффективность в реализации проектов и позволило создать коллектив разработчиков, хорошо владевших разнообразными технологиями.

Не парадоксально ли иметь в одной компании конкурирующие друг с другом подразделения?

Оказывается, положительный эффект может быть связан не только с обострением внутренней конкуренции, но и синергетическим эффектом при переходе от конкуренции - к кооперации.

## 1.8. Совместное развитие технологии, экономики и общества

Общество *коэволюционирует* с технологиями создания материальных благ.

Аграрное общество, в котором ключевым ресурсом была земля, а все люди были полностью заняты в сельском хозяйстве, было вытеснено индустриальным, где ключевым ресурсом стал капитал, и большинство людей начало работать на промышленном производстве товаров

Теперь мы находимся на стадии перехода от промышленного общества – к информационному обществу, в котором ключевым ресурсом являются знания, и где большинство людей работает в сфере услуг, основанных на знаниях (то есть связанных с обработкой информации), а не на производстве материальных товаров.

Совместное развитие общества, экономики и технологий, иллюстрирующее наши рассуждения в более глобальном историческом масштабе, показано в Таблице 1.3. Средства, направленные на улучшение качества жизни, изменяют экономическую деятельность, которая, в свою очередь, меняет и само общество.

Однако эти средства становятся доступными, только если общество решает вложить в них капитал и целенаправленно использовать их для своего развития.

Важно отметить, что с развитием экономической системы изменяются и ключевые факторы экономического успеха. Экономия на масштабе в гигантских фабриках, бесспорно, ключевой фактор успеха в промышленной экономике прошлого века, становится все менее важным фактором при растущей сложности экономики знаний.

Мы утверждаем, что новый ключевой фактор успеха - адаптивность, как способность быстро и точно отвечать на непредсказуемые изменения на рынке.

Таблица 1.3. Совместное развитие общества, экономики и технологии

<b>ЭТАПЫ социального развития</b>	<b>КЛЮЧЕВЫЕ РЕСУРСЫ</b>	<b>СРЕДСТВА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ</b>	<b>МАСШТАБ</b>	<b>ФАКТОРЫ УСПЕХА</b>
<b>Аграрное общество</b> <b>Аграрная экономика</b> Орудия обработки земли	Земля	Сельские дороги	Местный	Эффективность

<b>Индустриальное общество</b>  <b>Индустриальная экономика</b>  Технологии массового фабричного производства	Капитал	Автоматострали и железные дороги	Региональный и национальный	Экономия на масштабе (тиражирование)
<b>Информационное общество</b>  <b>Экономика Знаний<sup>2</sup></b>  Цифровые технологии	Знания	Цифровые сети	Мировой	Адаптивность

## 1.9. Сложность и информационное общество

### Цифровые технологии как причина роста социальной сложности

Сложность социальных систем растет пошагово, как показано ниже на Рисунке 1.4, что удивительным образом напоминает известный процесс смены парадигм в науке [13].

Текущий переход от индустриального общества к информационному, который начался после окончания Второй мировой войны с изобретения компьютеров, известен резким увеличением сложности, вызванной широким распространением цифровых технологий, которые предоставляют беспрецедентные новые возможности для социального взаимодействия.

Во время перехода от аграрного общества к индустриальному увеличение сложности было небольшим, хотя, в некоторых аспектах, весьма существенным.



Рисунок 1.4. Рост сложности социальных систем

<sup>2</sup> Экономика знаний - высший этап развития постиндустриальной экономики и инновационной экономики.

Поспешная миграция жителей сельской местности в города в поисках новых возможностей трудоустройства вызвала беспорядки и, в то же время, расширила возможности социального взаимодействия благодаря увеличению плотности населения в городах и, таким образом, в итоге увеличила сложность социальной жизни. Жесткий традиционный общественный строй, основанный на земельной собственности, через волну изменений был вытеснен новым общественным порядком, в котором основной ценностью стал капитал - с тем, чтобы через новую волну преобразований смениться новым информационным обществом, в котором главную ценность приобретают знания, которые постепенно становятся рычагом власти, заменяя собой насилие и деньги как действующие факторы предыдущих формаций.

Во время текущего периода цифровые технологии значительно повысили активность социального взаимодействия (социальную плотность), избавив население от необходимости перемещения. Теперь мы, находясь на удалении друг от друга, можем формировать общности в группах по интересам по всему миру, и территории и расстояния теперь уже не имеют решающего значения.

Благодаря цифровым технологиям все участники информационного общества взаимодействуют более активно, быстрее, чаще и с большим числом других людей, чем когда-либо прежде в истории, и, конечно, высокая степень взаимодействия и рост скорости связи обусловили новый высокий уровень сложности современного общества (Рисунок 1.5).

В 2013 году приблизительно 3 миллиарда человек использовали Интернет, что составляет более 40% общего количества людей на планете и, согласно информации The Time News, до 6 миллиардов людей пользовались мобильными телефонами.

Говорят, что в прошлом году число выпущенных смартфонов впервые превысило число выпущенных зубных щеток.



Рисунок 1.5. Динамика роста возможностей информационно-телекоммуникационных технологий

На рисунке 1.6 кратко представлена эволюция основных информационных технологий, перспективы которых связываются с Интернетом вещей, в котором каждая из наших обычных вещей будет иметь непрерывную связь с производителем, воспринимать окружающую среду, принимать решение и коммуницировать с себе подобными. По оценкам Института McKinsey Global Insitute, Интернет вещей обеспечит рост производительности труда до 5% в год уже на протяжении следующих 10 лет, что совокупно даст примерно 900 млрд. долларов США новых доходов и экономии лишь для производственного сектора (Интеллектуальные, поддерживающие сетевые функции изделия. Следующая трансформация производственной отрасли. Исследование Oxford Economics. – В сб.: Интернет вещей – PTC и Harvard Business Review Россия, 2015. – с. 20-27).



Рисунок 1.6. Развитие ИТ технологий

Эксперты сходятся во мнении, что потеря темпа освоения новых информационно-коммуникационных технологий грозит человечеству резкой потерей продуктивности работы в командах людей, где бы они ни работали: от крупных государственных корпораций – до малого и среднего бизнеса (Рисунок 1.7).

Такое расширение возможностей взаимодействия уже вызвало поразительное увеличение сложности нашего общества, все последствия чего, наряду с прокатившейся волной цветных революций, нам еще только предстоит понять и оценить на практике.



Рисунок 1.7. Будущее производительности

## Глобализация

С ростом числа возможных взаимодействий мы пережили очень важный переход от индустриального рынка, функционирующего в масштабах государств, к общей глобальной мировой экономике.

Недавний отчет международной организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) показал, что глобализация повысила уровень благосостояния во всем мире. Действительно, в течение 30 лет, предшествующих финансовому кризису 2008 года, в мире, в целом, наблюдался беспрецедентный экономический рост, с одним недостатком – хотя бедные и стали богаче, разрыв между богатыми и бедными еще больше увеличился.

Разница в достатке между богатыми и бедными людьми в каждой стране, так же, как и между богатыми и бедными странами – также следствие усложнения мирового рынка и решение этой проблемы неравенства требует новых подходов, основанных на понимании природы и феноменов растущей сложности.

## Переход от капитала к знаниям как ключевому ресурсу власти и успешной экономической деятельности

В промышленной экономике за деньги можно было купить любые знания, необходимые для бизнеса.

В информационной экономике, наоборот, знания о том, как решать сложные проблемы, могут привлечь любые инвестиции, которые требуются для начала и развития успешной экономической деятельности.

Основоположники информационной экономики и основатели таких компаний, как Microsoft, Apple, Google, Amazon и Facebook, работа которых основана на применении знаний и информации, являются новой экономической элитой.

Питер Друкер первым определил знания, как ключевой ресурс для бизнеса нового мира, возникшего после окончания Второй мировой войны, и первым ввел термин «работник умственного труда» («knowledge worker») [14].

В то время, как сложность нашей социальной среды увеличивается, мы нуждаемся в новых знаниях для решения новых сложных проблем – сильный стимул для вложений в образование и выращивание инноваторов.

И для этого у нас под рукой должны быть новые цифровые технологии, которые подходят для сбора, хранения, обработки и распределения знаний (ключевого ресурса информационного общества).

Технологии обработки знаний в настоящее время являются единственными технологиями, чье соотношение эффективности к стоимости непрерывно возрастает.

## Переход от массового производства к индивидуальному<sup>3</sup>

Как только люди немного улучшили уровень жизни и получили первые средства коммуникации, открыв, таким образом, новые возможности, они начали отстаивать свою индивидуальность, требуя продукцию и услуги, соответствующие их уникальным индивидуальным потребностям.

Этот тренд сейчас все более явно присутствует во многих сферах нашей жизни. Если раньше люди просто покупали типовые путёвки, то теперь требуют индивидуального планирования турпутешествий на заказ; в прошлом товары покупались только в доступных магазинах с ограниченным выбором, а теперь индивидуально подбираются через Интернет от множества производителей по всему миру.

Новая тенденция спроса на адресное предоставление продукции и услуг существенно изменила методы планирования производства и управления цепочками поставок у поставщиков. Во многих отраслях падение массового спроса возвестило о конце эры строгого планирования ресурсов и пакетной обработки информации.

В начале нашей предпринимательской деятельности нас пригласили на одно из самых крупных и успешных автомобильных производств Германии для консультации на тему того, как справиться с новой проблемной ситуацией: дилеры компании, в желании угодить уникальным запросам клиентов, начали изменять варианты поставки автомобилей, ранее заказываемых единым пакетом, все более часто, и вскоре частота событий изменений

<sup>3</sup> Индивидуальное (единичное) производство – тип организации производства для изготовления изделий ограниченного потребления (штучная продукция). Особенности этого производства являются широкая номенклатура, небольшое количество выпуска, использование универсального оборудования, отсутствие постоянного закрепления деталей и технологических операций за рабочим местом.

достигла двух часов. При этом система планирования этой компании требовала по меньшей мере 8 часов для подготовки оптимального графика производства, и поэтому в принципе не могла справиться с возросшей динамикой изменений спроса. Очевидным решением было отказаться от только что построенной системы ERP, работающей в режиме пакетной обработки данных, в пользу адаптивных планировщиков реального времени, способных к быстрому перепланированию затронутых участков производства без останова и полной перестройки плана, при возникновении новых потребностей у заказчиков.

Однако в начале 1999 году такое решение показалось слишком радикальным – в особенности, после огромных инвестиций предприятия в классическую ERP систему, надолго «заасфальтировавшую» устаревший подход массового производства.

Сегодня, возможно и по этой причине, рассмотренное предприятие теряет былую привлекательность и уступает все большую долю рынка своим конкурентам.

## Переход от производства - к услугам, основанным на знаниях

Перемещение массового производства из развитых стран - в развивающиеся является неотъемлемой частью глобализации.

Замена массового производства услугами, основанными на знаниях, в качестве основной деятельности по созданию благ, может быть произведена только в тех странах, которые располагают знанием и опытом в современных ИТ, а также большим количеством первоклассных работников умственного труда, среди которых исследователи, инженеры и руководители из самых разных областей, в том числе финансов, ИТ, консалтинга, дизайна, СМИ и т.д.

Услуги, основанные на знаниях, охватывают все услуги, являющиеся продуктами интеллектуального труда, такие как: проведение исследований, проектирование и разработка продукции и услуг, прототипирование, разработка производственных технологий, управление проектами, разработка программ и прочие ИТ-услуги, архитектурное проектирование и контроль строительства, маркетинг и торговля, PR и информационное освещение, консалтинг, организация досуга, управление инвестициями, банковское дело, услуги здравоохранения, образовательные услуги, логистические услуги и т.д.

Большинство этих услуг хорошо известны и не новы, но новшеством является применение новых технологий оцифровки, хранения, обработки и передачи информации, которая позволяет обмениваться знаниями между континентами.

Быстрое освоение рынка услуг, основанных на знаниях, предоставляет прекрасную возможность для экономического процветания государства в то время, как массовое производство толкает любую страну на столкновение с острой конкуренцией.

Развитое индивидуальное производство — это уже совсем другая история. Услуги исследования и разработки, которые обеспечивают конкурентное преимущество таким производителям как Rolls-Royce, Airbus, Boeing, Mercedes, Bosch и Dyson, являются чрезвычайно важными *услугами, основанными на знаниях*. В итоге знания, обретенные при помощи этих услуг, находят физическое воплощение в процессе производства, но всё же ключевой ценностью произведенной продукции являются именно знания, а не их «оболочка» и материальная реализация, пусть даже в восхитительных машинах.

Apple, Google, Facebook и Microsoft, с другой стороны, помещают знание, созданное исследователями и разработчиками, не в материальные товары, а в программные системы. Вполне естественно, что компании, которые воплощают созданные знания в программных системах, печатных изданиях или в консалтинговых услугах, достигают существенно более высокой добавленной стоимости, чем производители, которые должны закупать дорогие материалы и/или компоненты извне.

Будет интересно наблюдать, как общество и экономическую среду изменят новые технологические инновации, например, 3D печать и электрические автомобили.

## Переход от крупных корпораций к сети малых цифровых предприятий

Крупные монолитные корпорации являются продуктом индустриальной экономики, которая характеризовалась стабильными рынками, порождающими устойчивый спрос на идентичные товары массового производства.

Такие корпорации, будучи устойчивыми и стабильными, процветали в эру, когда экономия на масштабе была ключевым фактором успеха.

Новый сложный мировой рынок является врагом чего-либо крупного и статичного, требующего однотипного повторения, многоуровневых иерархий и жестких связей.

Теперь критическим фактором успеха бизнеса является адаптивность, и поэтому мы можем с уверенностью предположить, что будущее крупных корпораций будет нелегким, за исключением тех, которые производят унифицированную продукцию, например, подгузники или медицинские принадлежности.

Однако у крупных корпораций есть замечательная способность к выживанию, и многие из них совершенствуют свою структуру и процессы, и продолжают работать в обновленном формате, переходя к сетевым организациям.

Организационная структура, наиболее подходящая для поставок на постоянно меняющиеся рынки, это сеть обособленных самостоятельных производственных подразделений, каждое из которых имеет свои собственные уникальные знания и опыт (ресурс знаний).

Часто такая структура строится как *виртуальное предприятие* [15].

Виртуальное предприятие является сетью связанных автономных подразделений (бизнес-центров, департаментов, филиалов), где каждое подразделение может выступать фактически как самостоятельная компания, покупая общие сервисы (бухгалтерию, кадры и др.) у других подразделений на внутреннем виртуальном рынке. Виртуальная организация может состоять из реальных организаций, а также небольших групп специалистов или даже одного человека, также способного действовать как целая организация. Связи между подразделениями могут динамично устанавливаться, разрываться и восстанавливаться в зависимости от нужд предприятия, в результате самоорганизации для приспособления к среде. Зачастую трудно спрогнозировать требования предприятий к ресурсам (физическим, финансовым, кадровым и прочим), необходимым для осуществления неосновных видов деятельности. Поэтому виртуальные предприятия обычно имеют партнерские соглашения с гораздо большим числом компаний или частных лиц, чем это действительно необходимо в текущий момент времени. Таким образом, виртуальные предприятия обеспечивают стратегический запас ресурсов на случай, если некоторые из партнеров будут заняты, когда возникнет необходимость в их услугах. Так как организации-партнеры виртуальных предприятий работают в тех же изменчивых условиях, в их интересах также взаимодействовать со многими потенциальными покупателями их услуг.

Поскольку условия конкуренции все время меняются, виртуальное предприятие может разрывать связи с некоторыми старыми подразделениями и устанавливать связи с новыми, обеспечивая свое развитие. Виртуальное предприятие обычно сосуществует, конкурирует и сотрудничает с другими виртуальными предприятиями и, так как все эти предприятия параллельно развивают свою эффективность и конкурентоспособность (коэволюция), они создают постоянно меняющуюся среду. Не каждому предприятию удастся хорошо разыграть карты – всегда есть компании, которые не успевают за динамикой рынка.

Такие компании исчезают, но из них формируются новые компании, которые выходят на рынок и начинают конкурировать и увеличивать число своих связей.

Как сообщает компания Accenture, 52% предприятий из списка Fortune 500 наиболее успешных компаний за 2000 год, уже не существуют.

Мировая экономика функционирует и развивается как сложная система.

У крупных корпораций существует реальная возможность реорганизовать себя в виртуальные предприятия и избежать судьбы организаций-монстров эпохи плановой экономики.

Популярным новым названием организаций, все больше вкладывающим в создание электронных моделей объектов и автоматизацию всех процессов, является *цифровое предприятие*.

## Переход от общения лицом к лицу к торговле в онлайн режиме

Этот переход постепенен, и наиболее вероятно, что оба типа розничной торговли (а также банковского дела) продолжат существовать в будущем.

Тем не менее, экономия, которую розничные торговцы и банкиры могут получить благодаря использованию Интернета, является очень существенной, и потому этот переход будет лишь ускоряться.

Переход от непосредственного общения при купле/продаже к торговле в Интернет сети повлек ряд неожиданных последствий, часть из которых выражена в явлениях, описанных ниже:

### «Длинный хвост<sup>4</sup>»

В экономике, основанной на продаже товаров через физические розничные точки, из-за высокой стоимости площадей, розничные торговцы могут позволить себе хранить только те товары, которые имеют хороший спрос. Таким образом, физические розничные точки обладают сравнительно узким ассортиментом, т.е. приводят за собой «короткий хвост» товаров. У компаний, продающих по Интернету, нет этого недостатка, потому что они могут хранить товары в отдаленных и дешевых местах или заказывать товары при необходимости, вовсе не храня их. Поэтому, несмотря на небольшие объемы продаж отдельных типов товаров, такие продавцы могут получить большую прибыль, формируя «длинный хвост» товаров (т.е. обеспечив широкий ассортимент) и продавая, в первую очередь, те товары, которые обладают большей разницей между себестоимостью и ценой [16].

### «Мудрость толпы»

Эксперименты показывают, что, в среднем, при определенных условиях, мнение большого количества обычных людей о любом предмете, выбранном случайно, очень схоже с мнением, выраженным экспертами из числа элитных интеллектуалов [17].

Поэтому розничные торговцы, работающие в Интернете, могут выставлять свои товары и услуги на суд большой аудитории, и бесплатно приглашать ее к рассмотрению своих предложений без необходимости нанимать дорогостоящих экспертов по товарам.

### «Экономика внимания»

На конференциях, проводимых в залах и в лекционных аудиториях, выступающие (докладчики, преподаватели, и т.п.) имеют большое внимание их слушателей к предмету доклада или обсуждения.

Однако, нет никаких гарантий, что информация о том же предмете будет замечена кем-либо, будучи размещенной в Интернете.

Поставщики информации вынуждены бороться за внимание посетителей Интернета и особой ценностью становится внимание потребителей, выражаемое в кликах [18].

## Переход от обучения лицом к лицу к образованию онлайн

Естественным следствием развития мировой информационной экономики является рост спроса на знания, а следовательно, на высшее образование.

---

<sup>4</sup> Длинный хвост — розничная концепция, описывающая явление продаж широкой ассортиментной линии (много) небольшими объемами (понемногу). Название концепции происходит от формы графика функции, иллюстрирующего зависимость объемов продаж от уровня популярности товара.



И рост этот отныне и далее будет только ускоряться.

Для многих стран переход в информационную экономику несет немало проблем, таких как большая потребность в работниках умственного труда и серьезный дефицит средств на предоставление высшего образования.

Но цифровые технологии могут и тут прийти на помощь. С их применением возможно экономически выгодно обрабатывать, хранить и поставлять образовательные курсы и, что еще более важно, современные технологии предоставят поддержку для интерактивного обучения и передачи идей вне всякой цензуры. Это позволит существенно сократить стоимость обучения и, возможно, повысит качество образования за счет передачи контроля над процессом обучения от учителя к учащемуся, с сохранением важной роли учителя как наставника и советника.

Описанные выше тренды, позволят значительной доле мирового населения непрерывно заниматься образованием и самообразованием посредством дистанционных курсов, предлагаемых множеством *виртуальных университетов*, т.е. распределенными географически, консорциумами или партнерствами на базе реальных университетов, тесно связанных цифровыми сетями, такими как Интернет.

## Появление цифровой индустрии развлечений и социальных сетей

Текущий переход от бумажных и аналоговых СМИ к цифровому формату развлечений, как главной досуговой деятельности, стал возможным благодаря удивительному прогрессу в проектировании миниатюрных мощных процессоров и кристаллов памяти, а также требуемых программ.

Об успехах в этом направлении свидетельствует широкое распространение многоканального цифрового телевидения, цифровых фотоаппаратов, сотовых телефонов и цифровых устройств, аудио- и видеозаписи. Вдобавок к этому, быстрыми темпами развиваются вебсайты для скачивания и загрузки мультимедийной – музыкальной, видео и художественной – продукции. Такие компании как Apple, Google, YouTube и Facebook являются символами этой революции.

Распространение социальных сетей, где люди выставляют свои творческие работы на суд глобальной аудитории, вышло на значительный уровень и, несомненно, будет продолжаться во второй половине этого века.

Фактически, каждый человек становится генератором новой информации – в том числе и важных новых знаний.

## Личная свобода

Интернет делает территории и географическое положение людей не очень значительным фактором при выборе работы или развлечений.

Не выходя из дома, через специализированные веб-сайты путем аутсорсинга теперь можно решить множество самых разных личных задач, будь то поиск партнеров для свиданий или другие личные задачи, разработка дизайна вебсайта или бухгалтерский учет, частное репетиторство по математике или дизайн платья для свадьбы.

Аутсорсинг предоставляет возможность найти решения с наилучшим соотношением цены и качества. Например, услуги необходимого специалиста из Индии за 15\$ в час (по сравнению с 60\$ в час в США), репетитора по математике из Бангалора за 99\$ в месяц или графический дизайн для свадьбы из Аргентины за 65\$. Аутсорсинг также позволяет сократить неравенство работников умственного труда во всем мире, обеспечивая удаленной работой фрилансеров из развивающихся стран.

## Большие объемы данных и выявление скрытых знаний

Поскольку места, доступного для хранения компьютерных данных, становится всё больше, а Интернет многократно упрощает обмен информацией, появилась тенденция к накоплению

чрезвычайно большого количества данных – так называемых «Больших данных» (Big Data) – и их хранения на обширных серверных хранилищах, называемых «облаками» (Clouds).

Эти собранные данные эффективно используются для моделирования ситуаций, проверки гипотез и подкрепления предположений и суждений экспертов.

Для этого все большее значение приобретает анализ данных («Data mining»), направленный на выявление скрытых полезных знаний [19-20], как ключевого ресурса информационного общества.

Анализ данных уже сегодня широко используется в маркетинге для выявления классов новых потребителей, а также в более таких областях, как спорт (для тренерской деятельности), медицина (для постановки диагноза) или образование (в поиске индивидуальных методов обучения каждого отдельного ученика.)

## Перспективы семантической паутины

Следующей технологической революцией будет переход от текущего управляемого данными Интернета к семантической паутине (Semantic Web), и этот момент, вероятно, станет поворотным для многих областей, так как новое поколение систем сможет понимать значение данных, например, содержание страниц Интернета.

Семантическая паутина является давней мечтой исследователей теории вычислительных систем, которая в настоящее время воплощается вместе с первыми программами, основанными на онтологиях, а также мультиагентными системами, уже применяемыми на практике [21-22].

Дальнейшее развитие семантической паутины будет обеспечено совместными усилиями большого числа исследователей в Европе и США.

Для полноценной реализации семантической паутины требуется функциональность, существенно превосходящая то, что предлагают существующие технологии и системы.

Так, разъяснение семантики предложений, изложенных естественным языком, требует совершенно новых методов и средств сложных адаптивных систем, а не привычного алгоритмического подхода.

## Угрозы новых форм насилия

С быстрым увеличением числа людей, связанных с Интернетом и/или путешествующих по всему миру, появились новые вредоносные сложные системы мирового масштаба, такие, как спам, массовые хакерские атаки, компьютерные вирусы, мошенничество с целью хищения данных и террористические сети.

Это неприятная и опасная сторона совершающейся Интернет-революции.

Однако, эта же революция предоставляет возможность для создания большого разнообразия взаимодействующих (и кооперирующих) систем обеспечения безопасности, которые могут составить надежный заслон злоумышленникам.

Совместное развитие систем нападения и защиты будет ускоряться в будущем.

## Цифровая демократия против цифрового «Большого Брата»

Личные данные о транзакциях кредитных карт, общении с друзьями и деловыми партнерами или личных передвижениях концентрируются в облаках таких фирм как Google, что делает критически важными вопросы конфиденциальности.

Естественно, мы ожидаем, что те, у кого есть информация о нас, могут попытаться использовать её против нас.

Знание - сила. Кто же использует эту силу?

Удастся ли некой компании (возможно, в сговоре с правительством) получить достаточное количество данных, чтобы установить монополию на знания? Или мы можем надеяться на то, что процесс естественного отбора обеспечит справедливое распространение и распределение знаний?

Мы стараемся смотреть на вещи с оптимизмом.

Как мы говорили ранее, эволюция в большей степени способствует развитию сложности, которая подразумевает разнообразие и распределенное принятие решений, чем централизации, формируя более надежные и живучие системы.

## 1.10. Сложность и философия

### Два конкурирующих мировоззрения

В течение длительного времени выдающиеся философы и ученые, среди которых Аристотель, Кант, Ньютон, Лаплас и Эйнштейн, утверждали, что мир по сути детерминирован; что, созданная по “великому замыслу”, наша Вселенная функционирует предсказуемым образом и любая неопределенность, которую мы встречаем, возникает лишь из-за отсутствия знаний; что, узнавая больше, мы уменьшаем неопределенность; и что, в конечном счете, будет обнаружен универсальный закон (демон Лапласа), который позволит нам объяснять и предсказывать все процессы и явления в окружающем нас мире.

На этой основе в последние 500 лет мы наблюдаем развитие редукционизма, старающегося всеми силами свести сложность окружающего мира к простым соотношениям, которые мы можем использовать для решения задач.

Часть этого мировоззрения связана с верой в то, что сложность — это лишь имя, которое мы даем вещам, нам не понятным, и что сложные вещи, за счет понимания их природы, становятся простыми.

Альтернативное мировоззрение было сформулировано И.Пригожиным [1], суть концепции которого состоит в том, что наш мир невообразимо сложен и непредсказуем, но не случаен. Мир способен к самоорганизации и развивается со временем, и это развитие необратимо. Мы действуем на мир и меняем его, а мир в свою очередь влияет на нас и изменяет нас. Предопределенного будущего не существует — оно постоянно создается, появляется из взаимосвязи миллиарда событий и взаимодействий, имеющих место в настоящем — порождаемых целенаправленно или естественным путем.

Некоторые элементы этого мировоззрения присутствовали в учениях Будды и Гераклита, чьи знаменитые слова «Никто не войдет в одну реку дважды» знаем мы все, еще приблизительно 500 лет до н.э., и намного позже в публикациях Фарадея и Поппера.

Дарвинистская эволюция также стала крупным научным вкладом в это мировоззрение.

Давайте рассмотрим практическое значение каждого из этих двух мировоззрений.

### Детерминизм

Если мы полагаем, что живем в детерминированном мире, тогда для каждого следствия должна быть причина, и поэтому у каждого негативного события должен быть виновник. Из этого следует, что кто-то должен быть ответственным за бедность (неплохой кандидат - жадные капиталисты), мировой финансовый кризис (во всем виноваты алчные банкиры, кто же еще?), беспорядки (левые революционеры-агитаторы?) и безрассудные забастовки (безответственные профсоюзы?). Для всего остального, конечно, тоже есть причина?

Тогда рецепт «лекарства» от любых неудач очень прост: лица, принимающие решения, должны удостовериться, что каждый возможный результат их решения должным образом исследован, последствия предсказаны, а лучший результат выбран с использованием этических и рациональных критериев.

Другое предположение детерминизма - что действительность существует объективно, независимо от нас, и мы можем наблюдать и создавать модели (упрощенные представления) объективной действительности, на основе которых можем принимать достаточно обоснованные и единственно верные решения.

## Сложность

С другой стороны, если мы полагаем, что живем в мире, в котором нелинейно взаимодействует большое количество разнообразных агентов, и этот мир развивается непредсказуемо и безвозвратно, как результат миллиардов действий и взаимодействий, то определить виновника каждой неудачи просто невозможно.

Как правило, на практике мы имеем дело не с единственной причиной, а с многими незначительными эффектами, которые могут усиливаться, накапливаться в течение долгого времени, перед тем как достичь переломного момента и вызвать катастрофическое событие; или же, напротив, взаимоустраняться.

Такие проблемы как бедность, финансовый кризис, и даже беспорядки и забастовки, являются слишком сложными для «причинно-следственного» анализа. Сложные проблемы возникают из взаимодействия агентов, они не являются результатом ошибки одного из них (хотя иногда такая ошибка и может стать решающим фактором).

В сложном мире люди, принимающие важные решения, никогда не могут не только определить все возможные исходы, но даже не в состоянии точно предсказать последствия их решений.

Бесстрастное, объективное наблюдение за сложной системой невозможно и никакой эксперт не может наблюдать такую систему без вмешательства, что сразу вносит изменение в ее поведение.

Наше восприятие действительности субъективно и окрашено персональными заблуждениями, и потому у нас нет способа узнать, какова реальность на самом деле.

Мы не видим «полной картины», ведь она постоянно изменяется и развивается.

## Изменение менталитета

Большинство из нас воспитывалось с искренней верой в детерминизм, в то время как для того, чтобы преуспеть в современном мире, необходимо понимать недетерминированную природу сложных систем.

Переход к новому образу мышления необходим, но очень труден, и будет постоянно встречать сопротивление – по мнению тех, кто уже совершил подобный переход в прошлом, это ни что иное, как страх, точно описанный Куном [13].

Что же характеризует этот новый образ мышления и зарождающуюся новую методологию решения сложных проблем?

Вот некоторые базовые принципы:

1. Необходимо принять тот факт, что мир, в котором мы живем и работаем, является открытым и постоянно развивается, и что мы должны постоянно адаптироваться к изменениям в нашей среде.
2. Не стоит полагаться на то, что мы сможем точно определить причины наших успехов и неудач, но надо стараться хорошо делать свое дело.
3. Важно понимать, что даже внешне крепкие организации постепенно «отказывают» (распадаются), и что необходимо время от времени подпитывать их новаторскими идеями и методами, чтобы изменить направление и улучшить их эффективность и производительность.
4. Необходимо понимать, что каждым решением и действием мы активно способствуем строительству нашего будущего, и поэтому «короткие» пути (shortcuts) не приемлемы.
5. Нужно помнить, что время является драгоценным ресурсом, и что все решения и действия должны приниматься и выполняться в режиме реального времени.

6. Надо уметь обнаруживать новые потребности и предлагать новые возможности, которые скрывает от нас неопределенность.

7. И, наконец, нельзя останавливаться на достигнутом – даже самые выгодные сложившиеся условия могут уже завтра необратимо измениться.

Рассмотренные принципы не только во многом изменили наше собственное мышление (и ведь каждый из нас – сложная система!), но что более важно, легли в основу разработанного нового класса мультиагентных систем для управления ресурсами в реальном времени, которые будут подробно рассмотрены в следующих главах.

## Выводы:

1. Рост сложности все больше проявляет себя как новый объективный закон окружающего нас мира.

2. В этих условиях необходимо искать новые пути изучения и использования феномена сложности для дальнейшего приумножения добра и блага нашего общества.

3. Сложная система предполагает в своем составе наличие множества автономных элементов (агентов), способных к взаимодействию и достижению согласованных решений в интересах общего целого.

4. Показывается, что эффективная сложная система всегда находится на границе порядка и хаоса.

5. Предложены 7 ключевых критериев, позволяющих отличать и характеризовать поведение сложных систем.

6. Показана важная связь между ростом сложности и развитием информационного общества.

7. Обсуждается новый образ мышления, помогающий достижению успеха в мире растущей сложности.

## Список литературы

1. Prigogine, Ilya, "The End of Certainty: Time, Chaos and the new Laws of Nature". Free Press, 1997.

2. Prigogine, Ilya, "Is Future Given?" World Scientific Publishing Co., 2003.

3. Kaufman, S., "At Home In the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity". Oxford Press. 1995.

4. Holland, J. H., "Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity". Addison Wesley. 1995.

5. Holland, J., "Emergence: from Chaos to Order". Oxford University Press, 1998.

6. Schumacher, E. F., "Small is Beautiful: A Study of Economics as if People Mattered". Harper Collins, 1974.

7. Rzevski, G., "Investigating Current Social, Economic and Educational Issues using Framework and Tools of Complexity Science". Journal of the World University Forum, Volume 1, Number 2, 2008, pp. 75-84.

8. Rzevski, G., "A practical Methodology for Managing Complexity". Emergence: Complexity & Organization – An International Transdisciplinary Journal of Complex Social Systems. Volume 13, Nos. 1-2, 2011, pp. 38-56.

9. Beinhocker, Eric, "The Origin of Wealth: Evolution, Complexity and the Radical Remaking of Economics". Random House Business Books, 2007.

10. Rzevski, G., "Using Tools of Complexity Science to Diagnose the Current Financial Crisis". ISSN 8756-6990, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 210, Vol.46, No. 2.

11. Taleb, Nassim Nicholas, "The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable". Penguin Books, 2007.

12. Dekker, S., "Drift into Failure", Kindle edition, Amazon, 2012.
13. Kuhn, Thomas, "The Structure of Scientific Revolutions". Second Edition, Enlarged. The University of Chicago Press, 1970.
14. Drucker, P., "The Age of Discontinuity"
15. Rzevski, G, Skobelev, P, Batishchev, S, Orlov, A.: "A Framework for Multi-Agent Modelling of Virtual Organisations". In Camarinha-Matos, L M and Afsarmanesh, H (eds), Processes and foundations for Virtual Organisations, Kluwer Academic Publishers, 2003, pp. 253-260.
16. Anderson, Chris, "The Long Tail: How Endless Choice Is Creating Unlimited Demand", 2006.
17. Surowiecki, James, "The Wisdom of Crowds". Abacus, 2004
18. Lanham, Richard, "The Economy of Attention". The University of Chicago Press, 2007.
19. Rzevski G., Skobelev, P., Minakov, I., Volman, S., "Dynamic Pattern Discovery using Multi-Agent Technology". Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Telecommunications and Informatics (TELE\_INFO '07), Dallas, Texas, USA, March 22-24, 2007pp. 75-81.
20. Minakov, I., Rzevski, G., Skobelev, P., Volman, S., "Creating Contract Templates for Car Insurance Using Multi-Agent Based Text Understanding and Clustering". Lecture 150. Notes in Computer Science, Volume 4659, Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. Third International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2007, Regensburg, Germany, September 2007, Springer, pp. 361-371.
21. Rzevski, G., Skobelev, P., "Agent Based Semantic Web", Semantic Universe Website, 2009.
22. Hettige, B., Karunananda, A. S., Rzevski, G. "Multi Agent Framework for Development of Machine Translation Systems". 2013 8th International Conference on Science & Education ICCSE 2013. Colombo, Sri Lanka.

# ГЛАВА 2: Методология управления сложными адаптивными системами

## 2.1. Принцип адаптивности

Традиционные подходы к управлению не могут быть эффективно применимы к сложным адаптивным системам, характеризующимся высокой степенью неопределенности, поскольку принципы самоорганизации напрямую противостоят стремлению тотально контролировать каждый шаг в решении проблемы.

Мы также не можем устранить неопределенность, упрощая сложные ситуации, так как любое изменение в связях изменит результирующее поведение системы, возможно, очень существенным и самым непредсказуемым образом. Если же мы пытаемся применить к сложным ситуациям некие жесткие структуры, например, неповоротливую иерархическую организационную структуру или неадаптивный бизнес-процесс, то эти структуры, рано или поздно, будут разрушены или продемонстрируют свою ограниченность и крайне низкую эффективность.

Мы также не можем полагаться на сложные математические методы прогнозирования для предсказания будущего. Если будущее неопределенно, как мы можем его точно предсказать? Но так как события в сложных системах все же не случайны, мы можем найти некие шаблоны (образы), описывающие вероятностные модели поведения сложных адаптивных систем.

Мы не можем ожидать, что жесткое директивное планирование будет функционировать в условиях часто происходящих непредвиденных событий, нарушающих равновесия в системе – в таких условиях планы очень быстро перестают соответствовать действительности.

Для эффективного управления сложными адаптивными системами и максимального достижения на практике ожидаемых результатов предлагается принцип адаптивной перестройки решений и планов действий по событиям в реальном времени.

При этом лучший подход к адаптивному управлению, на наш взгляд, состоит в развитии способности к самоорганизации, которая обеспечивает наиболее гибкую перестройку и в каждой ситуации может помочь преодолеть или, по крайней мере, уменьшить последствия любых непредвиденных событий [1-4].

Как ни странно, этот общий подход касается как программных систем, так и любых организаций, от малого бизнеса – до крупных корпораций.

Рассмотрим более подробно предлагаемый подход к адаптивному управлению сложными системами.

## 2.2. Параметры управления сложностью

Управление рассматриваемыми системами предполагает процесс изменения определенных параметров, находящихся под нашим контролем, для достижения поставленных целей.

При этом особое значение имеет искусство управления параметрами сложности, которые позволяют уменьшать или увеличивать сложность системы, – в особенности когда цель не достигнута и требуется «затянуть пояса» или, напротив, «распустить пояса», чтобы дать больше свободы системе для поиска и согласования вариантов решения сложной проблемы.

*Методы управления сложностью особенно важны для тех, кто отвечает за результаты поведения сложных систем, например, для руководителей предприятий или представителей органов власти, которые регулируют финансовую и правовую деятельность, здравоохранение и образование, а также для менеджеров всех уровней,*

руководящих такими процессами, как, например, машиностроительное производство или транспортная логистика.

Экспериментируя с мультиагентными моделями сложных адаптивных систем, мы определили ключевые параметры сложности, а именно: уровень автономности агентов, степень связности и сила (прочность) связей между агентами, удовлетворенность и запас энергии агентов.

Определение этих источников сложности самоорганизующейся системы очень важно, так как позволяет нам *измерять* сложность и, в случае, когда мы можем повлиять на автономность, связность или силу связей или другие параметры агентов, предоставляет нам возможности эффективного управления сложностью.

Фактически, мы подходим к тому, чтобы выработать общие механизмы управления самоорганизующимися системами любой природы и добиться управляемой или, точнее, «направляемой» самоорганизации (guided self-organization), позволяющей даже в самых сложных ситуациях достигать поставленных целей.

## Уровень автономности агентов

Автономность агентов обозначает степень свободы в принятии решений, данную им в системе, чтобы решать, как поступать в той или иной ситуации.

На практике степень свободы агентов может определяться, в частности, тем, как широки и разнообразны возможности агента для построения, выбора, принятия и согласования вариантов решений и выработки встречных предложений.

Если у агента нет никакой свободы принятия решений, его автономность будем считать равной 0.

Если агент свободен в принятии решений, его автономность равняется 1.

В сложных адаптивных системах автономность агента ( $A$ ) всегда находится в диапазоне  $0 < A < 1$ .

*Чем выше автономность агентов, тем выше сложность системы.*

Отношение между связностью и автономностью агентов при постоянной силе связей показано на рисунке 2.1.

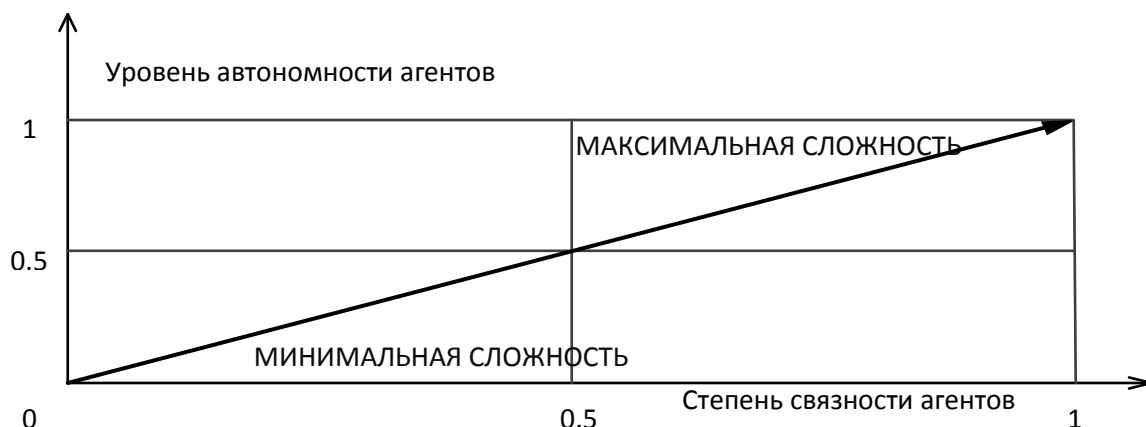


Рисунок 2.1. Зависимость сложности от автономности и связности агентов при постоянной прочности связей

Отношение между силой связей агентов и уровнем их автономности при постоянном уровне связности показано на рисунке 2.2.



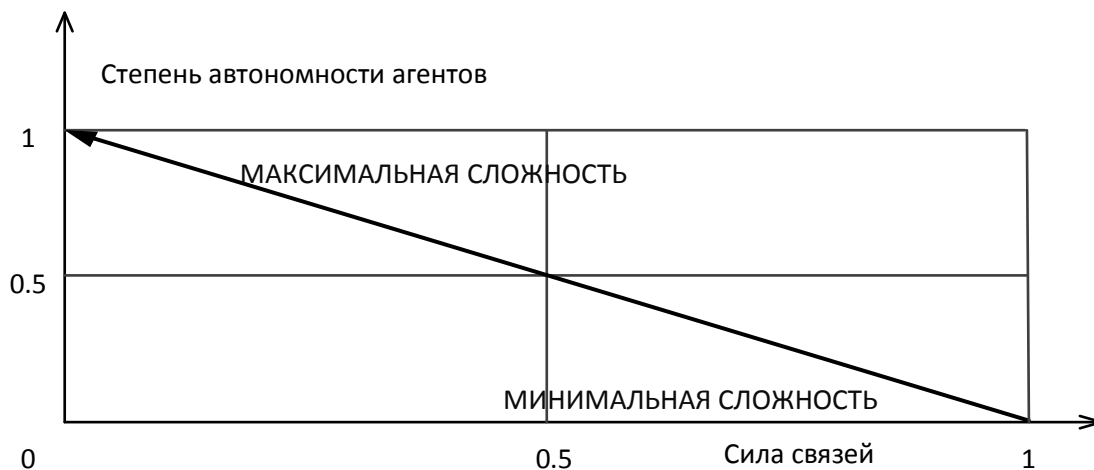


Рисунок 2.2. Зависимость сложности от степени автономности агентов и прочности их взаимосвязей при постоянной связности

Эксперименты с моделями сложных адаптивных систем показывают, что:

*Более высокие автономность и связность агентов при слабой силе связей, то есть более высокая сложность, способствуют продуктивности и творчеству (креативности) в системе, улучшают ее адаптивность и увеличивают скорость восстановления после критичных разрушающих событий, например, связанных с потерей ресурса.*

*С другой стороны, ограниченная автономность агентов, их менее высокая связность и более сильные связи, то есть, менее высокая сложность, обеспечивают больший порядок и дисциплину, повышают уровень предсказуемости, уменьшают вероятность ошибок и мошенничества, вероятность критичных событий, равно как и снижают продуктивность и креативность, адаптивность и устойчивость к сбоям.*

Рассмотрим теперь подробнее параметры связности и силы связи агентов.

### Степень связности агентов

Связность агентов обозначает, насколько регламентированы взаимодействия агентов между собой в системе.

Если агент не может быть связан ни с каким другим агентом, его степень связности равна 0. Если же агент может быть связан со всеми агентами в системе, то его связность равняется 1. В сложных адаптивных системах связность агента ( $C$ ) всегда находится в диапазоне  $0 < C < 1$ .

*Чем выше степень связности агентов, тем выше сложность системы.*

Например, в активно изучаемых сейчас грид-системах с переменной структурой каждый узел может иметь связи, например, с 2, 4, 8 или любым другим числом «соседей», что существенно влияет на скорость перераспределения задач по узлам и, в конечном счете, на качество и эффективность получения решения.

Пришедшая в любой узел новая задача будет выполнена этим же узлом или может оказаться перераспределена другим «соседям», имеющим меньшую загрузку, которая постоянно выравнивается.

Аналогичным образом может строиться перераспределение заказов на перевозку грузов между грузовиками, начиная с того места, где появился груз, а далее по принципу расширяющейся окружности.

Иными словами, в целях управления степень связности может гибко меняться в ходе вычислений, первоначально ограничивая выбор для агентов ближайшим окружением, но

постепенно расширяя локальную область взаимодействий, если хорошего решения не находится.

Фактически, это позволяет управлять качеством и скоростью решения задачи, усиливая или наоборот снижая возможности для самоорганизации в системе.

## Сила связей агентов

Сила (прочность) связей между агентами обозначает взаимную удовлетворенность агентов связью и способность агентов противостоять угрозе разрыва связей.

Иными словами, сила связей показывает, насколько подходят агенты друг другу или соответствуют их идеалам (и какова сила притяжения между ними), как это можно наблюдать между мальчиками и девочками или в любых других проявлениях ключевых отношений между противоположными сущностями (подобно инь и янь), обреченными на конкуренцию и кооперацию.

Если связь отсутствует, будем считать, что ее сила равна 0. Если связь идеальна для агента, то ее сила для агента равна 1. В сложных адаптивных системах сила ( $S$ ) связей агентов находится в диапазоне  $0 < S < 1$ . Более слабые связи легче разорвать и затем создать новые. Очевидно, что итоговая сила связи между двумя агентами может вычисляться как среднее от удовлетворенности связью каждым из них. При этом сохраняется неравновесность связей, в одну сторону связь может быть сильнее, чем в другую (один «любит» другого больше, чем он его, или наоборот).

Снижение силы связей увеличивает сложность, и, следовательно, непредсказуемость глобального поведения системы, поскольку также ведет к повышению возможностей (разнообразия) в выборе решений.

*Чем легче менять связи между агентами, тем сложнее система.*

Слабые связи, которые могут быть разорваны первыми, когда система самоорганизуется, чтобы приспособиться к событию, являются неотъемлемым атрибутом сложности.

Сильные связи сопротивляются самоорганизации, а очень сильные связи могут и вовсе не допустить самоорганизацию, формируя жесткий «порядок» в системе.

Например, в мире грузовых перевозок агент заказа может быть просто «влюблен» в конкретный грузовик, который везет его с минимально возможной в системе ценой, в силу того, что тот движется по прямой и почти полностью заполнен другими грузами, с которыми разделяет стоимость доставки. Следовательно, агент заказа не будет искать других вариантов «на стороне». И наоборот, какой-то из грузовиков может желать избавиться от груза, из-за которого он делает большой крюк и теряет прибыль, и тогда он будет постоянно искать возможность найти другой, более выгодный груз.

Следуя аналогии с термодинамикой можно заметить, что чем легче связи и, тем самым, гибче система, тем она ближе к состоянию хаоса и, наоборот, с ростом силы связи между агентами система приходит к состоянию более жесткого порядка.

## Удовлетворенность агентов

Еще один важный параметр управления сложностью связан с удовлетворенностью агентов, которая может рассматриваться как величина из диапазона  $[0,1]$  обратно пропорциональная разнице между текущим и идеальным значением по заданному агенту целевому критерию (качество обслуживания, себестоимость услуги и т.д.).

Обобщая на случай действия нескольких критериев, можно принять эту величину нормированной сверкой по заданным в текущей ситуации критериям.

Пусть каждый  $j$ -й заказ имеет несколько частных критериев  $x_i$ , например, стоимость, прибыль, опоздание, качество, и предполагаемые идеальные значения этих критериев  $x_{ij}^{id}$ . У каждого

агента заказа  $j$  тогда можно подсчитать оценочную функцию (ценность)  $f_{ij}(x_i - x_{ij}^{id})$  по компоненте  $i$ . Для каждого заказа определяется свертка оценочных функций с заданными весовыми коэффициентами  $\alpha_{ij} \geq 0$ .

Надлежащим выбором знаков и вида функций можно свести задачу каждого агента к задаче максимизации ценности  $y_j$  заказа  $j$ :

$$y_j = \sum_i \alpha_{ij} \cdot f_{ij}(x_i - x_{ij}^{id}),$$

где  $\forall j$  весовые коэффициенты нормируются:  $\sum_i \alpha_{ij} = 1$ .

Для всей мультиагентной системы аналогично может быть сформулирована задача нахождения значений частных критериев (состояний агентов заказов  $j$ ), максимизирующих суммарную ценность заказов:

$$y = \sum_j \beta_j \cdot y_j = \sum_j \beta_j \sum_i \alpha_{ij} \cdot f_{ij}(x_i - x_{ij}^{id}), \quad (1)$$

$$y^* = \max_{x_i}(y),$$

где  $\beta_j$  – вес заказа, позволяющий устанавливать и динамически менять приоритеты.

Аналогичное выражение можно получить для всех ресурсов системы и, в конечном счете, для системы в целом - суть этого выражения будет заключаться в том, что мультиагентная система призвана минимизировать разницы между идеальными и текущими значениями по заданным агентам критериям, т.е. находить консенсус (баланс) интересов всех участников решения сложной задачи.

При этом чем больше удовлетворены агенты – тем меньше можно прогнозировать изменений в системе и наоборот, чем дальше агенты от идеала, тем больше усилий им придется приложить к достижению целей, что напрямую будет влиять на стабильность решения и прогноз поведения системы.

С вводом критериев и удовлетворенности появляется возможность управлять целями агентов – указывая в качестве идеала направление, к которому должен стремиться агент, придавая по ситуации большую важность одному или меньшую важность другому критерию, измеряя успех на каждом шаге работы агента и премируя или штрафую агента за результат, а также точнее оценивать состояние агентов и системы в целом для прогнозирования ее поведения.

В этой связи наряду с удовлетворенностью вводятся штрафные-бонусные функции для агентов, показывающие насколько отклонение от заданного идеала или приближение к нему штрафуются и ли награждаются премией.

Премии и штрафы выражаются в виртуальной валюте, которую агенты накапливают на своих счетах при работе на виртуальном рынке.

Например, несрочный заказ на грузовую перевозку может быть вполне «счастливым», если он доставляется в срок, чуть раньше или даже с небольшим опозданием, как показано на рисунке 2.3 (график «а» слева).

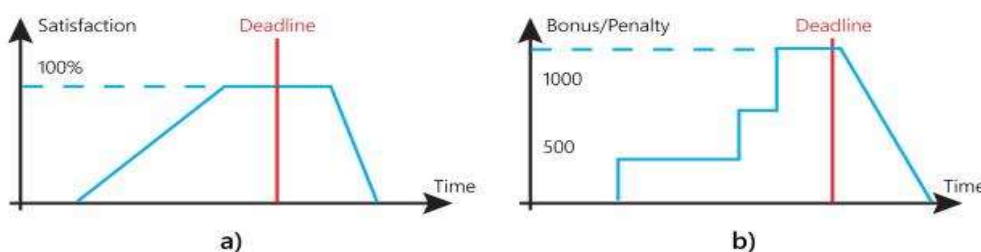


Рисунок 2.3. Функция удовлетворенности и функция бонусов/штрафов агента

Однако, за успешное выполнение этой работы агент сможет претендовать на бонус в виртуальных деньгах, представленный функцией бонусов и штрафов, представленной на рисунке 2.3 (график «б» справа).

Как показано на этом графике, далеко не все ранние приезды или опоздания будут максимально премироваться.

С учетом этих функций каждый агент может зарабатывать виртуальные деньги, которые может тратить на улучшение своего состояния и преобразования расписания в нужном ему направлении.

При этом новые заказы могут привносить с собой в систему и новые виртуальные деньги (например, при определенном курсе конвертации из реальных) или агенты могут иметь на персональных счетах начальные заданные значения денег.

Очевидно, что сложная система с неудовлетворенными агентами и большой запасенной энергией имеет все шансы даже при самом малом новом заказе перейти в совершенно новое состояние через долгий лавинообразный процесс полной перестройки расписания, и, наоборот, система с очень удовлетворенными агентами и низким уровнем энергетики вряд ли будет способна на радикальную перестройку.

С другой стороны, привнесение энергии в систему для некоторых агентов может помочь радикально улучшить ситуацию с тем или иным заказом или ресурсом причем точно (индивидуально), что можно интерпретировать как внутреннюю инвестицию в улучшение выбранного фрагмента расписания.

В результате, каждый агент может быть характеризован в системе уровнем удовлетворенности и уровнем своего «энергетического потенциала», который он уже потратил или еще может использовать для перестройки расписания.

Так, некоторые агенты могут «выходить из игры» только потому, что очень удовлетворены своими результатами (даже при наличии денежных средств), а другие потому, что не удовлетворены, но не имеют никаких средств для получения квантов активности или установления связей.

## Энергия агентов

Условные денежные средства, получаемые и используемые агентами на своих счетах на виртуальном рынке, играют роль потенциальной энергии, позволяя перестраивать «окружающее пространство» решения, например, формируемого расписания использования ресурсов.

Такие денежные средства агенты могут получать при входе в систему (например, агент заказа может получать процент от своей цены), зарабатывать от предоставляемых услуг (агент грузовика получит за перевозку грузов), получать в виде компенсаций за освобождение места в расписании для более важного заказа, наконец, получать в виде временных дотаций от системы в попытке улучшить те или иные показатели.

Расходы денежных средств могут идти как на оплату услуг, так и на налоги, собираемые на виртуальном рынке, например, на существование в системе, получение управления для поиска новых вариантов, передачи сообщений и проведение переговоров, заключение договоров, установление или разрыв связи и другие. При принятии решений каждый агент может оплачивать или их избегать, что приводит к оттоку денег из системы как аналогу некоторого трения.

В итоге, чем большими деньгами располагает агент – тем больше возможностей он получает для перестройки расписания в свою пользу.

Это означает, что наибольшие изменения в системе следует ожидать в первую очередь, от агентов, обладающих высокой энергией и являющихся не удовлетворенными – именно эти агенты, скорее всего, будут новыми точками роста в системе в ближайшее время.

Анализируя распределение энергии по структуре расписания можно точнее прогнозировать возможное поведение системы и сокращать или увеличивать сложность принимаемых решений.

## Аналогия с диссипативными структурами

Рассмотренные параметры показывают глубокую аналогию между создаваемыми системами и нелинейной термодинамикой И.Пригожина.

Решение любой сложной задачи, например, построение оптимального расписания, в этом контексте предполагает создание открытой, построенной на протоке энергии (аналог виртуальных денег) самоорганизующейся системы, обладающей нелинейным поведением и имеющую потери, например, в виде налогов на виртуальном рынке. Это представление соответствует понятию диссипативной структуры, в котором любое расписание, с множеством пронизывающих его связей между заказами и ресурсами, может интерпретироваться как «устойчивое неравновесие» или «неустойчивое равновесие» с точки зрения согласия агентов.

Наблюдая и оценивая общую картину формирования порядка или хаоса в системе, можно предсказать, какие участки могут быть более подвержены изменениям в случае возникновения определенных событий, и, при определенных условиях, даже направленно и точно инициировать (спровоцировать) нужные изменения.

**Из этого следует, что управление сложностью должно являться весьма тонким и деликатным процессом балансировки различных параметров сложности в целях достижения желаемого адаптивного поведения системы.**

Мы весьма ограничены в возможностях управления сложными физическими и химическими системами, которые подчиняются естественным законам, и некоторыми социальными системами (например, такими как брак и семья), которые регулируются социальными нормами и являются врожденной частью культуры нашего общества.

Но и социальные нормы развиваются, хотя мы и не знаем, как изменить их по нашему желанию.

Однако мы вместе определенно можем влиять на поведение социальных систем, государственных организаций и коммерческих компаний, которые управляются уставами, законами и нормами, бизнес-процессами и другими правилами.

Адаптивное поведение таких систем может оставаться в рамках определенных пределов равновесий (аттракторов) при условии, что заданные правила достаточно однозначны, чтобы предотвратить беспорядочное поведение, и все же достаточно гибки, чтобы позволить системе определенную свободу экспериментов при столкновении с новыми проблемами.

Наш опыт показывает [5], что: *лучшей стратегией адаптивного управления сложными системами будет ввод разнообразных правил поведения агентов, применяемых по ситуации – например, более строгих в случае, если система работает в обычном режиме, и менее - если требуется срочное восстановление системы после потери критического ресурса или найти возможность выполнения нового очень выгодного крупного заказа.*

Интересно заметить, что этот вывод прямо противоположен тому, к которому пришли лица, принимающие решения во время мирового кризиса в 2008 году.

Заметим, что любые правила сами по себе не могут предотвратить системную нелинейность, создающую непредсказуемые критические события. Для уменьшения значимости и снижения частоты критических событий мы должны регулировать автономность, связность агентов и силу связей между ними, а также ряд других параметров. И часто необходимо обеспечивать большую сложность одних частей системы в сравнении с другими. Чтобы достигать неравномерного распределения сложности, рекомендуется группировать агентов в области (регионы) с высокой внутренней связностью внутри каждой из них и низкой связностью между самими областями, как показано на рисунке 2.4.

Низкая связность между регионами гарантирует, что возмущения не смогут распространяться между всеми областями системы, в то время как высокая связность внутри областей обеспечивает их особо высокую внутреннюю адаптивность. Усиление прочности межрегиональных связей и ослабление прочности внутренних связей в областях также может быть полезным.

Например, перепроектируя таким образом сети финансовых услуг, мы могли бы препятствовать распространению нежелательных возмущений из одной области в другие, например, международного мошенничества с кредитными картами.

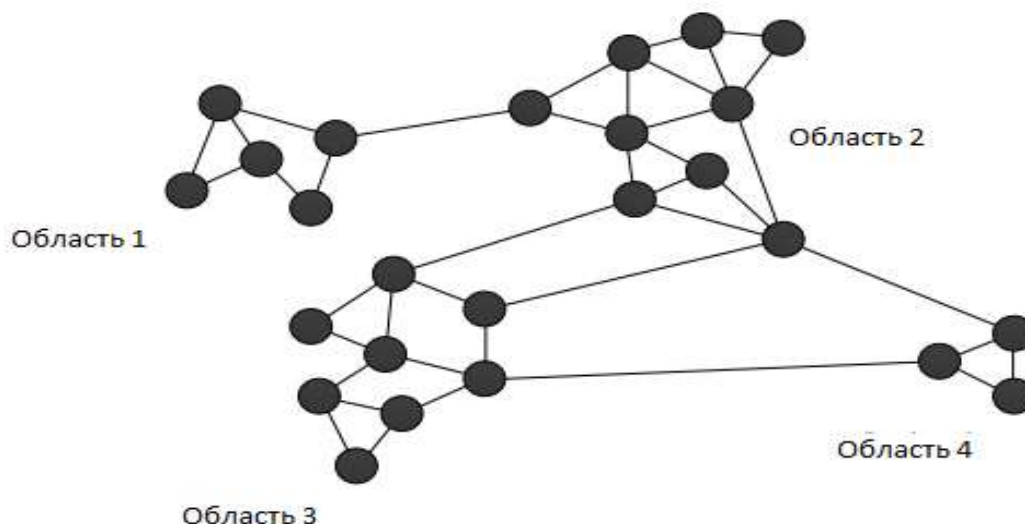


Рисунок 2.4. Разделение большой сети на регионы для предотвращения распространения последствий критических событий

Другой пример из области грузовых перевозок – более высокие платежи за возможность использовать грузовики из другого региона, что смогут себе позволить только самые выгодные заказы.

Существует мнение, что сложные адаптивные системы не могут быть спроектированы и могут возникать («вырастать») лишь эволюционно. Это мнение ошибочно, но проектирование сложных адаптивных систем существенно отличается от проектирования детерминированных систем. Ведь в итоге такого проектирования должна быть построена модель мира взаимодействующих «умных объектов» (программ) предметной области, способных принимать решения и взаимодействовать, отражающая ситуации и взаимодействия в реальном мире, а не один конкретный алгоритм или программу. Причем в идеале, в будущем, каждый такой мир должен быть открыт к вводу новых типов агентов без перепрограммирования системы.

Управление рассматриваемой внутрисистемной сложностью является важной частью проектирования сложных систем.

## 2.3. Моделирование сложных адаптивных систем

### 2.3.1. Требования к моделям сложных адаптивных систем

Существует ряд трудностей в моделировании сложных адаптивных систем, так как они часто не имеют четких границ, чувствительны к малейшим событиям, характеризуются недетерминированным поведением, неравновесием связей и другими нелинейными отношениями между агентами, способны к непрерывной самоорганизации.

Проектирование и моделирование сложных адаптивных систем в настоящее время скорее можно назвать более искусством, чем наукой.

Наш опыт в моделировании сложных систем для управления крупными предприятиями позволяет сформулировать два ключевых правила моделирования:

1. Модель должна обладать *необходимым уровнем детальности*. Например, если мы моделируем бизнес грузовых перевозок, будет достаточно создать агента на каждый заказ и каждый грузовик, но, если нам важны и решения по сервисному техобслуживанию грузовиков, то возможно будет необходимо создать агента на каждую станцию техобслуживания и каждый двигатель, шины и другие компоненты грузовика, что можно легко продолжить учетом смен работы водителей, необходимостью выбора мест заправок и т.д.

2. Модель должна обладать *необходимым уровнем адаптивности*. Модель системы должна быть такой сложной, чтобы обеспечивать возможность адаптироваться к изменениям, которые переживает моделируемая система, и такая адаптация должна быть автономной (без ожидания инструкций пользователя), что возможно, только в том случае, если сами модели достаточно сложны.

Действительно, если речь заходит об управлении флотилией грузовиков – каждый руководитель мечтал бы о наличии компьютерной модели, показывающей не только где находятся его грузовики в текущий момент (что уже легко видеть посредством датчиков GPS навигации), но и обозреть их планы и понимать, кто и где будет через несколько часов или дней, что собственно и позволяет прогнозировать в скользящем режиме все показатели бизнеса, включая прибыль по каждому грузовику и грузу, возможные точки потери эффективности и т.д.

Если же речь идет об управлении Международной космической станцией (МКС) – всем, конечно, хотелось бы наряду с летящей станцией, одновременно, видеть виртуальный полет ее земного «двойника», все состояния объектов и процессы в котором «зеркально» дублируются, что позволяет строить опережающие эксперименты с моделью, точнее прогнозировать и оценивать результаты и добиваться требуемого управления, что сейчас активно обсуждается в рамках вырабатываемой концепции кибер-физических систем.

Эти соображения приводят нас к заключению, что существующие моделирующие системы настоящего поколения (класса GPSS и другие) не могут использоваться для моделирования сложных адаптивных систем и ситуаций, так как они в принципе не являются сложными и адаптивными по своему устройству и не могут меняться самостоятельно, путем самоорганизации, что обычно требует привлечения разработчиков-программистов к самым малейшим изменениям в логике работы системы, что, в свою очередь, значительно удорожает эксплуатацию.

В настоящее время, как нам представляется, только мультиагентный подход может обеспечить действительную адаптивность и стать мощным инструментом моделирования сложных самоорганизующихся систем.

При этом диапазон применения таких систем является весьма широким.

Существует много примеров сложных адаптивных систем, компоненты которых могут быть смоделированы за счет построения достаточно сложной и детальной сетевой модели взаимодействий компонент более низкого уровня, к числу которых и относится большинство явлений из мира бизнеса, промышленности и транспорта, экономики и финансов, социальных и экологических проблем и проблем безопасности.

Итак, для моделирования сложных систем требуется строить модели, реализуемые как миры предметных областей для взаимодействия агентов. Как только построен такой мир, в той или иной степени адекватный реальному миру, с его помощью становится возможным моделировать сложные проблемные ситуации, имеющие место в реальном мире при различных состояниях окружающей среды.

Например, воссоздать поведение сети поставок в условиях изменчивого состояния спроса и предложения на рынке [6].

Сложность некоторых нерешенных проблем, таких как глобальное потепление, бедность или перенаселение, настолько высока, что мы, в лучшем случае, можем предложить построение

весьма упрощенной модели этих проблем с целью поиска их решений. Назовем такие проблемы *чрезвычайно сложными*. Стоит отметить, что несмотря на все трудности, чрезвычайно сложные проблемы все же могут быть успешно смоделированы – так, блестящая работа по моделированию роста народонаселения была проделана проф. С.Капицей [7].

Наше изучение критических ситуаций, которые привели к мировому финансовому кризису [1], также принадлежит к задачам этой категории. Было показано, что иногда банки, продававшие «токсичные» кредиты, на следующий день покупали их обратно, упакованными в несколько другой оболочке, что способствовало лавинообразному автокаталитическому нарастанию кризиса.

## 2.3.2. Пример моделирования грузоперевозок для оценки эффективности перехода к принятию решений в реальном времени

### 2.3.2.1. Постановка задачи

Покажем, как можно смоделировать адаптивный процесс распределения, планирования и оптимизации ресурсов в реальном времени.

Пусть имеется парк грузовиков из  $M$  машин, базирующихся в определенном городе в некоторой транспортной сети и имеющих GPS / ГЛОНАСС датчики на борту.

В реальном времени поступают заказы и любые другие события (новые заказы, задержки, поломки и т.д.), которые необходимо планировать, учитывая текущие планы, индивидуальные предпочтения и ограничения заказов и ресурсов (Рисунок 2.5).

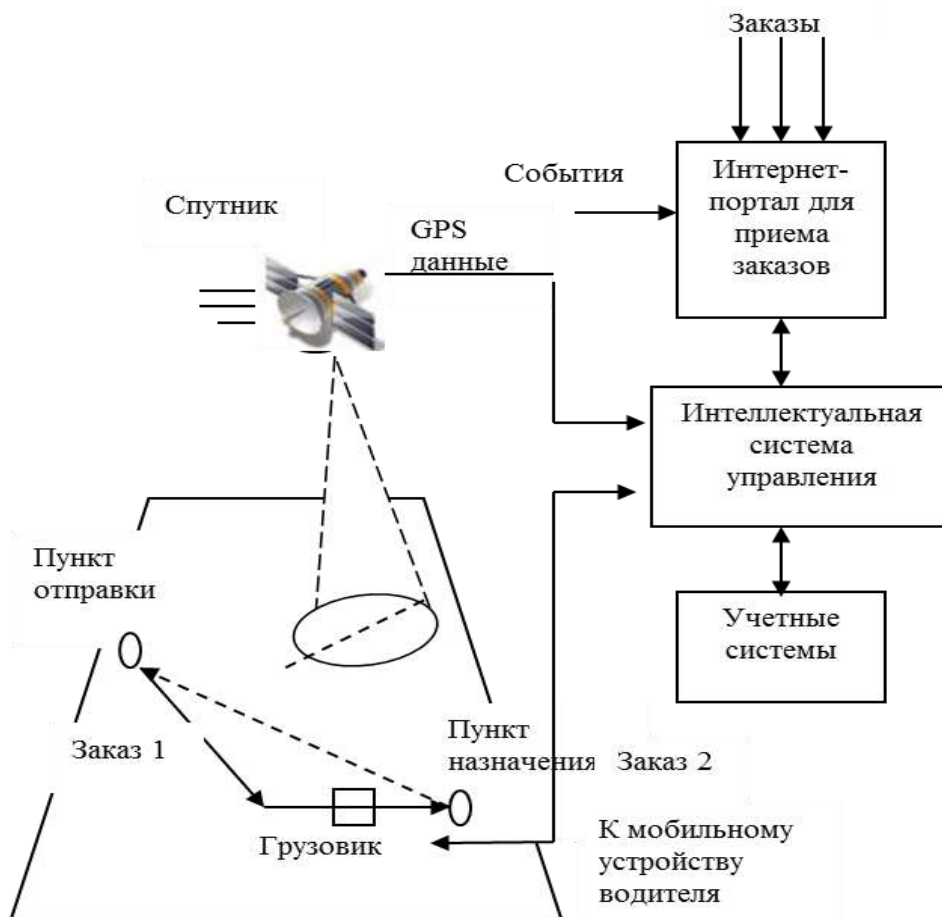


Рисунок 2.5. Общая схема управления грузоперевозками

Изменения должны вноситься в планы ресурсов без останова и перезапуска проектируемой интеллектуальной системы, путем адаптивного изменения расписания «на лету» с использованием как свободных окон, так и подвижками и переброской ранее распределенных заказов.

Должен быть реализован полный цикл управления:



- реакция на события,
- динамическое планирование (перепланирование),
- согласование и пересмотр планов «на лету»;
- мониторинг и контроль исполнения планов.

Согласование планов должно осуществляться через сотовый телефон в ходе диалога с водителями.

В случае расхождения плана и факта требуется автоматическое перепланирование и согласование с заказчиками, менеджерами и водителями.

Стоимость эксплуатации каждого грузовика известна и заранее задана.

Заказы характеризуются пунктом отправления, пунктом доставки, временем поступления, моментом начала (погрузки), моментом окончания (разгрузки), стоимостью и размером штрафа за опоздание.

Расстояния между всеми пунктами также известны и заданы матрицей расстояний.

Требуется адаптивно перестраивать план грузоперевозок по событиям в реальном времени и рассчитывать прибыль транспортной компании на любой момент времени. Планирование в реальном времени означает, что в каждый момент времени известны только те заказы, которые поступили до этого момента.

Необходимо исследовать зависимость прибыли от типовых стратегий планирования грузовых компаний, числа грузовиков и порядка поступлений событий.

Критерием оптимизации служит максимизация суммарной прибыли предприятия.

### 2.3.2.2. Модели организации грузовых перевозок

Исследуем решение поставленной задачи для четырех типовых моделей организации процесса грузоперевозок.

Общая прибыль системы подсчитывается как сумма прибылей всех агентов грузовиков

$$P = \sum_i P_i.$$

Обозначим через  $N_i$  набор всех заказов, выполненных грузовиком  $i$ .

Прибыль отдельного агента грузовика:

$$P_i = \sum_{j \in N_i} \{ (c_j - q_i) t_{ij} - q_i t'_{ij} \},$$

где суммирование выполняется по всем выполненным грузовиком  $i$  заказам  $j$ ,  $c_j$  – стоимость выполнения заказа  $j$  в единицу времени,  $q_i$  – стоимость переезда грузовика в единицу времени,  $t_{ij}$  – время выполнения заказа  $j$  грузовиком  $i$ ,  $t'_{ij}$  – время переезда для выполнения заказа  $j$ .

**Модель 1. Возвращение на базу.** Для каждого заказа индивидуально бронируется свой грузовик, в расписании которого на момент поступления заказа есть подходящее «окно». Если погрузка осуществляется в другом городе, то грузовик должен прибыть туда «холостым ходом» ко времени погрузки. Отмена бронирования грузовика под заказ не допускается. После выполнения заказа грузовик возвращается в пункт базирования.

**Модель 2. Челнок (Без возвращения на базу).** После выполнения заказа грузовик не возвращается на базу и остается в пункте назначения, где ожидает следующего заказа. При необходимости, компания может выслать замену водителю другим транспортом к нужному месту, но пока данный процесс не рассматривается.

**Модель 3. Опоздание со штрафами без перебронирования.** Допускается планирование заказов с опозданиями, когда фактический момент начала выполнения заказа позже требуемого заказчиком. Из прибыли вычитается штраф, пропорциональный времени опоздания. Если штраф превышает возможную прибыль от выполнения заказа, то такой заказ не планируется. После выполнения заказа грузовик остается в пункте назначения. Штрафы учитываются следующим образом:

$$P_i(t) = \sum_j \{ (c_j - q_i) t_{ij} - q_i t'_{ij} \} + \sum_k \{ (c_k - q_k) t_{ik} - q_i t''_{ik} - p_k t''_{ik} \},$$

где суммирование по индексу  $j$  идет по всем выполненным в срок грузовиком  $i$  заказам, суммирование по индексу  $k$  идет по всем выполненным с опозданием  $t''_{ik}$  заказам,  $p_k$  – штраф

на единицу времени опоздания. Этот вариант вносит определенную большую свободу, но еще не является адаптивным, в котором планы меняются «на лету».

**Модель 4. Адаптивное планирование со штрафами.** Совпадает с предыдущей, однако допускается перебронирование грузовика под новый заказ в случае, если прибыль от нового заказа превышает прибыль от прежде запланированного. Таким образом, при поступлении заказа перераспределяются уже размещенные заказы, и ищется новое, более выгодное по прибыли, решение по группе грузовиков, затрагиваемых изменениями.

#### 2.3.2.3. Краткое описание модели работы грузоперевозок

Предположим, что с каждым грузовиком связан свой менеджер грузовика, а с каждым заказом – менеджер заказа, которые могут отправлять и получать сообщения и принимать решения согласно своей логике и текущей ситуации, которая определяется состоянием каждого участника. В целях наглядности результатов и унификации логики принят единый пространственно-временной масштаб: время отсчитывается от начала моделирования, т. е. от момента поступления первого заказа. Верхняя граница диапазона задается горизонтом планирования в днях. Расстояния приведены к временной шкале делением расстояния на среднюю скорость. Таким образом, может быть учтено состояние и пропускная способность дорог. Поэтому более длинный пространственный путь может быть по времени короче из-за большей скорости движения.

Текущие состояния заказов и ресурсов изменяются и фиксируются в моменты поступления заказов в систему, в моменты начала и окончания их выполнения, поэтому шкала отсчетов времени в общем случае  $N$  заказов состоит из  $3N$  точек.

При поступлении нового заказа рассылается запрос на его размещение всем менеджерам грузовиков, которые анализируют свое текущее состояние, наличие окон в будущем расписании, необходимость дополнительного переезда до пункта погрузки, оценивают свою возможную прибыль и отправляют ответ менеджеру заказа. Кандидаты на перепланирование (в случае возрастания прибыли) выстраиваются в специальной таблице по максимально возможной прибыли. Заказ получает тот грузовик, который дает максимальную прибыль. Прибыль учитывается как разница между стоимостью заказа и стоимостью транспортировки. Если для выполнения заказа требовался переезд, то его стоимость вычитается из стоимости заказа. Поэтому дорогие заказы, требующие длительных переездов до начала выполнения, могут быть вытеснены более дешевыми, но без дополнительных переездов. В случае стратегии с планированием заказов с опозданиями анализируется влияние штрафа на прибыль. Поскольку штраф пропорционален времени задержки, то заказы с большим опозданием не будут планироваться.

Заказы, находящиеся в прошлом (по отношению к текущему времени), в переговорах (отправке и приёме сообщений) не участвуют.

Такой процесс продолжается с течением времени по событиям прихода, начала и окончания заказа, тем самым имитируется поступление заказов в реальном времени.

В результате моделирования по каждой из четырех моделей путем взаимодействия агентов происходит самоорганизация менеджеров «заказы – грузовики», организуется расписание для каждого грузовика и создается общий план, реализующийся участниками по мере течения времени.

Для оценки результата процесса самоорганизации вычисляется суммарная прибыль, получаемая от всех грузовиков.

### 2.3.2.5. Примеры моделирования

Рассмотрим модельный пример расчета прибыли при адаптивном планировании перевозок в реальном времени одним грузовиком.

**Описание задачи.** Имеются 4 города (пункта), расстояния между которыми задано матрицей (таблица 2.1) в днях пути. Время в пути не обязательно соответствует расстоянию, поскольку качество дорог разное и скорости движения по ним могут быть разными.

В начальный момент времени грузовик расположен в пункте 1.

Таблица 2.1. Матрица расстояний между пунктами

–	Пункт 1	Пункт 2	Пункт 3	Пункт 4
Пункт 1	0	1	1	2
Пункт 2	1	0	2	1
Пункт 3	1	2	0	1
Пункт 4	2	1	1	0

В различные моменты времени случайным образом поступают заказы № 1 – 5 на перевозку грузов в разные пункты. Длительность выполнения заказов 1 – 2 дня. Горизонт планирования  $t = 10$  дней. Стоимость выполнения заказа по тарифу компании постоянна и равна  $c = 3$  у. е. / день, т. е. если длительность выполнения заказа 2 дня, то доход от его выполнения составит 6 у. е. Если грузовик простаивает, то каждый день простоя приводит к затратам в  $q_a = 0,3$  у. е. Каждый день движения при перегоне пустого грузовика или при выполнении заказа приносит затраты  $q = 1$ . Разрешается выполнять заказы с опозданием, за каждый день опоздания взимается штраф в размере  $pp = 0,6$  у. е. Некоторые заказы при этом сдвигаются вправо по оси времени.

Требуется планировать перевозки по мере поступления заказов (о заказах заранее ничего неизвестно) и определять прибыль.

**Заказы** описываются номером в порядке поступления, датой поступления (моментом времени  $t$ ), моментами начала и окончания выполнения, длительностью (в днях), начальным и конечным пунктами (таблица 2.2).

Таблица 2.2. Характеристики заказов

Характеристика	Номер заказа				
	1	2	3	4	5
Время поступления	1	3	5	6	7

Время начала	3	4	7	8	9
Время окончания	5	5	9	9	<sup>1</sup> <sub>0</sub>
Откуда	4	3	1	4	3
Куда	1	1	4	3	1

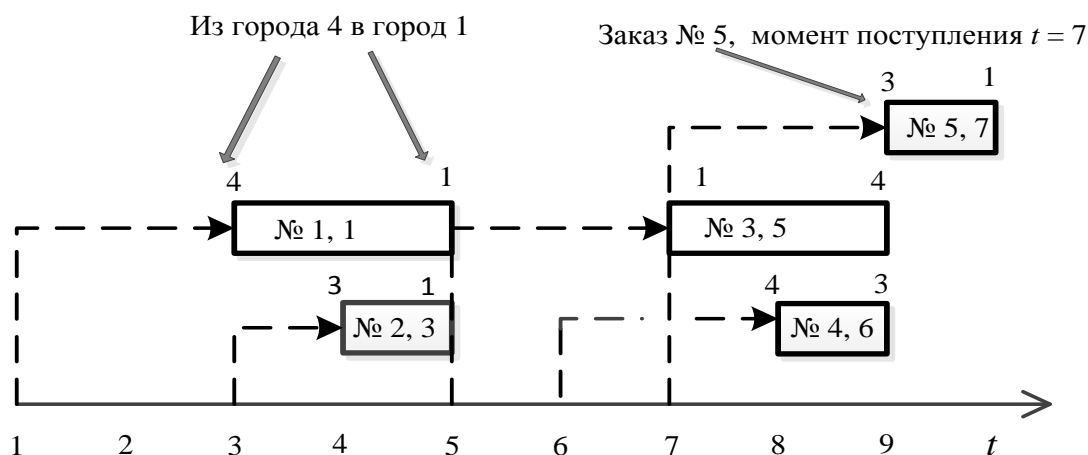


Рисунок 2.6. Диаграмма поступления заказов

На рисунке 2.6 заказы представлены прямоугольниками, внутри каждого из них указаны номер заказа и через запятую момент его поступления, сверху прямоугольника указано «откуда – куда». Начало и конец каждого прямоугольника соответствуют моментам начала и окончания выполнения.

Подсчитаем прибыль грузовика 1 в модели 3 с учетом штрафов. Будем вычислять прибыль  $v$  в моменты изменения состояния грузовика.

**Расчет прибыли. Шаг 1.** Выполнение заказа № 1 потребует выезда в момент  $t = 1$  из пункта 1 в пункт 4 и займет 2 дня до момента  $t = 3$ . На момент  $t = 3$  прибыль  $P = -q \cdot 2 = -2$ . Будем показывать изменение прибыли  $P$  в реальном времени (Рисунок 2.7).

**Шаг 2.** Движение с грузом из пункта 4 в пункт 1 займет 2 дня и к моменту  $t = 5$  грузовик окажется в пункте 1 с прибылью  $P = -2 + (c - q) \cdot 2 = -2 + 2 \cdot 2 = 2$ .

Предположим, что агент грузовика оценивает варианты исполнения последующего плана по прибытии в пункт 1 в момент  $t = 5$ . Его прибыль к этому моменту  $v = 2$ . К этому времени в момент  $t = 3$  поступил заказ № 2. Есть два варианта его исполнения:

- заказ № 2 выполняется с опозданием;
- не брать заказ № 2, оплачивая простой, а потом взять заказ № 3 из того же пункта 1; поскольку заказ № 2 можно выполнить с опозданием до начала выполнения заказа № 3, то другие варианты рассматривать не требуется. Рассмотрим эти варианты подробнее.

**Шаг 3.** Нужно доехать из пункта 1 в пункт 3 (1 день) и выполнить заказ № 2 переездом из пункта 3 в пункт 1 (1 день). Искомый прирост прибыли  $dP = -1 \cdot q + (c - q) \cdot 1 = -1 + 2 = 1$ . Штраф за опоздание  $-pp \cdot 2 = -2 \cdot 0,6 = -1,2$ . Итого, к моменту  $t = 7$  грузовик окажется в пункте 1 с прибылью  $P = 2 + 1 - 1,2 = 1,8$ . Кажется бы, выполнение этого заказа невыгодно, но нужно учесть, что при его невыполнении грузовик простаивает 2 дня и к моменту  $t = 7$  прибыль  $P = 2 - 2 \cdot 0,3 = 1,4$ .

**Шаг 4.** Поэтому грузовику выгодно выполнить с опозданием заказ № 2, выполнить заказ № 3,  $t = 7 \dots 9$ , (из пункта 1 в пункт 4) 2 дня, прибыль  $P = 1,8 + 2 \cdot (c - q) = 1,8 + 2 \cdot 2 = 5,8$  и грузовик переезжает в пункт 4.

**Шаг 5.** К моменту  $t = 9$  есть новый заказ № 5 в пункте 3 с началом выполнения  $t = 9$ , переезд до него равен 1 дню, что сдвигает заказ за горизонт 10. Поэтому грузовик отказывается от него. Имеется также просроченный заказ № 4 из пункта 4 в пункт 3, начало его выполнения должно быть в момент  $t = 8$ . Грузовик оценивает прибыль от возможного смещения выполнения на 1 день.

**Шаг 6.** Выполнение заказа № 4, переезд не требуется,  $dP = (3 - 1) \cdot 1 = 2 -$  штраф  $0,6 = 1,4$ . Если бы не было этого выполнения, то грузовик стоял бы 1 день до горизонта и тогда  $dP = -1 \cdot 0,3 = -0,3$ . Поэтому грузовику выгодно согласиться.

**Итог:** выполняются заказы № 1 и 3 без опоздания, заказ № 2 с задержкой на 2 дня и заказ № 4 с задержкой 1 день. Заказ 5 не выполняется (Рисунок 2.8).

Полная прибыль за 10 дней  $P = 5,8 + 1,4 = 7,2$ .

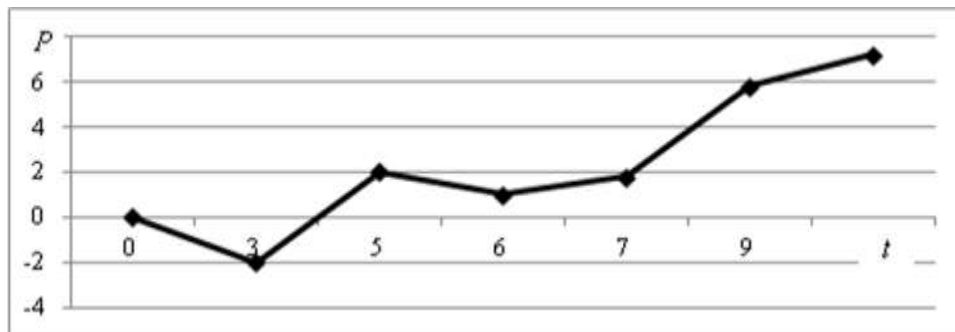


Рисунок 2.7. Прибыль грузовика в зависимости от времени

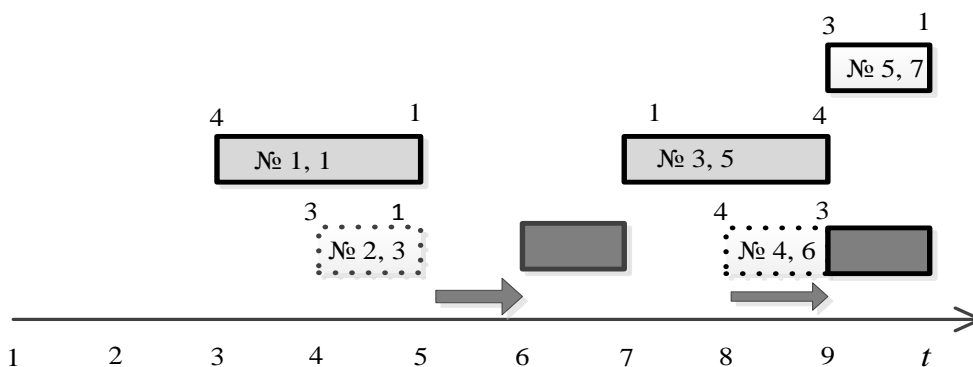


Рисунок 2.8. Диаграмма выполнения адаптивного плана одним грузовиком:

темным показаны отсроченные заказы, которые выполняются со штрафами;  
 светло-серым выделены заказы, выполняющиеся без опоздания;  
 сдвиги показаны широкими стрелками; сдвигаемые заказы показаны точками;  
 белым показан невыполненный заказ

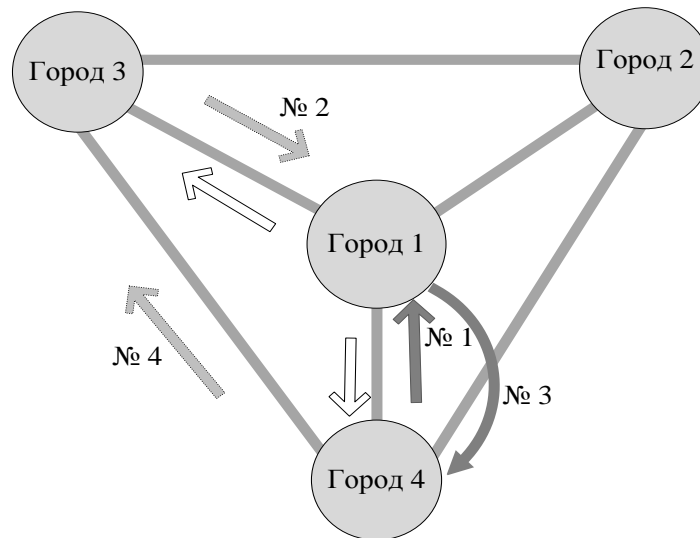


Рисунок 2.9. Схема выполнения заказов грузовиком в модели 3:

белыми стрелками показаны переезды; светло-серыми с пунктирной границей – выполнение заказов с опозданием; темно-серыми – выполнение заказов в срок.

Итоговое движение грузовика показано на рисунке 2.9. Сначала грузовик выезжает из города 1 в город 4. Затем выполняет заказ № 1 из города 4 в город 1 без опоздания. Потом перемещается в город 3 для выполнения заказа № 2. Затем выполняет с опозданием заказ № 2. После этого он из города 1 выполняет заказ № 3 в город 4 без опоздания. Затем с опозданием выполняет заказ № 4. Заказ № 5 остается невыполненным, поскольку выходит за горизонт ( $t = 10$ ).

В качестве более масштабного примера рассматривалась задача планирования выполнения 100 заказов на 10-ти одинаковых грузовиках. Заказы генерировались с равномерным распределением даты поступления и равномерным распределением по пунктам (городам). Дата начала выполнения также равномерна, но в интервале от времени поступления до горизонта планирования. Поэтому концентрация заказов возрастает к концу интервала моделирования. Грузовики первоначально располагаются в одном пункте. Заказы равномерно распределены по 18 пунктам. Расстояния между пунктами от 1 до 6. Горизонт планирования был равен 100 дням.

#### 2.3.2.6. Результаты моделирования

С помощью разработанной схемы расчетов были получены расписания выполнения грузовиками заказов для различных моделей организации перевозок.

В качестве примера на рисунках 2.10 и 2.11 приведены расписания (диаграммы Ганта) грузовика в моделях 1 и 4.

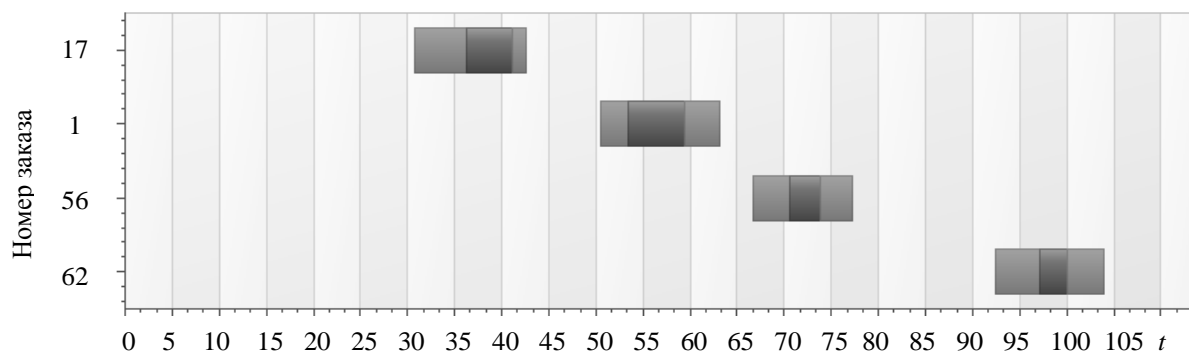


Рисунок 2.10. Расписание грузовика в модели 1 (с возвращением на базу)

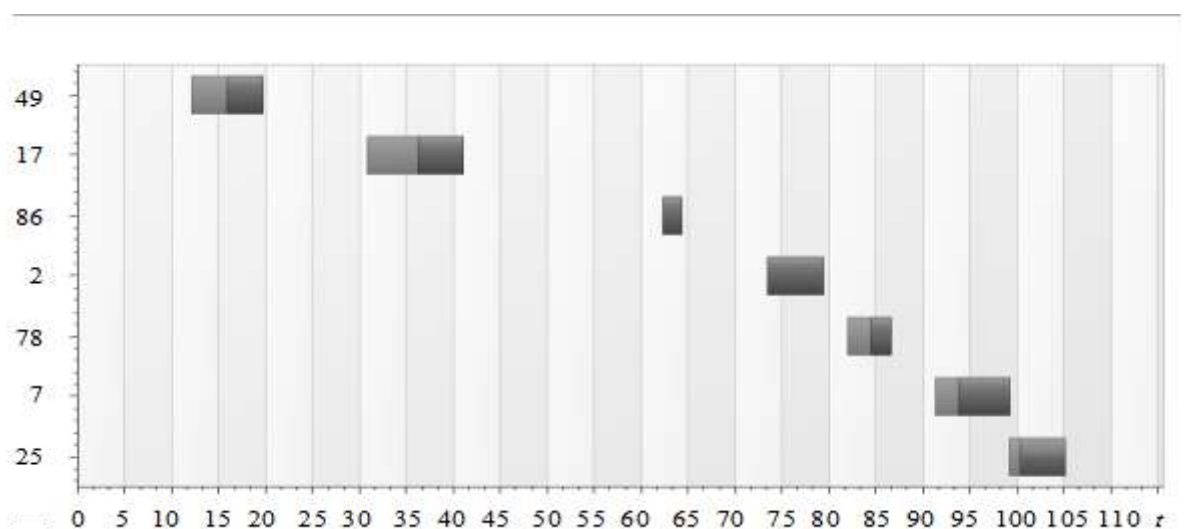


Рисунок 2.11. Расписание грузовика в модели 4 (с адаптивным перепланированием и штрафами)

По горизонтальной оси отложено время в днях, по вертикальной – номера заказов. Исполненные заказы показаны темным цветом. Более светлые прямоугольники до заказа соответствуют процессу переездов грузовика в пункт погрузки. Такие же прямоугольники обозначают возвращение грузовика в пункт базирования по модели 1. Темные прямоугольники на рисунке 2.11 показывает заказ, выполненный с задержкой и штрафом.

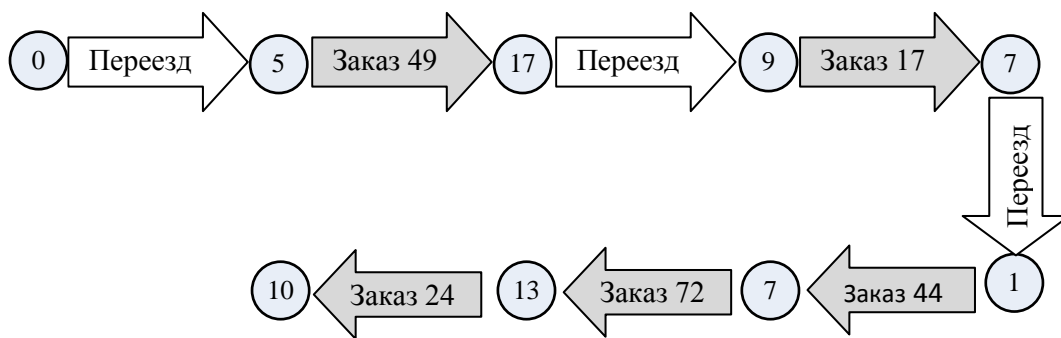


Рисунок 2.12. Пример маршрута грузовика в модели 3 без перепланирования

Пример маршрута грузовика в модели 3 приведен на рисунке 2.12; номера пунктов (городов) даны в кружочках. При переходе на модель 4 маршрут грузовика изменяется (Рисунок 2.13).

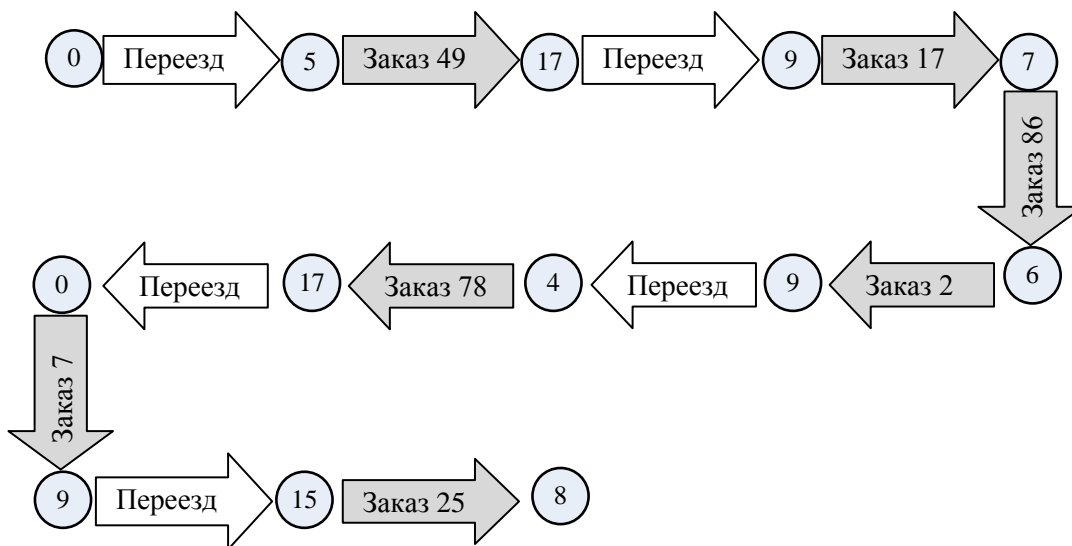


Рисунок 2.13. Маршрут грузовика в модели 4 (с адаптивным перепланированием и штрафами), соответствующий диаграмме Ганта (см. выше)



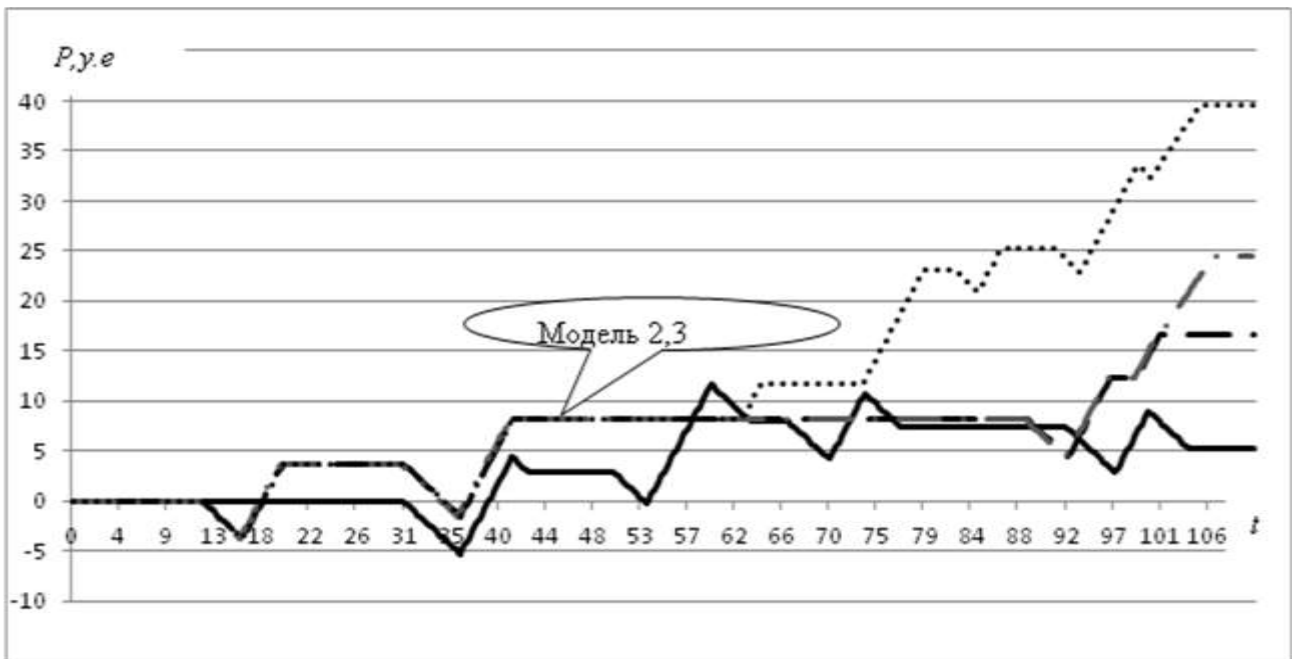


Рисунок 2.14. Графики динамики прибыли грузовика в зависимости от модели организации грузоперевозок:

- модель 1; - - - модель 2;
- · - модель 3; ······· модель 4

Получены также графики динамики прибыли каждого грузовика в зависимости от времени. На рисунке 2.14 представлены примеры графиков динамики прибыли грузовика в моделях 1 – 4. Они соответствуют расписаниям грузовика, представленных диаграммами Ганта. Прямые горизонтальные участки соответствуют стоянке грузовика, отрезки с положительным наклоном означают рост прибыли при выполнении заказа, отрезки с отрицательным наклоном показывают затраты по перегону грузовика в пункт погрузки или возвращение в пункт базирования в модели 1.

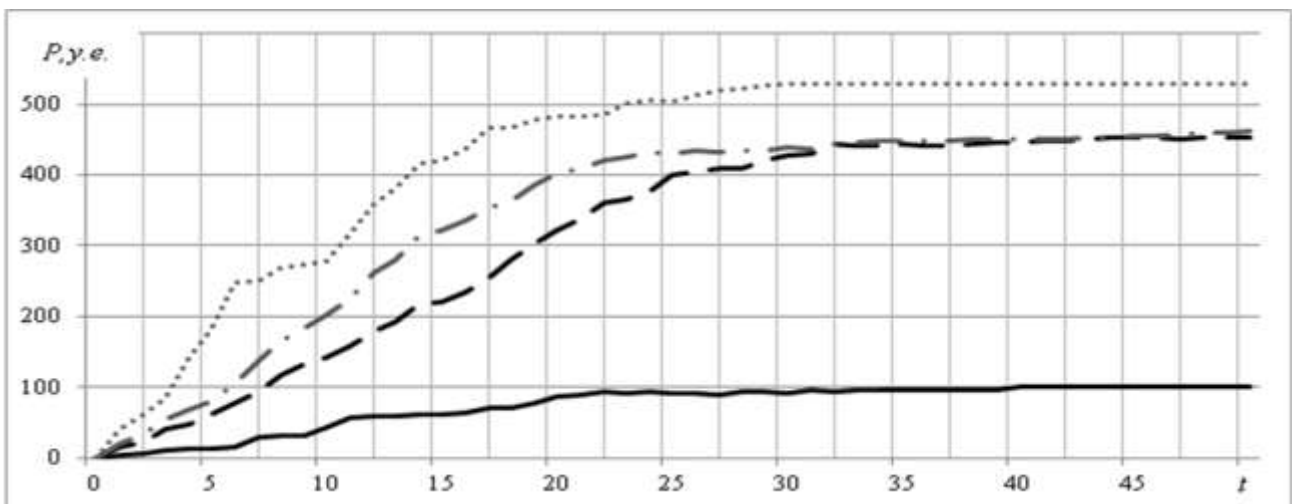


Рисунок 2.15. Зависимость прибыли от числа используемых грузовиков в различных моделях организации грузоперевозок:

- модель 1; - - - модель 2;
- · - модель 3; ······· модель 4

Каждый график (Рисунок 2.15) состоит из двух характерных участков – начального возрастающего, на котором прибыль растет с увеличением числа грузовиков, и конечного – режима насыщения, когда все заказы, которые можно было выполнить, уже выполнены.

Режимы насыщения отличаются для разных моделей. Наименьшая прибыль в модели 1 с возвратом – поскольку планируется меньшее число заказов и при возврате в пункт базирования происходят дополнительные затраты. Модель 3 без возврата и с планированием опоздавших заявок значительно превосходит модель 2 без возврата на начальном участке, поскольку на одно и то же число грузовиков планируется больше заказов. В режиме насыщения она даёт мало преимуществ по сравнению с моделью 2, потому что при большом числе грузовиков мало заказов, выполняемых с опозданием, и модели 2 и 3 будут совпадать.

Наилучшей является адаптивная модель планирования 4, которая даёт примерно на 20 % большую прибыль, чем модели 2 и 3. При выполнении плана она позволяет обойтись существенно меньшим числом грузовиков. Это объясняется улучшением текущего расписания каждого грузовика в результате согласования решений.

Таким образом, в численных экспериментах было показано, что адаптивный подход позволяет более эффективно строить расписания грузоперевозок в реальном времени и значительно увеличивать суммарную прибыль транспортной компании благодаря адаптивной корректировке планов и индивидуального подхода к планированию каждого заказа и ресурса в реальном времени [8-10].

### 2.3.3. Развитие способности к адаптации

В первой главе было показано, что сложность мира, в котором мы живем и работаем, продолжает расти, что видимо будет происходить и в будущем.

Мы утверждаем, что для организаций и людей, которые хотят выжить и преуспеть в сложных условиях, важно становится более адаптивными.

Как показывает приведенный выше пример с грузоперевозками, способность к адаптации «на лету» в реальном времени позволяет на 25-40% повышать эффективность использования ресурсов.

Можно перефразировать это утверждение, сказав, что адаптивность - ключевой фактор успеха для всех, кто действует на мировом рынке, который характеризуется частым возникновением непредсказуемых событий.

Все задачи управления, обсуждаемые далее в этой книге, сведены к *адаптивному распределению возможностей (ресурсов) по потребностям (заказам)*, поскольку это один из наиболее трудно решаемых вопросов в условиях растущей сложности жизни.

Мы условно разделили ресурсы на следующие классы:

- человеческие или кадровые (водители и рабочие, пилоты авиалиний, инженеры по эксплуатации, страховые эксперты и др.);
- физические (машины, станки, транспорт, склады, заводы, здания, земля и др.);
- финансовые (оборотный капитал, инвестиции, кредиты и др.);
- информационные (понятия, кластеры данных, образы, обнаруженные на изображении, слова текста и др.).

Существующие автоматизированные системы планирования ресурсов предприятия (класса ERP - Enterprise Resource Planning), которые были разработаны для предприятий, функционирующих в условиях индустриальной экономики, характеризующейся стабильным рынком, как правило, работают в режиме пакетной обработки данных. Этот режим был вполне

уместен, когда экономия на масштабе была ключевым критическим фактором успеха. Но такие планировщики и оптимизаторы оказываются не в состоянии справиться с динамикой современных предприятий, поскольку разработаны таким образом, что каждый раз при обнаружении событий изменений в ситуации должны начинать планирование с самого начала и комбинаторный перебор требует продолжительного времени на поиск оптимального решения, которое однако может устареть прежде, чем будет найдено.

Такие системы становятся трудно применимыми на практике для управления в реальном времени, когда «на лету» меняются как заказы, так и ресурсы системы.

Кроме того, эти системы управляют человеческими, материальными и финансовыми ресурсами по текущим данным, без какого-либо использования знаний, которые могут составлять еще один класс ресурсов нового типа и могут быть эффективно использованы для принятия решений в случае различных непредвиденных ситуаций. Например, для того, чтобы агент заказа мог найти другой цех, который может выполнить заказ, не по жесткой инструкции, а анализируя умения рабочих в сцене мира фабрики, или чтобы была возможность внести непредвиденные раньше признаки новой проблемной ситуации, ведущей к браку.

Вместе с тем, такие ERP системы все еще остаются важным компонентом программного обеспечения любого современного предприятия, несмотря на то, что условия рынка изменились до неузнаваемости.

*Мы утверждаем, что для предприятий, работающих на современном мировом рынке, распределение, планирование и оптимизация ресурсов должны быть адаптивными и учитывать знания наравне с прочими ресурсами.*

Речь идет фактически о создании нового класса интеллектуальных систем адаптивного управления ресурсами предприятий на основе мультиагентных технологий.

Покажем требования к системам рассматриваемого нового класса.

## 2.4. Что нужно делать, чтобы быть адаптивным?

Основываясь на нашем опыте разработки адаптивных систем управления ресурсами для предприятий и организаций, мы выделили семь их главных требований, значимость которых, по нашему мнению, будет нарастать в ближайшем будущем:

### 1. Принятие решений в реальном времени

Принятие решений о том, какие действия следует предпринимать при наступлении очередного события, должно происходить в режиме реального времени, так как качество и эффективность решений во многом зависят от момента времени, ведь «чуть зазевался – и поезд ушел».

Однако сложность такого рода решений состоит в том, что в условиях ограниченности ресурсов данный процесс может включать в себя болезненный пересмотр ранее согласованных и принятых решений по распределению возможностей по потребностям.

Иными словами, требуется выявление конфликтов и поиск согласованных решений (консенсуса) между агентами системами, имеющими многочисленные индивидуальные предпочтения и ограничения, причем в реальном времени.

Отчет, поданный в пятницу, может уже не работать, так как решения надо было принимать во вторник и время могло быть уже упущено, что могло привести к образовавшемуся дефициту или излишкам и простою дорогих ресурсов.

Следует понимать, что при этом совершенно не требуется каждую секунду пересматривать принятые ранее решения и можно даже накапливать события в специальной очереди – но важно видеть, какие события приходят, и самые важные из них должны сразу запускаться в обработку и менять планы, поддерживая событийную диспетчеризацию, либо использоваться для опережающего моделирования и прогнозирования последствий событий.

Как в любой банковской системе, на каждом предприятии должен ежедневно сводиться баланс плана и факта выполненных работ, показывающий, насколько отстает предприятие от принятых планов работы или, наоборот, идет с опережением, какие ресурсы перегружены, а где есть значительный простой, какие есть узкие места на рассматриваемом горизонте планирования и т.д.

Вместе с тем, для многих существующих предприятий жизненный цикл планирования составляет около 1 месяца, что поддерживает низкую эффективность работы.

В этом случае событие прихода материала для важного заказа во второй день месяца или в последний не играет никакого значения, так как не повлияет на планы, обрекая материал и вложенные в него деньги на «замораживание и пролеживание», хотя на предприятии могли быть все условия, чтобы раньше выполнить важный заказ.

Это и позволяет оценить выигрыш от перехода предприятий к реальному времени.

## 2. Максимальная отсрочка в реализации решений

После того как было принято решение о реакции на событие, реализация найденного решения (отправка нового расписания агентам) может быть задержана на максимально допустимое в сложившейся ситуации время для того, чтобы дать возможность прийти новым событиям и еще пересмотреть расписание для улучшения показателей бизнеса.

Например, можно заранее забронировать грузовик и держать его в гараже для важного заказа, чтобы не опоздать к точке погрузки ни при каких условиях, а можно продолжать использовать машины, пока они остаются в зоне досягаемости и могут быть в любую минуту быстро отзываны от других заказов.

Очевидно, что выигрыш имеет вторая система – что не исключает и резервирования машины при определенных условиях, когда стоимость возможных штрафов от опоздания превзойдет возможную прибыль.

Это еще один пример динамически формируемого граничного условия, которое меняет поведение системы в некоторый момент времени.

## 3. Проактивная коммуникация с пользователями

Мы привыкли, что все наши системы пассивны и лишь обрабатывают наши задания.

Рассматриваемые системы должны обладать способностью к проактивной работе по улучшению своего состояния в непрерывном взаимодействии со средой и другими системами.

Например, возможна проактивная коммуникация с пользователем для обращения за корректировкой заданных ограничений, когда ожидаемый результат невозможно достигнуть. Например, адаптивная система для планирования рабочих в цеху машиностроительного предприятия должна просить разрешения вывести группу рабочих на сверхурочные работы, если не удастся выполнить план в заданный срок. При этом стоимость сверхурочных должна быть, конечно, меньше того запаса прибыли, что приносит рассматриваемый заказ.

Другой пример: если грузовая машина забронирована под заказ клиента, а заказ до сих пор не поступил – следует выйти на менеджера, чтобы уточнить, не забыл ли тот направить заказ.

В этих случаях значительное расхождение плана и факта (в том числе, по моделируемому прогнозу) должно побуждать систему к действиям, направленным на разрешение проблемной ситуации.

## 4. Поддержка командной работы

Находящиеся в системе агенты распределяют возможности по потребностям, например, назначая задачи менеджерам или рабочим, с помощью процесса переговоров, выявляющего и решающего конфликты и помогающего находить согласие между агентами, представляющими разные факторы сложности.

Такой подход (в противопоставление управлению «сверху вниз») гарантирует, что требования, ограничения и предпочтения всех участников учитываются, даже если они конфликтуют друг с другом. Финальное решение принимается агентами коллегиально при нахождении консенсуса и основано на контролируемых компромиссах для урегулирования конфликтов.

Степень эластичности по каждому критерию должна быть управляемой пользователями и в будущем зависеть от ситуации, для того чтобы позволить сложной системе саморегулироваться на основе достигаемых результатов.

Это является залогом успешной командной работы и для групп людей, эффективность взаимодействия которых может быть тем самым повышена.

## 5. Динамическое прогнозирование

Будущее не может быть предсказано, но мы можем его прогнозировать, и точность прогноза обычно увеличивается при приближении к настоящему моменту времени.

Тонкость заключается в том, чтобы использовать динамическое адаптивное прогнозирование событий на уровне каждого агента, что означает периодическую регулярность или событийность в обновлении прогнозов с учетом поступающих фактических событий.

Например, агент грузовика должен прогнозировать, какова вероятность подхвата груза в пункте назначения его текущей поездки и, возможно, при определенных условиях даже очень выгодный заказ не стоит брать в удаленный город, если обратно придется ехать пустым, поскольку вся прибыль будет затрачена на обратную дорогу.

Другой пример – агент товара в магазине должен менять прогноз своей продажи по каждой пробивке чека на кассе, что позволит ему оценить границы момента времени для очередной доставки и вовремя передоговориться с подходящим грузовиком.

Кроме того, рассматриваемые системы могут в отдельной ветви работы, например, на параллельно работающем сервере, копировать текущую ситуацию и запускать виртуальные события (возможный новый заказ, вероятная поломка станка и т.д.), которые «исследуют» и «ощупывают» вперед пространство возможных решений, еще до момента наступления таких событий, подтверждая нашу готовность или неготовность отразить возможные проблемные ситуации.

Такое прогнозирование может осуществляться постоянно в скользящем режиме, непрерывно зондируя будущее и формируя радар рисков для предприятия.

## 6. Экспериментирование с результатами

В сложных системах агенты, принимающие решения, должны иметь возможность экспериментировать для достижения лучших результатов.

Скажем, если сложившийся фрагмент расписания выглядит неудачным с точки зрения некоторых критериев, должна быть возможность направленно разрушить данный фрагмент и построить расписание заново, например, при других начальных условиях.

Важно понимать, что в рассматриваемых системах решение строится эволюционно и даже другой порядок прихода событий мог бы вызвать другой результат.

Существующее решение может быть запомнено до проведения эксперимента и, если результат получается лучше, то может быть заменено на новый вариант.

В результате любое формирующееся решение сложной задачи в системе (например, расписание) может подвергаться испытанию по методу «проб и ошибок» (или целевым «провокациям»), что позволит оценивать его качество и устойчивость.

Данный процесс может напрямую регулироваться с учетом резерва времени, отведенным системе на поиск решения.

## 7. Обучение из опыта

Интеллектуальная система должна обладать способностью извлекать знания из своего опыта, то есть обучаться в ходе работы.

При этом важно обнаруживать образы ситуаций (паттерны), дающие решения как с успешными, так и отрицательными результатами, которых следует избегать.

Например, есть ли смысл вновь назначать микронные задачи рабочему, который во всех предыдущих операциях с такой точностью допустил брак?

При этом следует обратиться к менеджеру и направить рабочего на переобучение или исключить работу из списка его компетенций.

## 2.5. Проектирование адаптивных решений

### Стратегии адаптации

Помимо процесса динамического перераспределения потребностей по возможностям в сложной системе должны использоваться различные стратегии адаптации, которые могут выбираться и устанавливаться агентом предприятия для других агентов в зависимости от развития ситуации.

В частности, стратегии адаптации могут быть связаны с распознаванием типа среды, в которой работает система, предсказанием глобальных изменений, установлением порядка адаптации и т.д.

Важным вопросом в такой стратегии является планирование объема запаса ресурсов в условиях полной или частичной непредсказуемости и высокой динамики колебаний спроса и предложения. Это утверждение, однако, конфликтует с общепринятыми принципами бережливого производства и поставок «точно в срок», но часто адаптивность требует определенного излишка ресурсов, который может динамически меняться по ситуации.

Обратим внимание, что описанные выше принципы будут эффективны и в случаях, если система подвергается атакам с целью разрушения, когда запас (избыток) ресурсов может позволить системе сохранить устойчивость и как можно быстрее восстановить нормальную работу.

Благодаря этому адаптивная система может быть устойчива и к различным вредным воздействиям, как например мошенничество или вирусные атаки.

Требуемая скорость принятия решений при адаптации по событиям даже для обычных предприятий уже часто находится на пределе человеческих возможностей. При этом время задержки между моментом появления самого события и фактом ввода его в систему может грозить критическими потерями.

В этом разделе мы кратко опишем подход, применимый к проектированию архитектуры любых адаптивных систем в таких сферах, как цепочки поставок, производство, транспортировка, продажи, реклама, обслуживание, управление проектами и другие.

Данный подход и архитектуру (Рисунок 2.16) мы применяли на практике в течение последних многих лет для разработки сложных адаптивных систем для промышленных предприятий.

Предполагая наличие выработанной на предприятии стратегии адаптации, проектирование начинается с создания базы знаний мира предметной области и бизнес-процессов для выработки, принятия и согласования решений.

### Создание базы знаний

Концептуальные знания лучше всего описываются при помощи онтологии, узлы сети которой представляют классы понятий, определенные набором свойств (атрибутов), а связи - это классы отношений между классами понятий.

Онтология позволяет описать модель любой ситуации при помощи понятий и отношений между ними. Возможно также введение в онтологию и описания сценариев действий и рассуждений, которые позволят конструировать бизнес-процессы предприятия или организации.

Например, для заказа места в самолете и планирования полета необходимыми классами объектов будут: полет, пассажир, самолет, пилот, цена места, маршрут, транспортная сеть и другие. Примеры возможных атрибутов для класса объектов «полет»: номер рейса, аэропорт вылета, аэропорт прибытия, время вылета, время регистрации и т.д. Процесс бронирования может быть описан как процесс поиска возможного места для потребности пассажира в полете, согласования с пассажиром цены места, проведения оплаты и выдачи подтверждения, каждая операция которого может выполняться специализированным агентом.

Сценарии действий и рассуждений, описывающие логику поведения агентов, определяют уровень их автономности. Если агенты будут вести себя согласно единственному возможному сценарию, другими словами, одному единственному алгоритму, их поведение будет строго детерминировано, и адаптивность бизнес-процессов будет самой низкой. При большом выборе сценариев и возможности агентов экспериментировать в условиях, когда предложенный сценарий не соответствует реальности, адаптивность бизнес-процессов увеличивается. Например, при возникновении проблемы с бронированием агент может переключаться на другую авиакомпанию или другой сервер и т.д.

Фактические знания, например, списки возможных к использованию ресурсов (авиакомпаний, серверов и т.п.) могут храниться и в традиционных базах данных.

Следующим шагом после описания концептуальных и фактических знаний должно быть построение онтологической модели проблемной ситуации предметной области, известной как *цена*, состоящей из экземпляров классов объектов и их отношений, определенных в онтологии.

Для авиакомпании такая цена может быть, например, выражена семантической сетью, в которой узлами будут Пассажир P1, Пассажир P2, ..., Рейс F1, Рейс F2, ..., Место S1, Место S2, ..., Самолет A1, Самолет A2, ... и т.д., а связями будут “S1 бронируется для P3”, “A1 назначен на F2” и т.д.

Сложные системы, такие как цепочки поставок крупных международных организаций, а также онтологии и сцены, которые их описывают, могут содержать сотни и тысячи объектов, атрибутов, правил и отношений.

Эти условия применения онтологий для управления ресурсами во многом меняют требования к конструкторам онтологий, которые используются сегодня в основном для аннотации Интернет-страниц и других подобных применений.

## Построение виртуального мира предметной области

Виртуальный мир — это мир агентов, небольших программных объектов, которые, взаимодействуя через общие данные или обмениваясь сообщениями друг с другом, коллективно решают поставленную задачу.

Агент назначается каждому объекту сцены (узлу семантической сети), другими словами, каждой сущности. Например, в виртуальном мире системы планирования авиакомпании могут быть агенты рейса, самолета, пилота, аэропорта, места и т.д.

Виртуальные миры позволяют принимать решения в режиме реального времени путем переговоров между агентами, откладывать принятие решений на допустимые сроки, гарантировать, что изменяются только части связей системы, затронутые событием, контролировать происходящие события и быть всегда к ним готовыми.

Сложность виртуального мира может быть изменена через введение новых типов агентов и новых типов переговоров между ними, равно как и через усложнение конструкции и логики работы самих агентов.

Наиболее развитые виртуальные миры должны содержать агентов, способных к самообучению опытным путем и приобретению знаний, позволяющих более эффективно планировать ресурсы.

## Связь виртуального и реального миров

Реальный мир компании, например, по грузовым перевозкам, постоянно изменяется, что становится известным для сложной системы через получение событий.

Для авиакомпании такими событиями, вызывающими возмущения в системе, могут быть: бронирование мест, отправление рейса, задержка рейса, отмена рейса, закрытие воздушного пространства, отказ самолета и т.д.

Факт возникновения каждого реального события должен быть по возможности сразу отражен в виртуальном мире, где создается соответствующее виртуальное событие, заставляющее затронутую часть виртуального мира приспособляться к изменениям, порожденным в реальном мире.

Но в свою очередь, каждое решение по изменению (адаптации) виртуального мира должно быть сразу передано обратно в реальный мир для его реализации.

Очевидно, что задержка в вводе всех этих событий, может самым негативным образом сказаться на принятии решений, например, самолет улетит без пассажира.

## Управление реальным миром через виртуальный

По приходу событий из реального мира агенты виртуального мира решают, как реальный мир должен приспособиться к новому событию.

Например, если в реальном самолете во время полета частично повреждается одна из частей, то его модель, представленная агентом самолета, тоже становится неисправной. Это событие может немедленно, с опережением, запустить процесс планирования специального обслуживания поврежденной подсистемы самолета, как только он приземлится в аэропорту.

При этом агент части самолета, ответственный за свой узел в общей семантической сети самолета, посылает сообщения агентам всех связанных с ним и вовлеченных в новую проблемную ситуацию узлов для того, чтобы они знали, что эта часть повреждена, и могли спланировать действия для парирования проблемной ситуации.

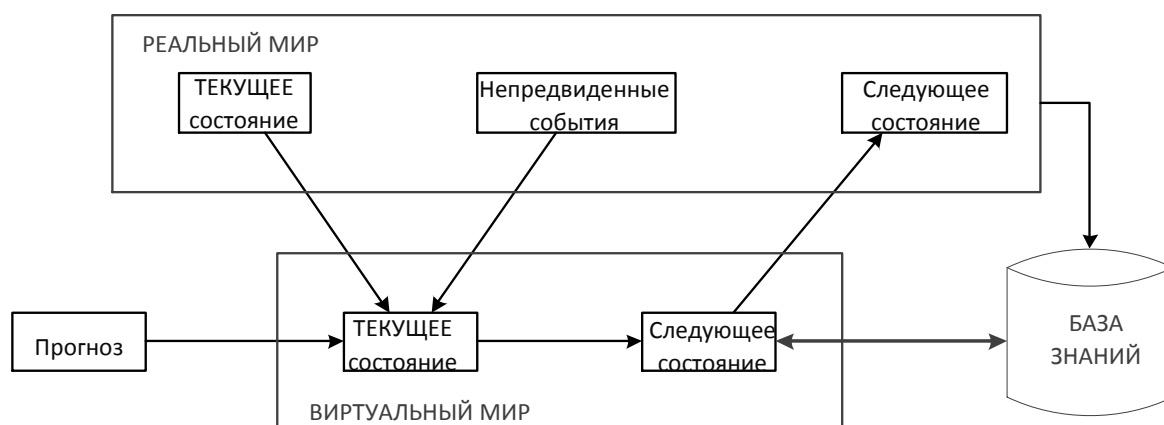


Рисунок 2.16. Виртуальный мир управляется реальным миром и, в свою очередь, управляет реальным миром

В результате такое сообщение активирует перепланирование деятельности многих связанных участников, попадающих в общую «рабочую группу» пострадавших агентов, которые пытаются адаптироваться к новым условиям путем поиска замены части, проведения сервисного обслуживания и т.д.



Как только такое решение найдено, оно передается в реальный мир для реализации, обеспечивая совместное развитие двух миров: реального и виртуального (ко-эволюция).

Отметим еще раз, что, как только соответствующий виртуальный мир построен, он может быть использован не только для управления реальным миром, но также для моделирования возможного поведения реального мира в различных условиях, например, для изучения поведения цепочек поставок в меняющихся условиях рынка, заданных на горизонте времени.

Таких одновременно запущенных моделирующих систем может быть несколько. Так же, как плохо видящий человек ощупывает мостовую, они могут «ощупывать» будущее системы при различных условиях (событиях), непрерывно отвечая на вопросы «Что будет, если ...».

Например, пусть при планировании работы аэропорта неожиданно появился прогноз погоды, сообщающий, что в 19.00 возможно будет сильная гроза, и мы хотим узнать, какие рейсы скорее всего пострадают в этом аэропорту. В таком случае одновременно с основной «боевой» версией планировщика аэропорта может быть запущена моделирующая версия, куда данное событие может быть без опаски введено (иначе в боевой версии системы это событие вызовет изменения, которые еще могут не случиться в реальности). В итоге мы получим прогнозируемое состояние аэропорта в случае грозы, что вручную сделать может быть крайне сложно.

Более того, таких одновременно запущенных «траекторий» жизни мира аэропорта может быть несколько, чтобы оценить последствия самых разных виртуальных событий и решений, которые могут и не произойти в реальной жизни.

Все это может существенно повысить качество, гибкость и эффективность, надежность и обоснованность вырабатываемых и принимаемых решений для управления предприятиями реального мира.

## Выводы:

1. Методология управления сложными системами предполагает высокую адаптивность в принятии решений элементами этих систем, включающую возможность изменения ранее принятых решений.

2. Для управления сложными системами важны параметры, понижающие или повышающие сложность, к числу которых можно отнести степень автономности и связности элементов системы, уровень их удовлетворенности и силу связей между ними.

3. На примере моделирования грузоперевозок показана возможность повышения на 25-40% эффективности использования ресурсов при переходе к адаптивному управлению в реальном времени.

4. Предложено 7 принципов, позволяющих повысить адаптивность в принятии решений, включая прогнозирование событий, поддержку командной работы с выработкой согласованных решений, проактивную коммуникацию и т.д.

5. Рассмотрены высокоуровневые компоненты архитектуры интеллектуальной системы для решения сложных задач управления ресурсами.

6. Показано, что для управления любой сложной системой должна быть создана ее адекватная компьютерная модель, которая может зеркально отражать процессы в реальной жизни и адаптивно перестраиваться по мере возникновения событий изменений в окружающей среде.

7. Высокая адаптивность может существенно повысить оперативность, качество и эффективность, гибкость и надежность принимаемых решений для управления предприятиями.

## Список литературы

1. Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автометрия. 2002. Т. 38. № 6. – С. 45-61.

2. Виттих В. А., Скобелев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и Телемеханика. 2003. №1. – С. 162-169.
3. Андреев В. А., Виттих В. А., Батищев С. В., Скобелев П. О. Методы и средства создания открытых мультиагентных систем для поддержки процессов принятия решений // Известия Академии Наук. Теория и системы управления. 2003. №1. – С. 126-137.
4. Виттих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. Т.45. № 2. – С. 78-87.
5. Rzevski, G., "Using Tools of Complexity Science to Diagnose the Current Financial Crisis". Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 210, Vol.46, No. 2.
6. Madsen, B., Skobelev, P., Rzevski, G., and Tsarev, A. "Real-Time Multi-agent Forecasting and Replenishment Solution for LEGOs Branded Retail Outlets." International Journal of Software Innovation, Volume 1 Issue 2, pp. 28-39. IGI Global, 2013.
7. Kapitza S. "Global Population Blow-Up and After: The Demographic Revolution and Information Society". Report to the Club of Rome, 2006.
8. Амелина Н., Лада А., Майоров И., Скобелев П., Царев А. Исследование моделей организации грузовых перевозок с применением мультиагентной системы для адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени. // Проблемы управления. 2011. №6. С. 31-37.
9. Oleg Granichin, Petr Skobelev, Alexander Lada, Igor Mayorov, Alexander Tsarev. Comparing adaptive and non-adaptive models of cargo transportation in multi-agent system for real time truck scheduling. – Proceedings of the 4th International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications (ECTA'2012), October 5-7, 2012, Barcelona, Spain. – SciTePress, 2012. – pp. 282-285. DOI 10.5220/0004148602820285
10. Oleg Granichin, Petr Skobelev, Alexander Lada, Igor Mayorov, Alexander Tsarev. Cargo transportation models analysis using multi-agent adaptive real-time truck scheduling system. – Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART'2013), February 15-18, 2013, Barcelona, Spain. – SciTePress, Portugal, 2013, Vol. 2. – pp. 244-249. ISBN 978-989-8565-39-6. DOI 10.5220/0004225502440249.

# ГЛАВА 3: Мультиагентные технологии для адаптивного управления

## 3.1. Начальные сведения

Для адаптивного управления сложными системами при возникновении различных событий эффективным оказывается использование мультиагентных технологий (МАТ) [1].

Это новое направление в области информационных технологий начало формироваться в 70-80-ые годы прошлого века на стыке достижений в областях:

- объектно-ориентированного программирования;
- искусственного интеллекта;
- параллельных вычислений;
- телекоммуникаций (Интернет).

На сайте Ассоциации AgentLink [2], объединяющей разработчиков мультиагентных систем (МАС) Европейского союза, представлена дорожная карта развития этого направления до 2030 г., имеющая девиз «Вычисления как взаимодействия» («Computing as Interactions»).

Этот девиз выражает главный смысл данной технологии, позволяющей от централизованных, монолитных и последовательных программ с заранее фиксированной иерархической структурой перейти к открытым распределенным сетевым сообществам автономных программ, работающих асинхронно и параллельно, способных самостоятельно формировать требуемые структуры и взаимодействовать между собой для решения поставленных задач.

Мультиагентные технологии открывают принципиально новые возможности решения сложных проблем, например, планирования и оптимизации ресурсов, которые плохо решаются или не решаются вовсе классическими методами, путем создания интеллектуальных систем нового класса, использующих фундаментальные принципы самоорганизации и эволюции, характерные для живых систем, например, колонии муравьев или роя пчел [3].

В этом подходе, часто называемом «биологическим» (bio-inspired), решение любой сложной задачи (например, построения сложного расписания флота грузовиков или станков и рабочих производственного цеха) строится путем самоорганизации, взаимодействия и переговоров большого числа (десятков и сотен тысяч) очень простых агентов, непрерывно конкурирующих и кооперирующих друг с другом. При этом сам процесс решения сложной задачи имеет эволюционный характер (решение непрерывно самоулучшается в ходе работы системы) и напоминает метод «проб и ошибок» с той лишь разницей, что решения принимаются не случайным образом, а путем направленных согласованных улучшений. По сравнению с трудно реализуемым комбинаторным перебором, согласованное взаимодействие агентов не гарантирует нахождения единственного оптимального решения, но позволяет быстро добиваться решения задач с приемлемым качеством и при этом решать сколь угодно сложные проблемы.

В результате рассматриваемые интеллектуальные системы оказываются способны демонстрировать феномены «интеллекта роя» («Swarm Intelligence») и более сложного «коллективного интеллекта» («Collective Intelligence»), проявляющие себя в высокой эффективности, гибкости, живучести и т.д.

Следует отметить, что самоорганизующийся «интеллект роя» – важная альтернатива принятому в области искусственного интеллекта (ИИ) классическому пониманию интеллектуальной системы. В традиционном понимании «интеллект» должен быть «собран» (как при сборке автомобиля) из отдельных умных блоков, например, таких как центральный

блок управления, память, сознание, разные виды рассуждений, включая дедукцию, индукцию, ассоциацию и т.д. Однако в «интеллекте роя» нет никакого главного блока управления, отвечающего за «интеллект», напротив, интеллектуальное поведение рождается в результате взаимодействия большого числа самых простых элементов. Действительно, интеллектуальные возможности одного муравья или пчелы малы, но вместе рой пчел или колония муравьев представляют собой мощный организм с высокой степенью адаптивного интеллекта, позволяющего защищать гнездо от нападений, осваивать новые территории, находить пропитание и решать другие очень сложные задачи в условиях изменяющейся окружающей среды.

Именно поэтому МАТ и рассматривается нами как технологическая основа построения компьютерных моделей сложных адаптивных систем, необходимых для управления сложностью в реальной жизни.

## 3.2. Базовые определения

*Агент – это автономный программный объект, способный достигать поставленных целей в условиях неопределенности путем выработки и анализа вариантов принятия решений и согласованного взаимодействия с другими агентами.*

В последнее время выделяются следующие ключевые свойства программных агентов:

- автономность (autonomy) – способность функционировать без вмешательства других систем или человека для достижения поставленных целей, контролируя свои действия и внутреннее состояние;
- проактивность (proactivity) – агент демонстрирует управляемое целями поведение, проявляя инициативу для улучшения своего текущего состояния;
- реактивность (reactivity) – агент воспринимает внешнюю среду и реагирует на события изменений, адаптируя свое поведение для достижения целей;
- социальное поведение (social ability) – агент взаимодействует с другими агентами среды для согласования решений.

Современное понимание отличительных особенностей мультиагентных систем от традиционных представлено в Таблице 3.1.

Таблица 3.1. Сравнение парадигмы традиционных и мультиагентных систем

<b>Традиционные системы</b>	<b>Мультиагентные системы</b>
Иерархии больших программ	Большие сети малых агентов
Последовательные вычисления	Параллельные вычисления
Инструкции сверху вниз	Переговоры равных сторон
Централизованные решения	Распределённые решения
Управляются данными	Управляются знаниями
Предсказуемость и повторяемость	Самоорганизация и эволюция
Стабильность и детерминизм	Развитие и недетерминизм
Тенденция уменьшать сложность	Тенденция наращивать сложность
Тотальный контроль	Создание условий для развития

Подчеркнем, что в отличие от программного объекта, агент - это автономный программный объект, который имеет собственную цель и к ней стремится, в связи с чем его нельзя «вызвать» как обычный «метод» (иначе он потеряет свое текущее состояние и обязательства перед другими агентами). Агента можно лишь только «попросить» что-то сделать; но он согласится или откажет полученному запросу в зависимости от того, насколько он продвигается к своей цели, а также с учетом того, какие он дал обещания другим агентам и насколько возможно изменение этих договоренностей в текущей ситуации, что реализуется через выявление конфликтов и проведение переговоров с другими агентами.

Для достижения поставленной цели агент должен уметь реагировать на события, решать различные задачи, принимать решения и коммуницировать с себе подобными для их согласования. Например, агент заказа на грузоперевозку должен уметь находить подходящие грузовики, бронировать самый подходящий грузовик, а потом следить за его перемещениями и контролировать выполнение заказа в срок, готовить отчет по поездке с расчетом себестоимости перевозки. Агент грузовика должен уметь работать с заказами, строить маршруты, подбирать водителей, находить места заправки, прогнозировать появление заказов в городах и решать ряд других задач.

В условиях, когда вдруг случается незапланированное событие поломки грузовика – агент грузовика должен уметь найти все размещенные на нем заказы и информировать их о таком изменении. В ответ агенты заказов должны уметь заново подыскать себе другие грузовики, и, наоборот, при высвобождении нового, более выгодного грузовика, агент заказа, очевидно, должен иметь возможность забронировать этот грузовик, разорвав связь по бронированию с предыдущим грузовиком, если есть возможность улучшить результаты.

Такого рода взаимодействия агентов описываются специальными протоколами, которые регламентируют асинхронные или синхронные схемы развития «диалога» между агентами, включая информирование об изменениях, посылку различного рода предложений и реакцию на эти предложения и другие. При этом пересылка сообщения от первого агента ко второму агенту должна быть осуществлена в любой момент времени, вне зависимости от состояния второго агента.

Таким образом, агент – это не просто «алгоритм», это обычно набор сценариев поведения и взаимодействия, управляемых центральным блоком планирования действий и анализа результатов, иногда называемым «личностью» агента (Personality). С некоторой степенью упрощения можно считать, что агент представляет собой «машину состояний» подобно конечному автомату или автомату с памятью, в которой любое событие на входе переводит агента из одного состояния – в другое. Но на практике агент более похож на небольшую операционную систему, обеспечивающую автономную работу в модельном или реальном времени.

Подведем первые итоги обсуждения понятия «агент» - отметим важные свойства программных агентов, каждый из которых должен уметь:

- следовать поставленной цели и выбирать способы ее достижения;
- реагировать на события, изменения ситуации в среде путем мониторинга самой среды или получая сигналы (сообщения);
- обращаться к встроенным сценариям возможных действий или в базу знаний, чтобы определить, какую задачу необходимо выполнить, и как это сделать;
- отправлять сообщения другим агентам или пользователям или, наоборот, получать от них сообщения;
- решать задачи, необходимые для принятия решений;
- анализировать получаемую информацию, вырабатывать и сопоставлять варианты решений, принимать решения и согласовывать с другими агентами;
- устанавливать и разрывать связи с другими агентами;
- оценивать эффективность своих решений и работы в целом.

Агенты могут активироваться как при возникновении событий, так и быть постоянно или временно активными, переходить из пассивного состояния – в активное, и наоборот, а также быть проактивными, т.е. самостоятельно, без внешних побуждающих воздействий, искать возможности увеличения ценности своих решений.

*Ценность решения – совокупный показатель эффективности работы агента любого элемента сети предприятия (или предприятия в целом), который включает в себя такие показатели, как прибыль, качество или эффективность обслуживания, себестоимость услуги или товара, риски или любые другие.*

Определение ценности решения зависит от специфики работы предприятия и даже для двух похожих компаний грузовых перевозок подходы к принятию решений могут существенно отличаться, например, если одна старается всегда возвращать свои грузовики на базу в гараж, а вторая использует модель «челнока», который должен делать перевозки без остановки и возвратов на базу.

Интеллектуальные агенты могут использовать не только готовые «жесткие» сценарии, но и применять динамически загружаемые или создаваемые «на лету» новые сценарии действий на основе базы знаний о предметной области.

*Мультиагентная система (МАС) - система, состоящая из одной или более групп агентов, конкурирующих или сотрудничающих друг с другом с целью выполнить общую задачу таким образом, чтобы увеличить ценность принимаемых решений для всей системы (например, предприятия в целом).*

*Поведение МАС определяется не одним детерминированным алгоритмом, а формируется эволюционным путем из взаимодействия составляющих ее агентов.*

В МАС агенты всегда совместно работают в сообществах, часто называемых также мирами, роями, командами или группами.

Мультиагентные системы могут включать или создавать одну или несколько групп агентов, каждой группе можно поручить выполнение отдельного задания, или одно задание может быть разделено на части и распределено по разным группам.

Мультиагентные системы обладают всеми характеристиками сложных адаптивных систем, в частности, самоорганизацией, которая в контексте мультиагентной технологии может быть определена следующим образом:

*Самоорганизация в МАС - способность группы агентов самостоятельно изменять существующие и/или устанавливать новые отношения между состоящими в ней агентами с целью обработки новых заказов, восстановления после сбоя и максимизации ценности решений для системы.*

Одним из важных применений мультиагентных систем является адаптивное распределение ресурсов в условиях, когда число заказов (потребностей в ресурсах) и/или количество ресурсов, которые необходимо распределить, непредсказуемо меняется во время самого процесса распределения и исполнения заказов, что существенно отличает данную постановку от классической [4-5].

### 3.3. Холонический подход к созданию сложных систем

Создание МАС для адаптивного управления ресурсами становится возможным на основе холонического подхода, базирующихся на работах Артура Кестлера [6], который изучал феномен образования биоценозов в живой природе.

Холон (от греческого «holos» – весь, целый, с суффиксом «он», обозначающий часть, частицу) – это элемент (частица), соединяющий в себе свойства целого и части. Холоническая

система состоит из сети холонов, каждый из которых может быть как элементарным, так и составным холоном.

Фактически, в своих работах А.Кестлер предсказал открытые многоуровневые сетевые самоподобные (рекурсивные) структуры из автономных элементов, построенные по аналогии с клетками живого организма, где сложное взаимодействие и взаимопроникновение может осуществляться на любом уровне.

В холоническом подходе выделяются 4 ключевых типа агента: агент заказа, агент ресурса, агент продукта, штабной агент.

Например, агент ресурса крупного завода может быть представлен как вложенная сеть агентов цехов, каждый из которых, в свою очередь, может быть представлен сетью агентов участков и далее – вплоть до агента рабочего.

Более того, сам агент рабочего, на еще более низком уровне рассмотрения, может иметь собственные заказы на отдельные токарные или слесарные операции (как часть заказов цеха), свои ресурсы (доступные для планирования интервалами времени рабочего), продукты (входные детали и материалы и результаты сборочных операций) и даже штабного агента, управляющего стратегиями планирования времени рабочего или прогнозирующего загрузку на следующую неделю, думающего о развитии бизнеса рабочего и предлагающего рабочему освоить более востребованные в перспективе рабочие специальности.

Разработка холонических архитектур, связанных с выявлением и выделением отдельных холонов (миров) и организацией их взаимодействия – в последнее время становится одним из центральных вопросов проектирования мультиагентных систем, позволяя искать компромисс между гибкостью и производительностью системы.

Характеризуем кратко цели и задачи указанных выделенных базовых классов агентов на примере решения проблем производственной логистики:

- *агент заказа* – должен обеспечить наилучший вариант выполнения своего заказа на имеющихся ресурсах, обеспечивая наилучшее качество проведения работ, минимальную стоимость и сроки выполнения. Для этого должен иметь доступ к знаниям о структуре заказа, технологии исполнения частей, требования к рабочим и станкам по каждой операции, материалам и инструментам и т.д.;
- *агент ресурса* – должен обеспечить максимальную загрузку своего ресурса с учетом знаний о его специализации, производительности, плане регламентных работ и других особенностях;
- *агент продукта* – должен обеспечить минимальное время хранения продукта на складе с учетом знаний о структуре изделий, местах его производства и хранения, параметрах изделий;
- *штабной агент* – должен обеспечивать постоянный анализ ситуации в работе системы (предприятия) и вмешиваться в работу других агентов в случае возникновения критических ситуаций, например, изменяя стратегии поведения агентов нижнего уровня, или для обеспечения развития.

Перечислим примеры других задач, требующих адаптивного распределения ресурсов, в дополнение к производственной логистике:

- *транспортная логистика* – распределение грузовиков по заказам в пространстве и времени в условиях неопределенности, возникающей из-за часто происходящих непредсказуемых событий (изменения в заказах, задержки грузовика в пути, дорожно-транспортные происшествия, поломки транспорта, задержки в разгрузке-погрузке и др.);
- *управление проектами* – распределение исполнителей по задачам проектов с учетом их квалификации и личного опыта, текущей загрузки подразделений, особенностей задач, требований задач к квалификациям и опыту сотрудников;

- *электронная коммерция* – распределение имеющихся товаров или услуг по запросам клиентов, при условии, что заказчик или поставщик могут неожиданно прервать процесс распределения и отказаться от заказа, потребовать замены товара, расширить заказ и т.д.

Каждая из указанных выше проблем может решаться с использованием рассмотренных классов агентов, например, в управлении проектами также имеются агенты заказов на решение отдельных задач проектов, агенты ресурсы исполнителей, знающие их квалификацию, агенты продуктов, создаваемых в ходе выполнения проектов, например, в виде документа или программной компоненты, и штабные агенты, действующие, к примеру, от лица руководителя проекта или руководителя подразделения, сотрудники которого привлекаются к проектам и для которых важно обеспечить равномерную загрузку с учетом согласованного ранее плана отпусков.

Разработанная архитектура мира агентов заданной предметной области, в которой специфицируются классы агентов и бизнес-процессы (протоколы) их переговоров, а также роли и ответственности, целевые установки агентов, по типу рассмотренных в этом разделе, можно рассматривать как *модель организации*.

Создание моделей таких «организаций» (organization-based programming) для различных предметных областей рассматривается как следующий шаг в развитии объектно-ориентированного (object-oriented programming) и мультиагентного программирования (multi-agent programming) [7].

### 3.4. Сети потребностей и возможностей

Развитием холонического подхода являются сети потребностей и возможностей (ПВ-сети) [8-12], в которых вместе с агентами заказов, ресурсов, продуктов и штабного дополнительно используются *агенты потребностей и возможностей*.

Эти агенты могут выступать в качестве субагентов (помощников) основных агентов, позволяя указанным выше агентам параллельно и асинхронно постоянно искать друг друга на виртуальном рынке мультиагентной системы, выполняя непрерывный поиск соответствия между ними (матчинг), по типу «инь-ян» («мальчики-девочки») (Рисунок 3.1).

Задача агентов потребностей D (Demand Agent) – найти возможности (ресурсы) для удовлетворения потребностей, а задача агентов возможностей S (Supply Agent) состоит в том, чтобы найти потребности для использования своих возможностей. В случае успешного поиска D и S агенты могут заключать или пересматривать контракты на требуемые услуги на виртуальном рынке системы с выплатой бонусов в случае успешного их выполнения или штрафов в случае разрыва связей, а также компенсаций за ухудшение позиций при уступках в ходе переговоров.

Постоянный поиск соответствий между конкурирующими и кооперирующими агентами потребностей и возможностей на виртуальном рынке системы позволяет строить решение любой сложной задачи как динамическую сеть связей между задачами (операциями), гибко изменяемую в реальном времени.



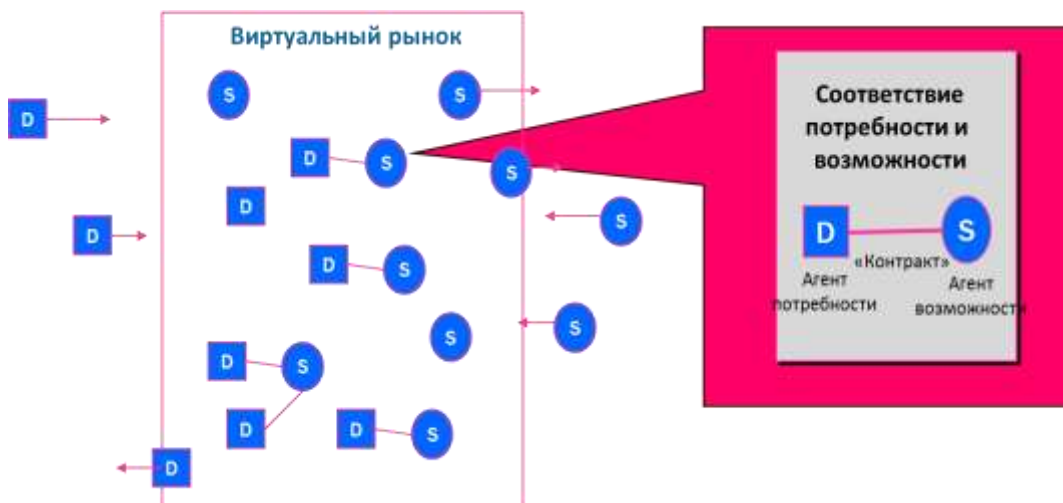


Рисунок 3.1. Виртуальный рынок агентов ПВ-сети

Так, на нижнем уровне задача (операция) может создавать потребность в интервале времени, а сам интервал времени ресурса – предлагать возможность исполнения для задачи, связка между ними и задает базовый элемент ПВ-сети для любого сколь угодно сложного расписания.

Задача штабного агента, действующего от лица предприятия в целом, заключается в том, чтобы гарантировать максимизацию ценности решений в ПВ-сети предприятия в процессе распределения возможностей по потребностям.

Работа ПВ-сети должна обеспечить реализацию полного цикла управления ресурсами, представленного на рисунке 3.2:

- Реакция на событие – предполагает определенную политику обработки событий, часть которых может автоматически поступать на обработку, а часть – требует участия пользователя.
- Распределение ресурсов – решается задача, какие ресурсы следует использовать для отработки заказов, учитывая возможно разный размер грузовика, возможность использовать сверхурочных и т.д.
- Планирование – формирование расписания использования ресурсов.
- Оптимизация (пока есть время) – может включать моделирование и прогнозирование развития ситуаций.
- Согласование решений – предполагает взаимодействие с пользователем, который может утвердить предлагаемое системой решение, отменить или скорректировать решение, ввести собственное встречное предложение.
- Перепланирование в случае расхождения плана и факта – автоматически или по указанию пользователя запускает цепочку изменений расписания.
- Обучение из опыта – индуктивные обобщения, например, не назначать на важные заказы водителя, который всегда опаздывает.

Данный полный цикл управления ресурсами обеспечивает поддержку процесса автономного функционирования интеллектуальной системы, реализуемого любым живым организмом.

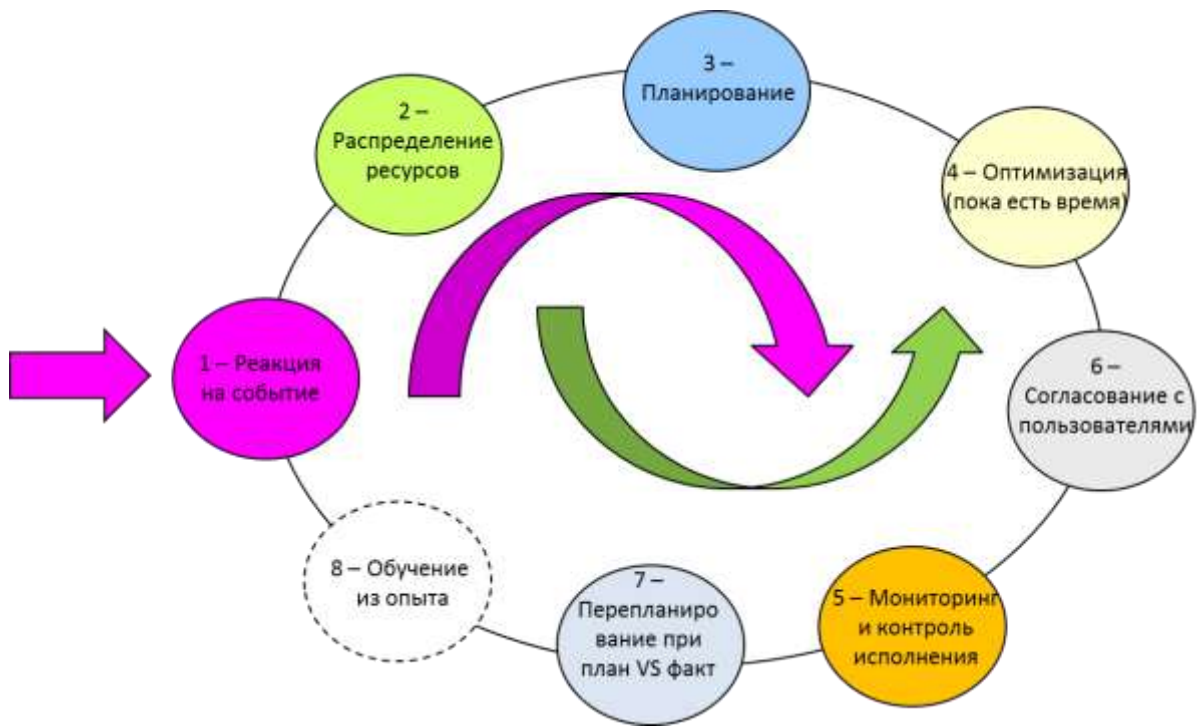


Рисунок 3.2. Полный цикл управления ресурсами

### 3.5. Пример мира транспортной логистики

Рассмотрим подробнее особенности построения ПВ-сетей на примере мира транспортной логистики с консолидациями грузов (Рисунок 3.3).

В мире транспортной логистики можно выделить следующих агентов:

- агент клиента (договора) – заботится о выполнении всего объема заказов с заданным уровнем сервиса;
- агент заказа – пытается выполнить заказ в заданные сроки, задает исходные пункты для забора грузов и пункты назначения;
- агент грузовика – старается максимально использовать грузовик для выполнения заказов;
- агент груза – обеспечивает совместимость с другими грузами;
- агент маршрута – решает задачу поиска лучшего маршрута для движения;
- агент консолидаций – пытается создать динамические группы грузов одного маршрута движения для максимизации загрузки грузовиков;
- агент водителя – обеспечивает рабочий график водителя с учетом его квалификации, опыта и требований к режиму труда и отдыха;
- агент заправки – добивается наиболее рационального плана заправок по маршруту следования;
- агент кафе и гостиницы – предлагают наилучшие места остановок при движении по маршруту.

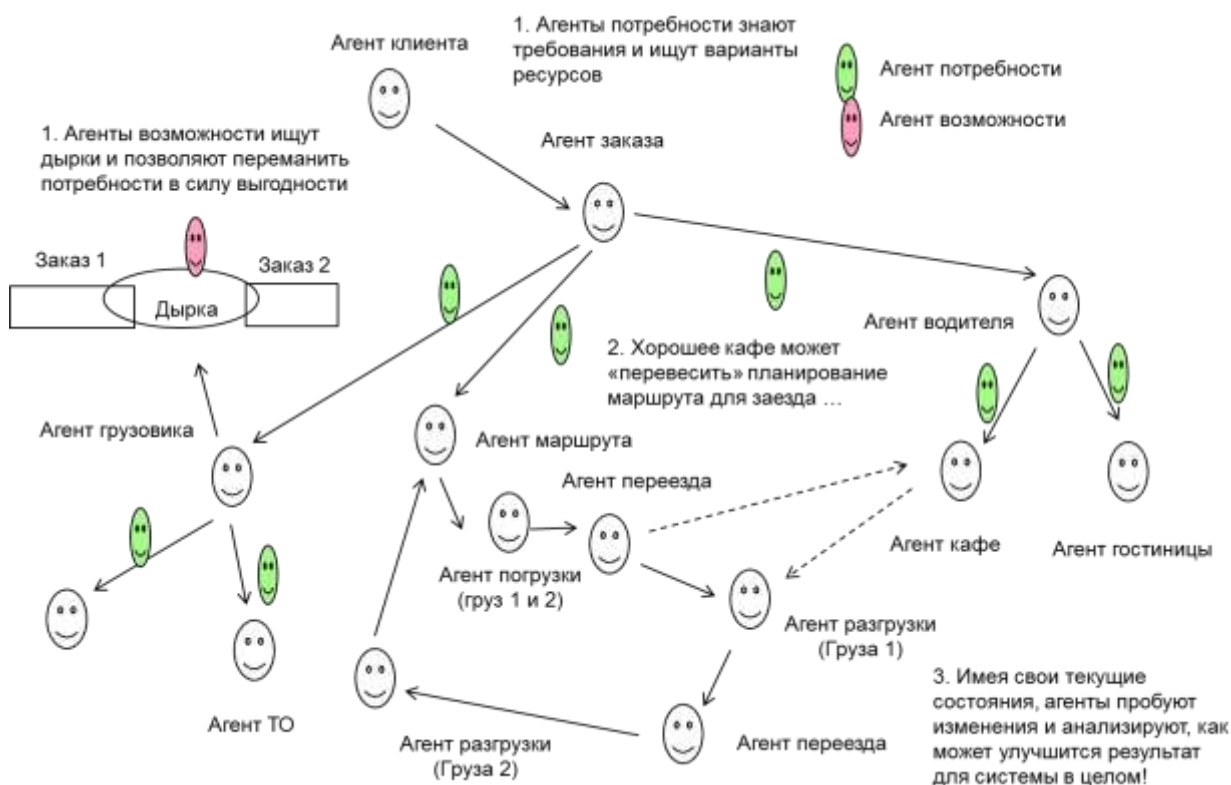


Рисунок 3.3. Пример конструкции ПВ-сети мира транспортной логистики

В рассматриваемом примере агенты потребностей могут создаваться агентом грузовика для одновременного, асинхронного и параллельного поиска маршрута движения, водителя, места и времени проведения технического обслуживания (ТО), места заправки, отдыха и т.д.

И, встречно, агент возможности может порождаться тем же агентом грузовика, когда, например, в маршруте движения грузовика обнаруживается значительный пустой пробег и нужно до срока выезда по пустому перегону найти заказ, который бы позволил грузовику перевезти груз в этот конкретный интервал, между двумя уже сложившимися поездками.

Такой агент возможности будет атаковать своими предложениями уже размещенные заказы на других грузовиках, поскольку цена его предложения будет наверняка ниже (в модели Shared costs – разделяемых затрат), т.е. будет высоко конкурентной, и стадия проактивности, скорее всего, принесет этому агенту хорошие результаты.

Фактически, агентам потребностей и возможностей передаются требования на поиск соответствующих агентов и определенным образом распределяются финансовые ресурсы, на основе которых эти агенты, действуя от лица и по поручению агента грузовика, ищут соответствующие ресурсы (водителя, заправку, станцию ТО и др.).

Пример модели конкретной ситуации, называемый далее сценой мира транспортной логистики, приведен на Рисунке 3.4.

Здесь показаны несколько конкретных заказов 1192 и 1205 от одного из клиентов, один составной заказ из Санкт-Петербурга через Москву в Самару и другой из Перми в Екатеринбург и Нижний Новгород. Для описания данной текущей ситуации потребуются спецификация таких объектов как «клиент», «заказ», «грузовик», «город», «дорога», «маршрут», а также связывающих их отношений «заказ-принадлежит-клиенту», «поездка-входит-в маршрут» и другие.

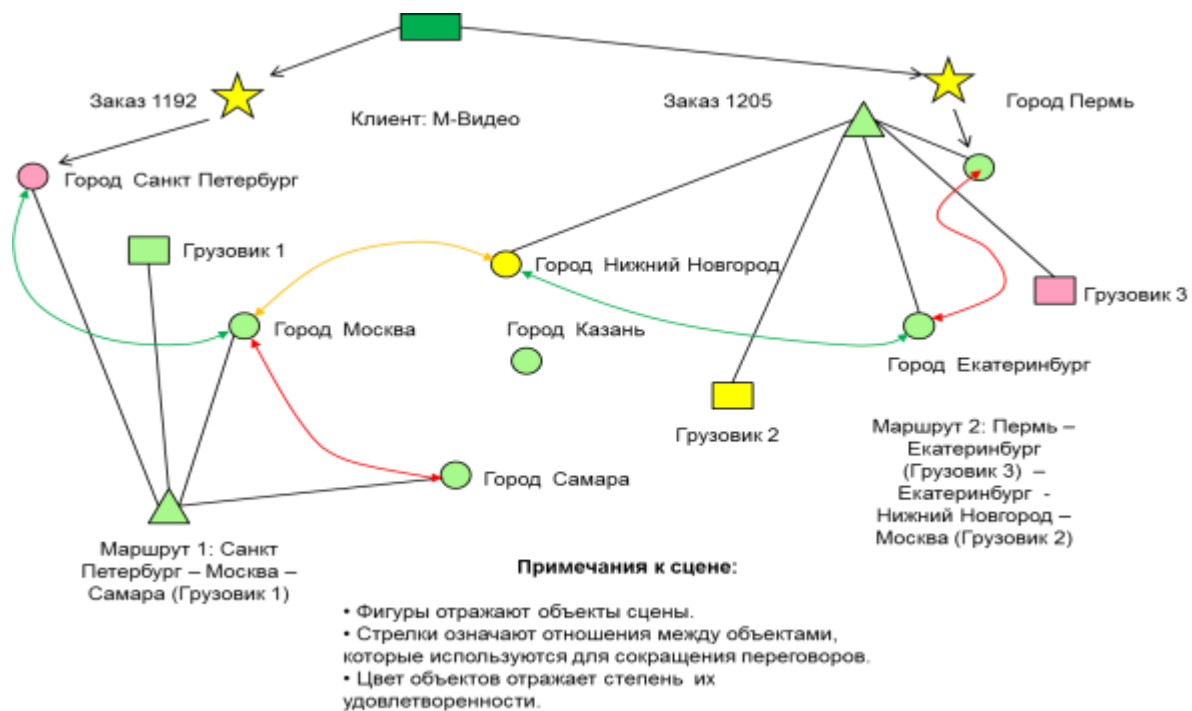


Рисунок 3.4. Пример сцены ПВ-сети мира транспортной логистики

Аналогичные примеры можно легко привести для других сфер применения, например, в цехах на фабриках - это продукция, инструменты, станки и рабочие, ТО станков и т.д.

Наличие сцены мира позволяет существенно снизить издержки на переговоры, поскольку каждый агент может проследивать связи между элементами и использовать эту информацию в ходе выработки и принятия решений.

Разработанный подход к созданию ПВ-сетей был успешно применен для ряда промышленных приложений [12-15].

### 3.6. Модели микроэкономики агентов

Согласно предлагаемому подходу, любому реальному предприятию в соответствие может быть поставлена его действующая мультиагентная компьютерная модель (ПВ-сеть), организованная как мир виртуального рынка, в котором агенты имеют собственные счета и накопления, покупают и продают услуги, а также платят налоги по заключению контракта, на коммуникации и другие.

При этом уровень детализации основных структур предприятия может простирается не только до подразделений или отдельных людей, но делать активными любую мельчайшую физическую или абстрактную сущность предприятия. Так, в этой модели не только мастер участка или рабочий, но и сам каждый станок может заботиться о своей загрузке, не надеясь на человека. Каждая деталь может беспокоиться о своем пролеживании на складе и искать варианты скорее войти в следующий заказ, чтобы цена не стала слишком высокой. Аналогично, могут становиться активными и абстрактные сущности: заключенный договор напомнит об о прошедшем сроке оплаты, денежные поступления запустят пересчет прибыли по проекту, а затраты найдут свою графу расходов.

В результате в предлагаемой модели предприятия вместо отдельных людей (менеджеров, диспетчеров, мастеров, рабочих, водителей и др.), которым всегда слишком трудно уследить за меняющейся ситуацией, начинает моделироваться и работать в реальном времени «муравейник» виртуального рынка агентов, в котором лицами, принимающими и согласовывающими решения, становятся любые физические или абстрактные сущности,

включая станок, деталь и т.д. Все эти агенты на виртуальном рынке являются равными в правах и могут выполнять свои задачи только через проведение коммерческих переговоров и заключение сделок с другими агентами, но в отдельных случаях – и с пользователями.

Виртуальные деньги являются прямым аналогом энергии, питающей процессы самоорганизации в природных или социальных системах. Заказ или ресурс, обладающей большей энергией, может получить больше вариантов принятия решений, запустить более длинную цепочку изменений, внести больше изменений в формирующийся результат и т.д. Налоги, собираемые с агентов, в свою очередь, могут динамически меняться от ситуации и служить для управления процессами на виртуальном рынке или быть использованы системой для точечных инвестиций в «узкие места» результирующего решения для его улучшения.

Важной особенностью микроэкономики виртуального рынка является возможность адаптивного пересмотра ранее заключенных договоренностей между агентами с использованием метода компенсаций. Основной принцип при этом заключается в том, что, если для нового заказа невозможно найти подходящие свободные ресурсы, то его агент может сделать предложение агенту уже занятого ресурса, которое будет включать динамически формируемую компенсацию за отмену предыдущего назначения. Такое предложение может вызвать волну новых переговоров, включая переговоры об отмене установленного до этого назначения ресурса на заказ и поиск нового ресурса для освободившегося заказа. Волна этих процессов может распространиться дальше и на несколько ранее сделанных назначений. Виртуальные деньги, доступные для оплаты компенсаций в этой цепочке переговоров, снимаются со счетов агентов, которые предлагают провести переназначение, что существенно сокращает перебор вариантов и позволяет волне быстро затухать. В исключительных случаях, когда заказ прибывает от VIP-клиента, агент компании может не брать компенсацию, чтобы гарантировать выполнение VIP-заказа, даже если это обернется затратами для предприятия, или наоборот, стимулировать длинные волны переговоров, если у системы есть большой запас времени на поиск лучших решений.

Ключевыми понятиями в микроэкономике принятия решений каждого агента являются:

- ценность решения, отражающая прирост удовлетворенности агента результатом (рост прибыли, охвата рынка, снижения затрат, увеличения качества обслуживания, удовлетворенности клиентов, благосостояния сотрудников предприятия и т.д.);
- стоимость решения, которую агент (предприятие) готов заплатить за улучшение ценности решения.

В зависимости от ситуации на виртуальном рынке могут иметься очень ценные решения, но которые имеют слишком высокую стоимость, которая окажется недоступна агентам, при этом наличие определенной суммы денег на счету агента может служить отсечкой для развития процесса поиска решений в глубину и в ширину.

Для работы агентов в ПВ-сети предлагаются различные модели микроэкономики агентов, учитывающие удовлетворенность агентов, предлагающие разные механизмы расчета виртуальными деньгами, принимающие во внимание силу связей и т.д.

В настоящее время выделяется 2 основных типа микроэкономики агентов на виртуальном рынке:

- *микроэкономика 1-го рода* – физические стоимости производства или транспортировки продукции, которая в смете расходов любого рассматриваемого предприятия обычно моделируется прямыми расходами (например, амортизация, зарплата водителя и т.д.);
- *микроэкономика 2-го рода* – стоимость работы «управленческого офиса» агентов: диспетчеров, менеджеров, логистов и других специалистов по поиску решений (например, по построению расписания), которая обычно скрыта в накладных расходах предприятия.

Для пояснения этих типов микроэкономик рассмотрим пример мультиагентной системы для грузовых перевозок в реальном времени. Легко представить себе производственное здание такой транспортной компании размером в 2 этажа, в котором на первом этаже размещается сам гараж с машинами, а на втором – офис, куда звонят или куда приходят клиенты. Тогда микроэкономика 1 рода определит стоимость работы грузовиков из гаража компании (первый этаж), а микроэкономика 2 рода – работу ее офиса (второй этаж), принимающего заказы, ведущего переговоры с заказчиками, строящего маршруты и расписания, выдающего накладные и путевые листы водителям, считающим их зарплаты и т.д.

Заметим у, что в некоторых случаях в себестоимости исполнения некоторого заказа на перевозку груза на короткую дистанцию стоимость его планирования может быть даже больше, чем стоимость физической перевозки.

При этом обычно рассматривается две модели учета расходов – на основании фиксированных расходов (fixed costs), когда стоимость ресурса для заказа рассчитывается по заданному тарифу, или с разделяемыми затратами (shared costs), когда стоимость динамически определяется от загрузки ресурса, и может снижаться с ростом загрузки, т.к. все заказы делят между собой общую стоимость ресурса (например, грузовика при перевозке).

Для управления процессами самоорганизации агентов в системе, направленными на поиск решений, как уже отмечалось выше, могут быть введены налоги, которые могут взиматься за бронирование ресурса или заключение контракта, «проживание» (нахождение) элемента сети в расписании, переговоры (коммуникации) агентов, перестройку расписания, установление или разрыв связи и т.д. Кроме того, налоги могут быть динамическими - например, налог на перепланирование может возрасти при приближении к времени отправления грузовика, чтобы постепенно «замораживать» расписание.

Заметим, что при этом в системе всегда имеется и может быть в любой момент отображена полная индивидуальная информация по каждому заказу, продукту или ресурсу, например, для продукта можно увидеть, где он был произведен, сколько времени он провел на складе, сколько это стоило, как часто он перемещался и т.д.

Данная информация является ключевой для анализа продуктивности и эффективности любого предприятия и принятия управленческих решений в реальном времени.

## 3.7. Как достигать качества решений с ростом сложности и динамики?

Здесь мы подходим к ответу на главный вопрос книги - зачем следует применять мультиагентные технологии для управления ресурсами?

*Главный смысл применения мультиагентных технологий для решения задачи управления ресурсами состоит в том, чтобы обеспечить высокое качество решения, которое должно приближаться или превосходить качество решения данной проблемы человеком (“To Be Better than Humans”), причем в особенности при принятии решений по событиям в реальном времени.*

В этих целях для построения плана (расписания) группы ресурсов в любой предметной области предлагается, прежде всего, создавать мультиагентную модель данного предметного мира, в которую включать агентов, отражающих все многообразие интересов, которые влияют на качество решения. Для любого предприятия, как правило, это будут интересы заказчиков и поставщиков, а также собственных ресурсов и внешних партнеров. Детализируя этот подход, легко увидеть интересы каждого заказа в отдельности, а также интересы конкретных людей, машин и оборудования. Еще шаг – и открываются интересы отдельных задач и операций, материалов и инструментов и т.д. Очевидно, что наилучшим (разумным) решением, отражающим глубокий здравый смысл, при этом будет считаться решение проблемы, в

которой достигнут баланс интересов всех участников (консенсус), который позволяет «гармонизировать» текущую ситуацию путем удовлетворения всех сторон в пределах заданных ограничений, включая интересы объединяющего всех участников целого.

Подчеркнем, что в предлагаемых методах управления ресурсами каждый агент может стараться полностью «эгоистично» добиться результата, но при столкновении своих интересов с другими агентами должен путем переговоров и взаимных уступок решать возникающие конфликты в интересах системы (предприятия) в целом.

Такой подход позволяет далее вводить и новые факторы, двигаясь не в сторону привычных упрощений, а наоборот, в сторону усложнения решения, например, если в управление грузовиками можно будет ввести контур планирования ТО или смен водителей в связке с грузоперевозками.

Действительно, для получения хорошего плана (расписания) поездок грузовиков в рассматриваемых выше примерах из мира грузоперевозок каждому диспетчеру приходится учитывать очень много самых разных факторов: каковы экономические условия в соглашении с каждым клиентом, как успешно выполнялись заказы в прошлом (от этого зависит уровень сервиса), груз пищевой или промышленный, опасный или нет, надо ли обеспечить температурный режим и режим совместимости, какие правила погрузки-выгрузки должны соблюдаться, какова прибыль по заказу, каковы сроки доставки, где лучше заправиться и многое другое.

Но какие из перечисленных параметров особенно важны в эту данную минуту для принятия решения, а какими можно пожертвовать, и до какой степени?

Как выясняется, еще одна трудность в принятии решений по управлению ресурсами состоит в том, что приоритеты или веса критериев принятия решений часто зависят от ситуации и к тому же еще могут динамически меняться в ходе принятия решений. Например, если план по прибыли уже выполнен, график движения может быть менее напряженным и можно больше времени дать водителям отдохнуть.

В рассматриваемых приложениях, в нашем сложном и динамичном мире, следует всегда исходить из того, что сложность в будущем будет только нарастать и создав однажды мультиагентную систему управления своими ресурсами, заказчик обязательно пойдет дальше и захочет учитывать при планировании особенности работы водителей, планы по техосмотру или предпочтительные места заправок и т.д. Ввод каждого нового фактора, и соответствующего ему агента, будет каждый раз еще более усложнять поиск баланса интересов, но и одновременно, все больше приближать качество решения к реальности, к качеству решений, достигаемых хорошо подготовленными и опытными диспетчерами.

Рассмотрим примеры задач и решений для достижения многофакторного консенсуса в области управления грузовыми перевозками.

К примеру, что делать в ситуации, когда техосмотр (ТО) попадает на выгодный заказ – какова будет логика принятия решений диспетчером? На практике ответ очевидный – если заказ очень выгодный, то плановый ТО может быть всегда немного сдвинут для обычного грузовика, но, и наоборот, для проблемного грузовика лучше не рисковать, а сделать ТО даже с опережением.

Это означает, что требуется ситуационный поход к принятию решений.

В таком подходе агент ТО должен оценить вероятность поломки и прогнозируемую стоимость ее устранения (с учетом вероятности) по уже имеющемуся набору записей о поломках. Для старого грузовика – вероятность будет большой и цена возможного ремонта в пути при поломке будет значительна, для нового – значительно меньше. Если цена ремонта при очень вероятной поломке больше, чем вся прибыль от рассматриваемого в текущий момент заказа –

машина обязательно должна пойти на техосмотр, и наоборот, т.е. каждый раз все снова и снова решается по ситуации.

Другими словами, становятся необходимы некоторые «счетчики» в логике работы агентов, аккумулирующие (накапливающие) информацию о поездках, которые затем используются в решающем пороговом правиле, результат которого каждый раз будет зависеть от истории и текущей ситуации.

Аналогичным образом, можно решать новую проблему с водителями-иностранцами из ближнего зарубежья (например, белорусами), которых все больше нанимают на работу в российских транспортных компаниях. Суть проблемы в том, чтобы давать этим водителям возможность хотя бы раз в месяц заезжать домой.

В этих целях предлагается следующим образом построить процесс принятия согласованных решений. Пусть при каждом новом заказе в Европу агент водителя-белоруса активируется и смотрит, когда последний раз он был дома, и чем больше этот срок – тем выше неудовлетворенность агента водителя, которая постепенно нарастает с ростом времени. По просьбе агента водителя агент маршрута всякий раз пробует пересчитать маршрут с заездом домой и также рассчитывает потерю прибыли от получающегося крюка домой к водителю. Если эта потеря прибыли заказа меньше, чем выигрыш в приросте удовлетворенности агента водителя, что соответствует ситуации, что водитель давно не был дома и заказ проходит рядом с его домом, то новый маршрут с заездом домой принимается.

В этих целях выигрыши по разным критериям должны быть сопоставимы в рамках единой валюты, которой и выступают виртуальные деньги. При этом также может быть использован вес критериев, который помогает управлять важностью (приоритетами). Для хорошего водителя компания может начислять больше таких условных баллов вместо обычно принятой «доски почета» и он будет много чаще заезжать домой по сравнению с другими водителями, что сделает водителя более заинтересованным в работе с данной компанией. Точно также можно учитывать качество выполнения работ рабочим и лучшим из них выдавать наиболее выгодные заказы и т.д.

Таким образом, принятие во внимание интересов всех участников, в данном примере грузовой компании - до уровня водителей, делает процесс принятия и согласования решений более сложным, но с другой стороны, открывает новые возможности по повышению качества и эффективности решений для предприятия в целом. Ведь учет интересов клиента позволит не потерять клиента, а учет интересов водителя – не потерять хорошего водителя, что в условиях высокой конкуренции и растущего хронического дефицита квалифицированных кадров водителей становится критически важным для любого предприятия.

*Возможные преимущества от поддержки роста сложности и, как следствие, качества решений в мультиагентных системах, при этом противостоящих столетиями доминировавшему редуционизму (стремлению к упрощению) в науке, трудно переоценить.*

Действительно, пока всеми этими заново «взвешиваемыми» в каждой ситуации решениями занимается человек-диспетчер, весьма высока вероятность ошибки, напрямую влияющей на прибыльность бизнеса. И при этом самый главный в современной экономике ресурс знаний организации всегда скрыт в голове диспетчера, логика принятия им решений никем не может быть легко проверена, хотя на практике бывает, что водители просто договариваются с диспетчерами за определенную плату на передачу выгодных им заказов. За счет формализации и автоматизации процесса формирования, выбора и согласования решений появляется возможность на деле применять ситуационный подход и строить более разумные и гармоничные расписания, при этом корректируя критерии по ситуации или в будущем давая системе самой возможности для саморегуляции (меньше ДТП или задержек – больше баллов успеха для водителя – больше премии каждому и больший учет его пожеланий по заезду домой).



*Еще одним важным преимуществом использования мультиагентных технологий для управления ресурсами является возможность работы в реальном времени, когда качество и эффективность принимаемых решений напрямую зависит от момента времени, чуть задержался – и заказ ушел из-за дефицита ресурсов или, наоборот, возник избыток и простой дорогостоящих ресурсов.*

Рассмотрим простой пример: грузовик из Екатеринбурга разгружается в Казани и планирует идти за следующим заказом в Нижний Новгород. В этот момент приходит заказ из Казани в Екатеринбург. Система решает перебросить данный заказ на данную машину, а на заказ в Нижнем передать другую скоро освобождающуюся машину из Самары. Очевидно, что через пару часов принимать такое решение будет поздно, ведь машины уйдут в очередные рейсы – надо принимать решение здесь и сейчас.

Другой пример важности принятия решений в реальном времени: машина задерживается на разгрузке, и система это «понимает» и перепланирует план-график движения грузовика. Если вдруг возникает угроза опоздать к клиенту, система начинает планировать, как поступить: просить менеджера звонить на склад клиента и устроить «скандал» поставщику для ускорения загрузки (с получением материальной компенсации – для оплаты штрафа за возможное опоздание), или послать второго водителя для «нагона» графика или, если нет других вариантов, как можно быстрее известить заказчика о задержке и просить разрешения перенести сроки разгрузки.

В результате, в рамках ПВ-сети динамически самоорганизуется многофакторный план распределения возможностей по потребностям, открытый для любых изменений. При возникновении нового события может быть начата адаптивная перестройка связей агентов потребностей и возможностей в ПВ-сети, причем только тех, кто оказался зависим от события, которая заканчивается, когда найден новый консенсус между агентами, и ни один агент не может более улучшить ситуацию (динамический останов).

Тогда решение может быть выдано пользователям для окончательного принятия или интерактивной или ручной доработки.

Данный подход позволяет создать действующую компьютерную модель предприятия как совершенно новую модель непрерывно самоорганизующегося социально-экономического «организма» из согласованно действующих агентов, устроенную подобно рою пчел или колонии муравьев, открытую к изменениям, гибкую и эффективную, производительную, надежную и живучую.

Предлагаемый подход становится все более востребован современными предприятиями для повышения эффективности использования ресурсов за счет перехода к управлению ресурсами в реальном времени.

### 3.8. Метод компенсаций для адаптивного планирования ресурсов в ПВ-сетях

Дадим более формализованное описание рассмотренного выше метода, подробно обсужденного выше на примерах из реальной жизни грузовой компании.

Предположим, что перед мультиагентной системой стоит задача распределить число  $n$  ресурсов по  $m$  потребностям.

Каждый ресурс характеризуется:

- набором  $f$  атрибутов;
- стоимостью ресурса, выраженной в денежных единицах (д.е.)

Каждая потребность характеризуется:

- набором **g** атрибутов;
- покупательной способностью потребности, выраженной в денежных единицах (д.е.).

Как правило, потребности поступают в систему одна за другой, причем время их поступления и их характеристики являются непредсказуемыми.

Количество и характеристики ресурсов могут быть постоянными или меняющимися с течением времени.

В этих условиях процесс распределения будет выглядеть следующим образом:

1. Когда в систему поступает потребность, ей присваивается Агент, который отправляет сообщение всем агентам имеющихся ресурсов о том, что ему требуется ресурс с определенными характеристиками, и он может заплатить за этот ресурс определенное количество денежных единиц.

2. Все агенты ресурсов, обладающие всеми необходимыми характеристиками (или частью из них, но имеющие стоимость, равную или меньшую указанного количества д. е.), предлагают эти ресурсы Агенту потребности.

3. Агент потребности выбирает наиболее подходящий вариант из предложенных ему ресурсов.

4. Если все подходящие ресурсы оказываются занятыми, Агент потребности пытается получить ресурс, который уже привязан к другой потребности, предлагая назначенному ей Агенту рассчитать требуемую компенсацию.

5. Агент потребности, который получает предложение о компенсации, рассматривает его, но принимает его, только если размер компенсации позволяет ему впоследствии приобрести другие подходящие ресурсы и одновременно увеличить ценность решения. Если он принимает предложение, то первый упомянутый Агент потребности реорганизует связи в системе: ранее установленная связь потребности с ресурсом разрушается, и вместо этого устанавливается новая связь другой потребности со свободным ресурсом, если данная операция увеличивает ценность решения. Это – пример самоорганизации с внутренним изменением связей.

6. Вышеупомянутый процесс повторяется до тех пор, пока все возможности не будут связаны с потребностями, и изменение существующих связей более не позволит увеличить ценность решения в пределах заданного коридора изменений  $E$ . Или до тех пор, пока не истечет интервал времени  $T$ , отведенного на решение задачи.

7. Перед каждым действием агенты могут обращаться к базе знаний, чтобы получить информацию о том, какие действия они могут предпринимать.

Этот процесс определяет метод самоорганизации, позволяющий организовать решение сложных задач в любой открытой системе, как будет показано ниже, от транспортной и производственной логистики – до кластеризации и понимания смысла фраз и предложений на естественном языке.

#### Пример самоорганизации в транспортной логистике

Рассмотрим пример из области грузовых авиаперевозок, где существуют: а) сеть грузовых терминалов; б) маршруты между этими терминалами; в) два грузовых воздушных судна, которые транспортируют груз по этим маршрутам (Рисунок 3.5).

Один из грузовых самолетов обладает большой грузоподъемностью (20 тонн), но небольшой скоростью (500 км в час); его эксплуатационные расходы довольно высоки – 7 денежных единиц на километр (д.е./км).

У другого грузового самолета грузоподъемность меньше (10 тонн), но скорость выше (750 км в час). Его эксплуатационные расходы составляют 3 д.е./км.

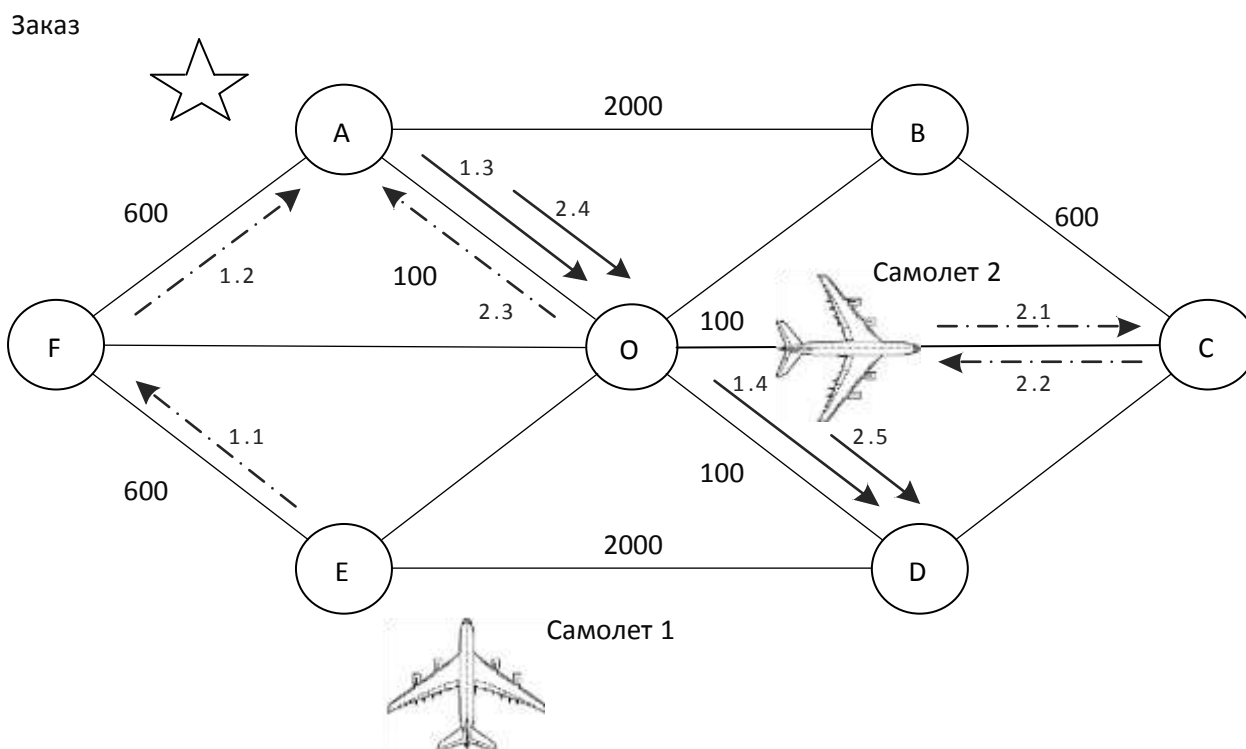


Рисунок 3.5. Транспортная сеть грузовых авиаперевозок (цифры отражают расстояния)

*Ситуация 1.* Пусть система получает заказ на транспортировку 5-тонного груза из точки А в точку D (расстояние в 2000 километров) за 30 000 д.е. Срок доставки –1 день. Самолет 1 свободен и находится в терминале Е, в то время как Самолет 2 транспортирует ранее принятый заказ к терминалу С.

Чтобы спланировать работу, создается Агент заказа 1. Агент отправляет обоим самолетам подробные данные по заказу на транспортировку. Рассмотрев эту информацию, Агент каждого самолета отправляет предложение к Агенту Заказа 1.

Самолет 1 сразу готов начать транспортировку. Чтобы принять заказ, самолет должен вылететь от терминала Е к терминалу А (1200 км). Стоимость этой операции:  $(1200 + 2000) * 7 = 224000$  д.е.; и время, требуемое для ее выполнения:  $(1200+2000)/500=6.4$  часа.

Самолет 2 должен будет сначала завершить текущую транспортировку, а затем отправиться к терминалу А, чтобы взять на себя выполнение нового заказа. Если Самолет 2 в настоящее время находится в точке О, ему нужно будет пройти маршрут О – С – О – А. Время, которое для этого потребуется:  $(1000+1000+1000+2000)/750=6.67$  часа, т.е., также укладывается в 1 день, и стоимость составит:  $(1000+1000+2000) * 3 = 12000$  д.е. Прибыль Самолета 2 и Самолета 1 составит 18 000 д.е. и 7600 д.е. соответственно.

Учитывая, что остальные условия равны, Агент заказа 1 выберет самолет, который максимизирует прибыль предприятия, в нашем случае это – Самолет 2 несмотря на то, что путь до точки А займет у него больше времени. В результате этого решения в системе была создана первая связь между заказом (Заказ 1) и ресурсом (Самолет 2), как показано на Рисунке 3.6.

Связь 5 указывает на то, что для Заказа 1 был выбран Самолет 2.

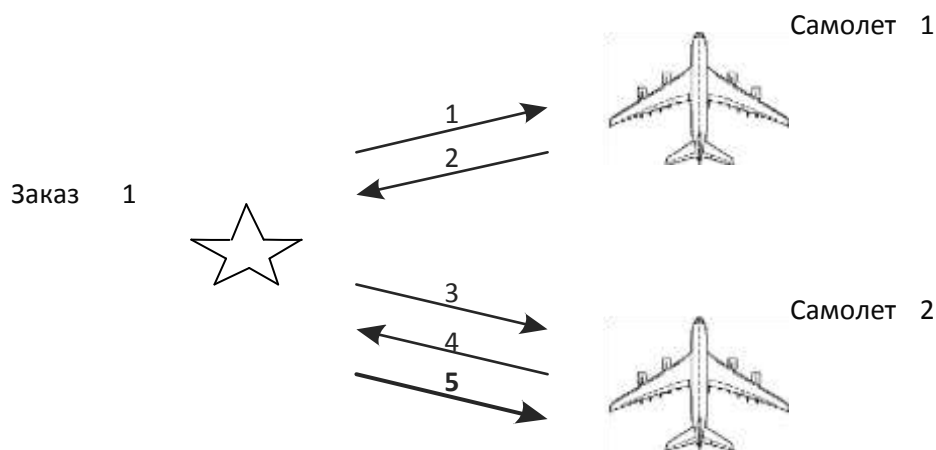


Рисунок 3.6. Агент Заказа 1 находит два доступных самолета и выбирает Самолет 2 для выполнения своего заказа

- 1 – Агент Заказа 1 отправляет данные о заказе Агенту Самолета 1
- 2 – Агент Самолета 1 отправляет предложение Агенту Заказа 1
- 3 – Агент Заказа 1 отправляет данные по заказу Агенту Самолета 2
- 4 – Агент Самолета 2 отправляет предложение Агенту Заказа 1
- 5 – Самолет 2 назначается на Заказ 1

Ситуация 2. Предположим, что несколько минут спустя системой был получен новый заказ на грузовую транспортировку: 2-х-тонный груз необходимо доставить из точки С в точку В (600 км) за 20 000 д.е. через 6 часов в этот же день.

Для обработки этой задачи создается Агент Заказа 2.

В данной ситуации очевидно, что только Самолет 2 может выполнить этот заказ: Самолет 1 не может выполнить работу в срок, поскольку ему необходимо  $(2000 + 1200)/500 = 6.4$  часа.. А Самолету 2 было бы достаточно  $(1000 + 1200) / 750 = 2.9$  часа.

Однако Самолет 2 был уже назначен на Заказ 1.

В этой ситуации запрос Агента Заказа 2 Агенту Самолета 2 создает следующую цепочку переговоров (Рисунок 3.7):

- Агент Самолета 2 отправляет сообщение Агенту Заказа 1, в котором предлагает отменить назначение на Заказ 1 для выполнения Заказа 2, и готов выплатить неустойку за срыв уже данных обязательств.
- Агент Заказа 1 проверяет возможные варианты. Он снова связывается с самолетами (6) и получает от Самолета 1 то же предложение (7) с выполнением работы в срок, которое было ранее отклонено т.к. оно было менее выгодным (7600 д.е. по сравнению с 18 000).
- Агент Заказа 1 устанавливает Агенту Самолета 2 (8) размер неустойки (1600 д.е.).
- Самолет 2 принимает информацию к сведению (9).
- Агент Заказа 2 рассматривает предложение о компенсации от Агента Самолета 2. Если он назначит Самолет 2 на Заказ 2, то его прибыль составит:  $20\ 000 - (1000 + 1200) * 3 = 13\ 400$  д.е. Поэтому компенсация, которую нужно заплатить Агенту Заказа 1, значительно меньше, чем прибыль, которую Агент Заказа 2 получит от сделки. Агент Заказа 2 выбирает Самолет 2 (10).

- Самолет 2 подтверждает Заказ 2 (11).

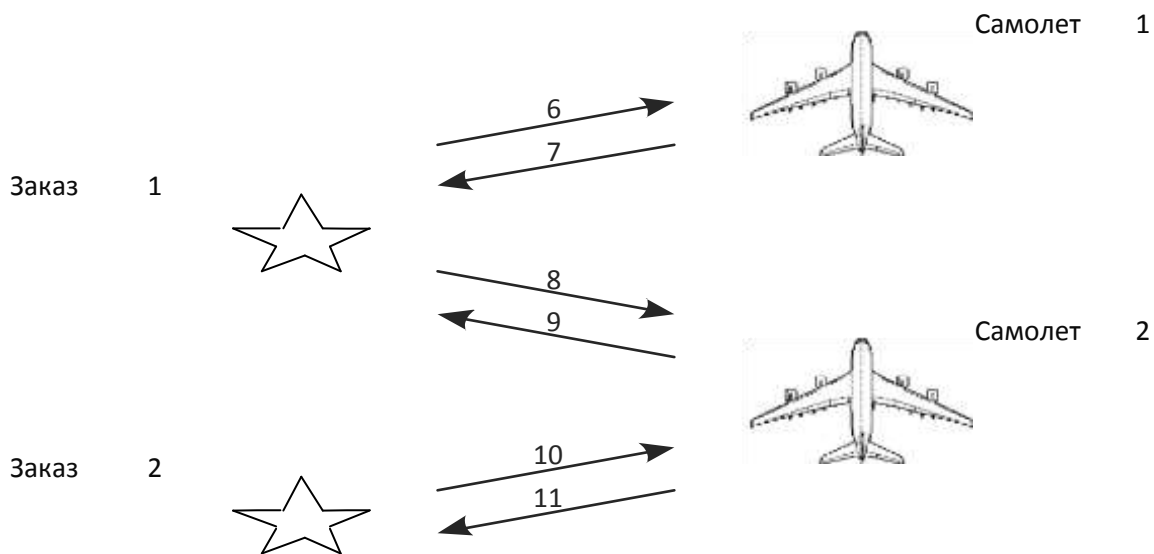


Рисунок 3.7. Агент Заказа 2 назначает Самолет 2 на выполнение своего заказа

Указанные выше примеры показывают, как самоорганизация группы агентов позволяет легко адаптироваться к новым событиям.

### Пример самоорганизации в электронной коммерции

Рассмотрим пример продажи автомобилей некоторой международной компанией через Интернет-портал. Пусть данная фирма представляет собой сеть дилеров в Германии и Бразилии, в ее собственности находятся склады и грузовые автомобили для доставки продаваемых машин (Рисунок 3.8).

По одному агенту присваивается каждому из перечисленных далее объектов или действий: заказу, дилеру, складу, единице транспортировки, слоту (месту) для транспортировки, погрузке при транспортировке и автомобилю. Эти агенты способны не только продавать автомобили (что также могут делать агенты существующих систем электронной коммерции), но и гибко действовать в динамично изменяющейся среде, увеличивая прибыль торговой сети и удовлетворяя требованиям всех клиентов. Все это возможно благодаря их способности как заключать, так и расторгать договоры, пересматривать их или изменять параметры действующих договоров с разрешения покупателей и продавцов.

Заказ 1 оформлен на покупку красного кабриолета Мерседес за 50000 д.е., который необходимо доставить в Бразилию. За автомобиль уже заплатили, и прямо сейчас доставляющий его грузовой транспорт находится в 300 метрах от дома клиента. Клиент ждал свой кабриолет месяц.

Другой клиент в Германии планирует жениться через 2 недели и хочет купить точно такой же автомобиль к своей свадьбе к требуемому сроку. Дилеры в Германии не смогли найти такой автомобиль на своих складах. Чтобы доставить красный Мерседес Клиенту 2, система попытается создать альтернативное предложение для Клиента 1, от которого будет трудно отказаться.

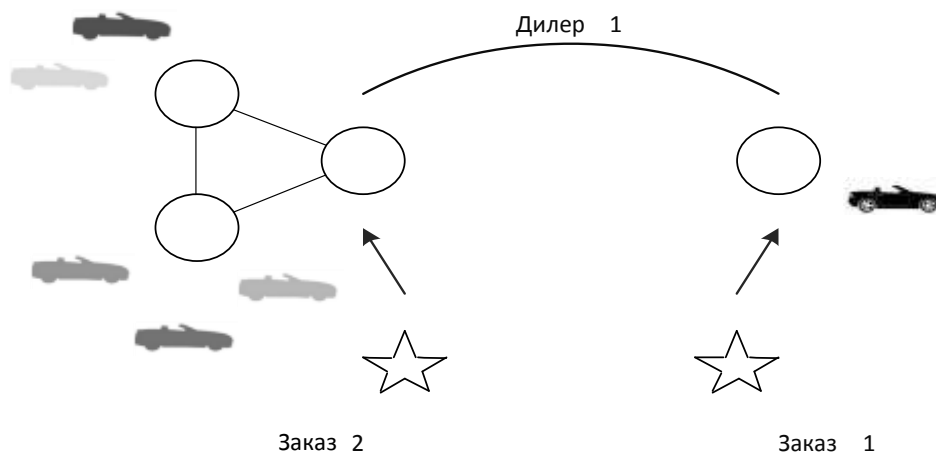


Рисунок 3.8. Сеть дилеров, заказов и автомобилей на складах

Для этого, Агент Заказа 2 отправит сообщение Агенту Автомобиля 1 с предложением выплатить неустойку в обмен на смену клиента. Агент Автомобиля 1, в свою очередь, отправляет сообщение Агенту Заказа 1, запрашивая разрешение поменять клиента с выплатой возможной компенсации, размер которой будет установлен в ходе переговоров для покрытия ущерба и формирования нового выгодного предложения.

В ответ на это Агент Заказа 1 рассматривает ситуацию и все возможные решения, исходя из собственных интересов и интересов покупателя. В первую очередь, он обратится к дилеру в Бразилии, чтобы узнать, как быстро можно доставить новый такой же автомобиль. Предположим, что другой Мерседес можно привезти в течение месяца, таким образом, удваивается время ожидания первого клиента. В соответствии с простой стратегией пропорциональной компенсации Агент Заказа 1 просит Агента Заказа 2 об оплате 50% стоимости автомобиля для компенсации удвоенного времени ожидания. Чтобы получить разрешение на сделку, Агент Заказа 1 связывается с Клиентом 1, например, отправив сообщение на его мобильный телефон, и предлагает 50% скидку в обмен на согласие ждать еще месяц. Если Клиент 1 соглашается, Агент Заказа 1 отменяет заказ Автомобиля 1 и заказывает Автомобиль 2. Агент Заказа 2, в свою очередь, назначается на Автомобиль 1 за цену, которая теперь равняется ее начальной цене плюс размер компенсации,  $50\,000 + 25\,000 = 75\,000$  д.е.

Теперь Агент Заказа 2 должен согласовать с Lufthansa доставку автомобиля назад в Германию в течение 2 недель. Предположим, что Lufthansa соглашается (даже если все полеты были забронированы, Агент компании может договориться с Агентами, представляющими другие крупногабаритные грузы, чтобы те за еще одну дополнительную компенсацию отдали их транспортировочные слоты). Принимая в расчет все компенсации, доставка автомобиля назад в Германию будет стоить 4 000 д.е., а полная стоимость автомобиля составит  $50\,000 + 25\,000 + 4\,000 = 79\,000$  д.е.

Данная цена будет предложена Клиенту 2, который получит отчет о переговорах и увидит историю формирования и согласования решения, объясняющую предлагаемую цену и сроки. Он может либо принять это предложение (в этом случае грузовой транспорт с автомобилем сразу остановится - в 200 метрах от дома Клиента 1 и повернет назад к аэропорту), либо отклонить его, если посчитает предложение слишком дорогим (в этом случае все достигнутые соглашения будут расторгнуты, и изначальная ситуация будет восстановлена).

Обратим внимание на то, что в конечном счете оба заказа выполняются успешно, несмотря на происходящие радикальные изменения в требованиях клиентов и прямые конфликты между ними, а в результате все агенты выигрывают и получают дополнительную прибыль, удовлетворяя требованиям каждого участника сделки (Клиента 1, Клиента 2, Lufthansa, завода Mercedes и его дилеров).

Агенты решают задачи и достигают результат, изменяя уже установленные договорные отношения между участниками рынка: фактически, агенты заново продают товар, который был уже продан, т.е. динамически распределяют и перераспределяют ресурсы. Этот пример также показывает, что для повышения гибкости в логистике и электронной коммерции не должно быть фиксированных цен и сроков доставки: все должно зависеть от требований клиентов и ситуации на рынке.

Разработанный метод был впервые применен для решения сложных логистических задач, а далее был развит для понимания текстов и извлечения знаний из баз данных методом кластеризации [16-18].

### 3.9. База знаний для адаптивного планирования

В рассмотренных выше примерах знания о предметной области, например, транспортной логистики, играли ключевое значение для принятия решений агентами при управлении ресурсами.

Можно ли создать мультиагентную систему хотя бы относительно универсальной и легко настраиваемой на особенности различных предметных областей?

Один из возможных подходов связан с созданием баз знаний на основе онтологий, представленных семантическими сетями понятий и отношений предметной области.

Понятие «онтология» получила активное развитие в последнее время в связи с развитием направления семантического Интернета (Semantic Web), целью которого является представление информации о содержании Интернет страниц в виде, пригодном для компьютерной обработки - в настоящее время страницы «не знают», что именно в них содержится, что делает смысловой поиск очень ограниченным и, тем более не дает возможность программам рассуждать о содержимом или поддерживать диалог с пользователем.

В этом подходе в будущем каждая веб-страница и любой другой объект (видео и звук, текст и т.д.) могут иметь смысловую аннотацию содержания, т.е. страницы узнают, что в них находится.

В этих целях уже используется стандарт RDF, описывающий семантические сети (графы), в которых узлы и дуги имеют свои адреса и идентификаторы понятий и отношений. Утверждения, кодируемые с помощью RDF, в дальнейшем можно интерпретировать с помощью онтологий, созданных по стандартам RDF Schema и OWL, чтобы получать из них логические заключения.

Как правило, это связки типа «объект 1-отношение-объект 2», посредством чего может быть описана любая семантическая сеть.

База знаний содержит знания о предметной области, классы понятий и отношений, а также факты, касающиеся экземпляров этих понятий и отношений, необходимые агентам для выработки, принятия и согласования решений.

*Онтология* – часть базы знаний, которая содержит понятия, представленные сетью из:

1. Классов объектов.

2. Отношений между классами объектов.
3. Атрибутов классов объектов
4. Сценариев поведения класса объектов.

Классы объектов – это узлы, а отношения – связи между ними. Вместе с атрибутами и сценариями классы объектов и отношения содержат все знания, требуемые для работы мультиагентной системы.

Цели создания онтологий весьма разнообразны и могут включать:

- нормативная – унификация понятий и отношений предметной области;
- формирование электронного «толкового словаря» предметной области;
- автоматические рассуждения на основе знаний предметной области;
- автоматический контроль правильности входных данных;
- поддержка деятельности по накоплению, разделению и повторному использованию знаний предметной области (предприятия) в процессах принятия решений;
- построение самообучающихся систем за счет того, что знания отделены от программного кода;
- интегрирование междисциплинарных знаний различных пользователей.

В рассматриваемом случае предлагается использовать онтологии для настройки МАС для управления ресурсами на специфику предметной области и далее каждого конкретного предприятия;

Например, в онтологии управления производством (Рисунок 3.9) могут быть подробно описаны типы исполняемых заказов, производимые продукты, типы продуктов, технологические процессы и нормы времени, необходимые для их производства, необходимые станки, материалы и инструменты, затраты на производство и хранение на складах и т.д.

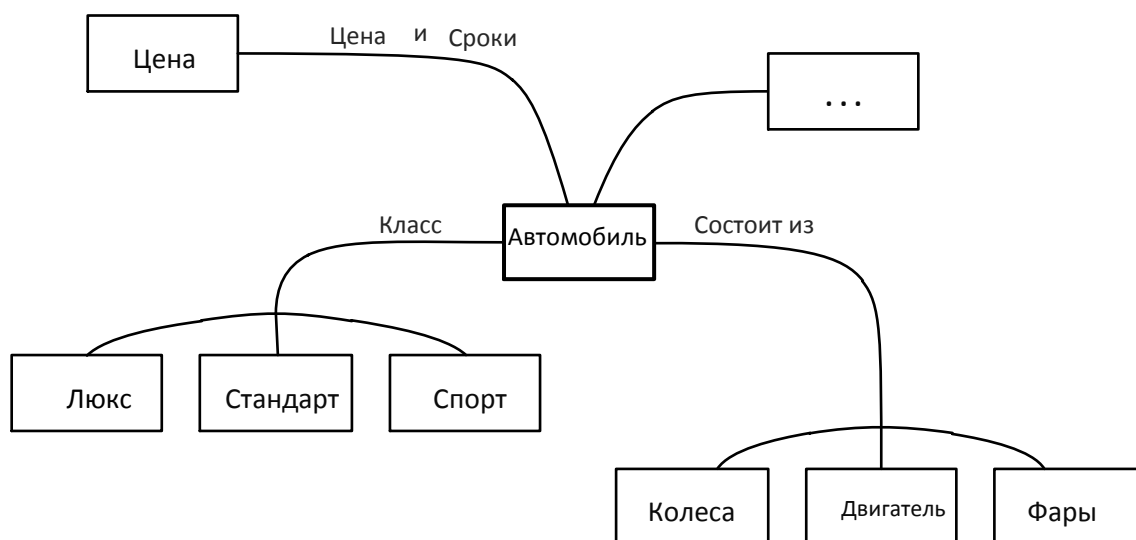


Рисунок 3.9. Фрагмент онтологии производства автомобиля

Сценарии расчета скидок могут включать следующие стратегии: «*постоянный клиент*» (в зависимости от количества предыдущих покупок), «*оптовая торговля*» (в зависимости от объема и частоты покупок), «*покупка с задержанной доставкой*» (потребитель оплачивает товар заранее дешевле и в течение определенного времени ожидает доставку), «*цены конкурентов*» (установление цен, примерно равных ценам конкурентов). Существуют также другие правила принятия решений: например, правила оценки доходности распределения ресурсов, критерии оценки, определенные потребителями, и т.д.



Текущее состояние виртуального мира, зеркально отражающего состояние внешней среды в определенный момент времени, называют сценой (ситуацией).

Сцены представляют модель текущей ситуации в ПВ-сети мира и могут храниться в традиционных базах данных.

Чем больше продуманных отношений «пронизывают» сцену, тем больше имеется возможностей для анализа ситуации и сокращения комбинаторного перебора в ходе адаптивного планирования и оптимизации ресурсов.

Например, если агент нового заказа знает город, «откуда» требуется везти груз, то по этому городу агент может быстро найти все грузовики, запланированные к выезду из него и проверить, какие грузовики выезжают отсюда в нужном ему направлении и попытаться встроиться в них прежде, чем пытаться строить новый маршрут и бронировать новый грузовик под свои нужды.

Тем самым сцена позволяет также резко сокращать полный перебор при поиске вариантов решений в транспортной логистике и других применениях.

### 3.10. Виртуальный мир

Виртуальный мир – это программная среда, в которой работают агенты и решается задача динамического распределения, планирования и оптимизации ресурсов.

Рассмотрим для примера самый простой виртуальный мир ПВ-сети, поддерживающий распределение ресурсов по потребностям вне времени и пространства, такой же, как и в примере с электронной коммерцией.

Агенты в виртуальном мире могут быть свободными (то есть могут не иметь никаких отношений с другими агентами), тогда они стремятся установить с ними отношения, пытаются соответствовать своим потенциальным партнерам. Свободные агенты в виртуальном мире постоянно ищут подходящие соответствия, рассматривают выгоду доступных связей и выдвигают предложения потенциальным партнерам. Связи между агентами устанавливаются только при согласии обеих сторон и при условии, что предложенное отношение является лучшим вариантом из всех доступных в настоящее время. Агент удовлетворен установленным отношением (что можно увидеть на пиктограмме, отражающей его состояние), если оно является более выгодным, чем в среднем по рынку или полностью соответствует его запросам. В противном случае отношение не устанавливается. Неудовлетворенность агента является причиной для пересмотра установленного отношения при первой новой возможности, о чем агент узнает из оповещений при подписке на определенные события, либо путем анализа сцены.

Если, исследуя рынок, активный агент не находит подходящего соответствия, он переходит в пассивное состояние и ожидает сообщений от других агентов или события, способного изменить ситуацию, например, появление новой потребности в ресурсах, и, соответственно, создание нового агента потребности. В любом из перечисленных случаев агент становится активным. Он возвращается назад в пассивное состояние, когда цепочка переговоров, сгенерированная в результате того или иного события, заканчивается. Агенты, которые установили отношения с другими агентами (достигли соответствия), могут также переходить в пассивное состояние: они включают свой таймер и ожидают лишь периодической инициализации.

После активации агентов сообщением, процесс реализуется в следующей последовательности. Сначала активируются свободные агенты, затем неудовлетворенные агенты, и последними активируются удовлетворенные агенты, чтобы в случае необходимости пересмотреть их связи на основе метода компенсаций

Рассмотрим взаимодействие агентов, используя пример, изображенный на Рисунке 3.10. Существует семь агентов, которые стремятся установить друг с другом отношения. Агенты потребностей окрашены в белый цвет, Агенты возможностей – в серый. Два агента слева уже установили отношение (сплошная стрелка между ними) и удовлетворены своей связью – их пиктограммы содержат улыбки. У трех агентов в центре также улыбающиеся лица: они находятся в процессе принятия решения и установления отношения (пунктирная стрелка). Группа справа находится в процессе принятия решения, но совершенно не довольна условиями (у них грустные лица), они, вероятно, не видят хороших возможностей соединения. Отметим, что активными могут быть как Агенты потребностей, так и Агенты возможностей (как показывают стрелки).

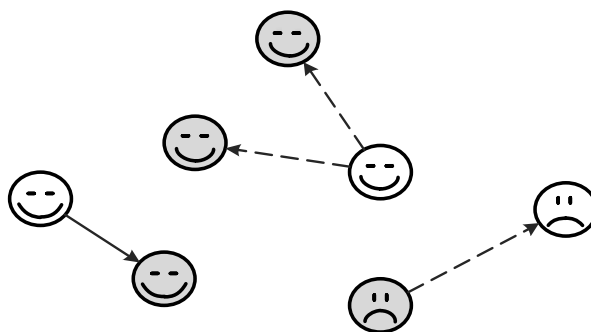


Рисунок 3.10. Сцена: сопоставление Агентов потребностей (белого цвета) и Агентов возможностей (серого цвета), отмечена их степень удовлетворенности

Как правило, агенты могут прекращать отношения только по взаимному согласию, но с некоторыми исключениями, которые будут обсуждены позже.

Для решения проблем логистики, необходимо рассматривать дополнительные факторы, начиная с пространства и времени.

Подразумевается, что необходимо построить карту грузовых терминалов и рекомендованных маршрутов (дорожных магистралей, воздушных и морских маршрутов, и т.д.) с соблюдением масштабов (упрощенный вариант такой карты изображен на рисунке 3.11), и разместить на ней возможные места размещения заказчиков и пункты назначений, склады, конвейеры, транспортные ресурсы и т.д. Также необходимо учитывать, в какое время должно быть выполнено распределение ресурсов по потребностям.

На программном уровне каждая сцена в системе определяется группами агентов или связей, выстроенных обычно в виде двусвязных списков<sup>5</sup>.

Такое построение позволяет планировщику переходить от любого агента или связи к его «соседу» по списку. Благодаря тому, что элементы этих списков ссылаются друг на друга, агенты способны обнаруживать необходимые связи или других агентов, связи с которыми уже были установлены.

На практике эти агенты и связи также разделены на группы активных и неактивных, а также удовлетворенных и неудовлетворенных агентов.

Такое разделение позволяет планировщику быстрее делать предварительную выборку, и тем самым снижает время на обработку задач системой.

<sup>5</sup> Двусвязный список (двунаправленный связный список) – список в котором каждый узел имеет ссылки, указывающие на предыдущий и на последующий узел в списке.

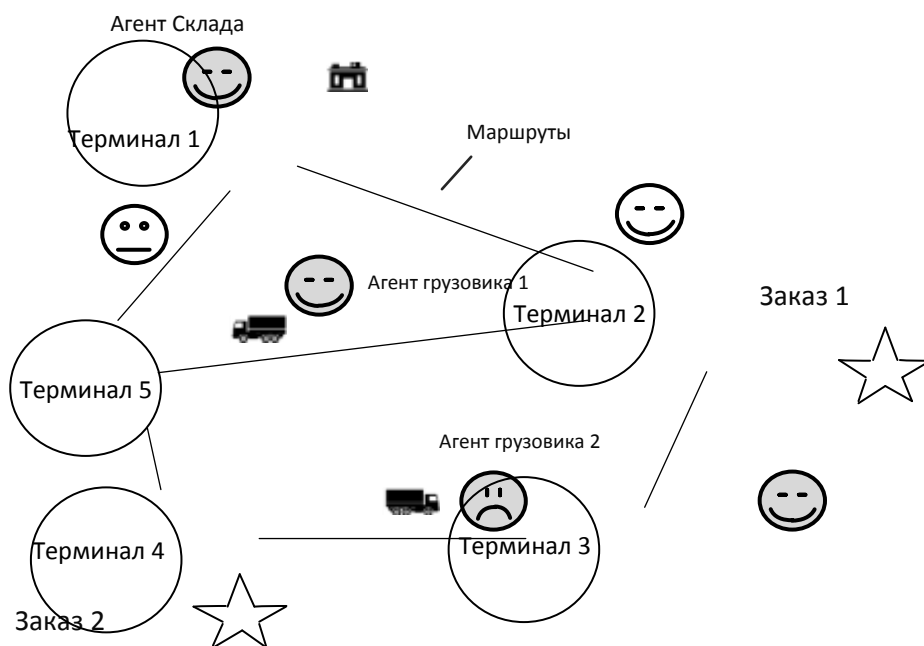


Рисунок 3.11. Сцена виртуального мира логистики

### 3.11. Машина принятия решений

Модуль принятия решений каждого агента включает в себя набор процедур и структур данных, которые типизируют и упрощают выполнение сценариев принятия решений. Эти процедуры могут быть написаны на специальном промежуточном языке, позволяющем обрабатывать структуру исходных данных и реализовывать такие действия, как: организация обмена информацией среди агентов, сбор информации о динамике спроса и предложения, поиск возможных связей между агентами, выбор лучших из них, принятие решений и их пересмотр в случае изменения ситуации.

Каждый агент определяется рядом свойств и их значений следующим образом: <Свойство 1 = Значение 1>, <Свойство 2 = Значение 2>, ... Чтобы узнать о свойствах агента и их значениях, другие агенты могут задавать ему соответствующие вопросы («У тебя есть такое свойство? Каково его значение?»).

Чтобы упростить логику сценария и сократить количество запросов, некоторые свойства могут скрываться от агентов. Принятие решений выполняется на основе полученной из сообщений информации, которая была определена заранее и содержится в модели мира и правилах поведения агента в различных ситуациях. Модель мира устанавливает, какие агенты и какого класса могут быть обнаружены в этом мире, какие отношения они могут иметь и какие действия могут быть с ними произведены.

Типичной структурой данных для принятия решений является таблица вариантов предложений с соответствующей информацией о параметрах каждого предложения. Пример такой таблицы для Агента потребностей в логистике приведен ниже.

Для упрощения, Таблица 3.2 отражает только три свойства: класс продукта, затраты и время доставки.

Таблица 3.2. Пример таблицы принятия решений

№	Предложения	Класс продукта	Затраты	Время доставки	Валовая прибыль агента	Валовая прибыль системы

Структура таблицы будет меняться в зависимости от того, сколько критериев и свойств определено для агентов потребностей и возможностей. Далее представлены основные операции, которые виртуальная машина принятия решений может выполнять при работе с таблицей: создание/удаление таблицы, заполнение или очистка полей, сортировка предложений по полю и поиск строки с использованием шаблонов.

Самый важный шаг в принятии решений – выбор наилучшего предложения. Эта процедура может быть весьма сложной. В самом простом случае существуют потребность и возможность полностью подходящие друг другу (например, по цене и времени доставки). Более сложный случай - когда потребность и ресурс лишь близки друг другу по свойствам, то есть присутствует частичное соответствие.

Чтобы сопоставить свойства потребности и ресурса, Агент потребности может отправить запрос, при необходимости указав в нем требуемые важность и значения свойств. Например: «Имеются ли ресурсы класса А со свойством А1, имеющим значение Z1 и важность В1, а также свойством А2, имеющим значение Z2 и важность В2?» и т.д. Агенты ресурсов проверяют свойства ресурсов и их значения в онтологии и дают ответ. Даже если ресурсы не полностью соответствуют указанным в запросе свойствам, они могут быть предложены как возможные варианты, т.к. их характеристики частично подходят.

Существует обычно два способа сопоставления ресурсов и потребностей с учетом приоритетов их свойств:

1. *Последовательное сопоставление, начинающееся со свойств первостепенной важности.* Первый Агент потребностей отправляет сообщение Агентам ресурсов: “Я - Агент потребностей класса N. Если среди существующих присутствуют какие-либо Агенты возможностей класса N со свойством S1, укажите его значение”. После получения их ответа, Агент потребностей создает таблицу, в которую вносит полученные свойства и их значения. Используя данные из таблицы, он выбирает одно или несколько подходящих предложений и отправляет соответствующим агентам вопрос: “У Вас есть свойство S2? Если да, то, какое значение оно имеет?” Данная стратегия позволяет агенту двигаться от более важных свойств к менее важным; применять стратегию частичного сопоставления (например, не уделяя внимания свойствам незначительной важности); сокращать количество операций при сравнении; оставлять значения скрытых свойств невидимыми, изменяя их в соответствии со стратегией проведения переговоров или ситуацией на рынке (например, согласно числу конкурентов).

2. *Параллельное сопоставление через посредника.* Агенты потребностей показывают свои открытые и скрытые свойства посреднику, который вычисляет коэффициенты схожести и отправляет их агентам. При этом способе агенты не знают значений свойств друг друга, но знают о степени их схожести или различия благодаря рассчитанным коэффициентам.

Еще один важным типом структуры данных для принятия решений является таблица индикаторов рынка, которая показывает средние значения спроса и предложения. Пример такой Таблицы 3.3 представлен ниже.

Таблица 3.3. Таблица индикаторов рынка

№	Продукт	Текущая средняя цена	Увеличение или уменьшение

Наличие однотипных машин принятия решений у агентов позволяет унифицировать конструкцию агентов и упростить отладку процессов принятия решений.

## 3.12. Переговоры агентов

Переговоры агентов являются важнейшим способом формирования и согласования принимаемых решений.

Проводя переговоры, агенты координируют свои действия и договариваются о стоимости сделок (если данные действия разрешены). Например, если цена ресурса равна себестоимости + затраты на хранение + 10% прибыль, то агент, ответственный за этот ресурс, может уменьшить свою прибыль до, скажем, 5%, чтобы сделать цену продукта ниже, чем у конкурентов.

В рассматриваемом случае метод компенсаций, подробно представленный выше, дает представление о структуре протоколов, используемых для переговоров агентов и принятия согласованных решений.

Важно отметить, что при приходе нового заказа проводимые переговоры могут приводить к тому, что старые заказы, ранее размещенные в системе, будут уступать свои лучшие позиции новому заказу – но это будет только в том случае иметь место, если новый заказ компенсирует ухудшение положения ранее размещенным заказам, т.е. для системы в целом это будет глобально выгодным, поскольку сумма всех улучшений будет больше суммы всех ухудшений.

В этих целях, когда приходит новый заказ, и его агент пытается «растолкать» на лучшем для себя ресурсе другие заказы и они, в свою очередь, «расталкивают» другие заказы на других ресурсах – базовая сцена не меняется, а меняется сцена-штрих, в которой динамически определяется разница по глобальному и локальному показателю агентов (без полного пересчета).

Таким образом, в ходе переговоров по методу компенсаций глобальный показатель системы пересчитывает адаптивно и лишь частично, без полного пересчета, что и позволяет оценить влияние события по глобальные показатели системы.

Примеры протоколов переговоров агентов для планирования задач по рабочим производственного цеха при начальном простом размещении задач в свободные слоты и последующей стадии проактивного улучшения показателей планов представлен на рисунках 3.12 и 3.13.

На Рисунке 3.12 на стадии предварительного планирования агенты операций размещаются на ресурсах бесконфликтным способом, чтобы получить грубое приемлемое расписание для дальнейшего улучшения. Вертикальные линии диаграммы означают линию поведения соответствующего агента во времени.

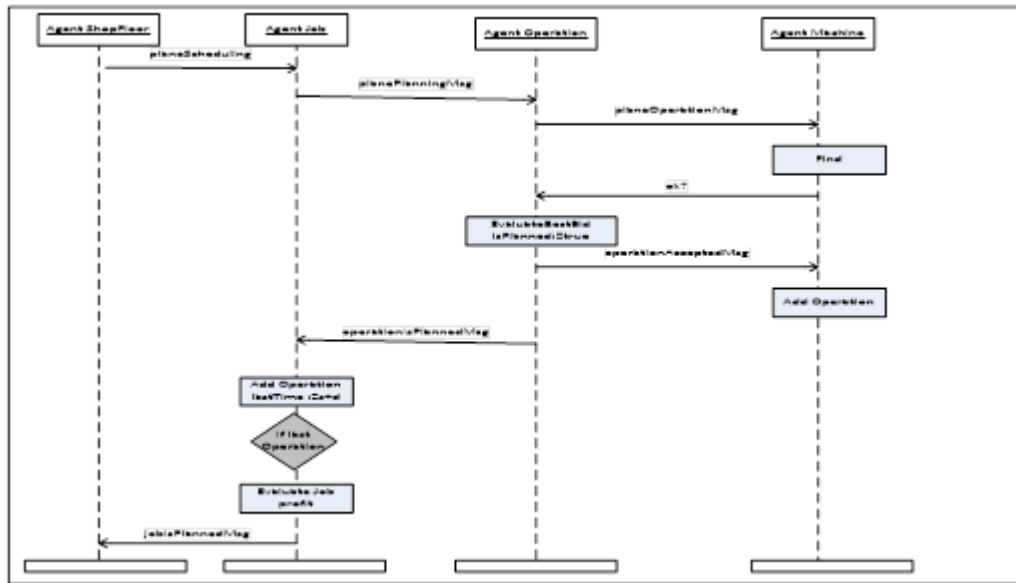


Рисунок 3.12. Переговоры агентов задач и рабочих при начальном простом размещении операций в свободные слоты времени

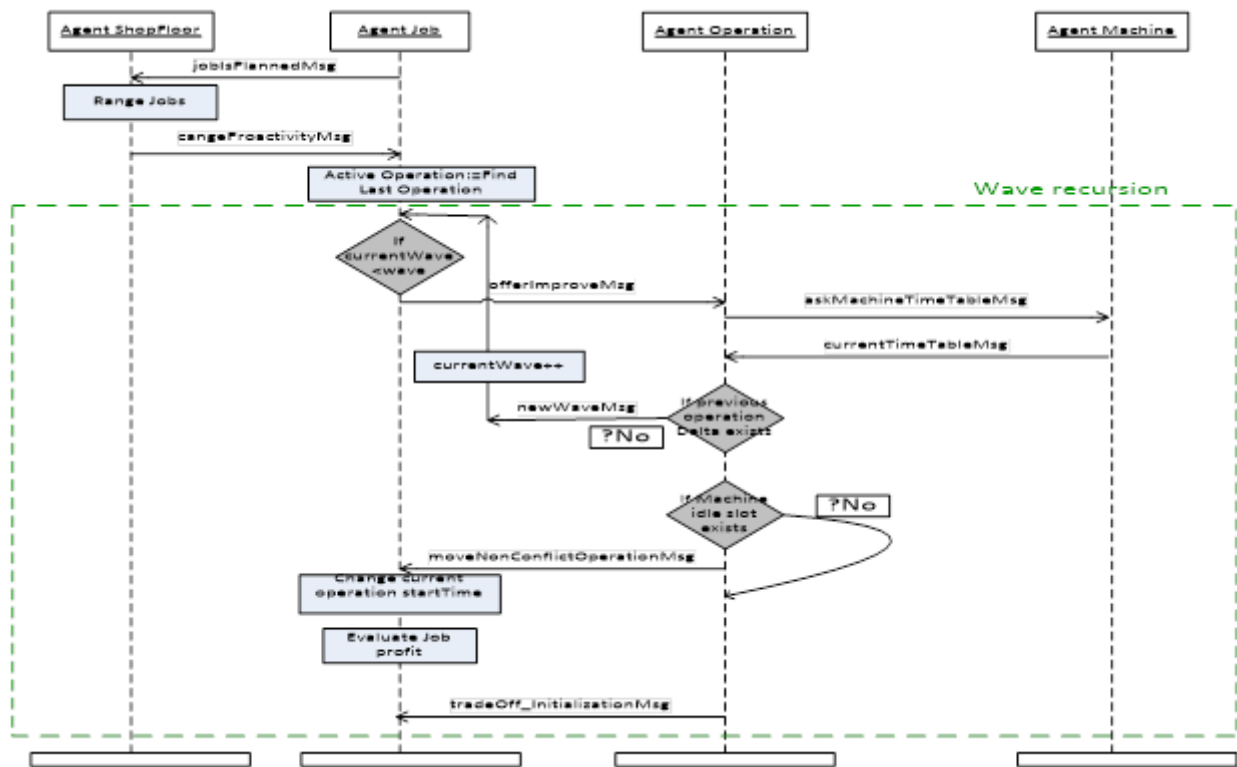


Рисунок 3.13. Переговоры агентов задачи рабочих при проактивном улучшении планов

На Рисунке 3.13 показаны примеры сообщений проактивной фазы, где выделен блок рекурсивного развертывания анализа затронутых изменений расписания.

Существуют различные способы организации ведения переговоров в логической архитектуре системы. Наиболее распространенный метод – P2P-переговоры (от *англ. peer-to-peer*, то есть «каждый с каждым» и «равный с равным»).

Другой способ состоит в том, чтобы организовать виртуальный «круглый стол» для агентов, и вести переговоры по принципу «многие со многими», который эффективен, когда необходимо договориться большому числу различных по типу агентов.

В этом случае агенты могут обозревать сцену виртуального круглого стола и поочередно вносить предложения, которые другие агенты проверяют их на согласованность со своей системой значений. Если некоторые ограничения не соблюдаются (например, превышен бюджет проекта), агенты возвращаются в переговорах на один или несколько шагов назад, чтобы выбрать направление сокращений и найти альтернативные варианты решений.

Наиболее популярным является протокол Contract-net, а также различные варианты прямых и обратных аукционов.

Ряд протоколов переговоров агентов стандартизирован международной ассоциацией по физическим агентам FIPA.

Наиболее подробное описание разработанных моделей, методов и алгоритмов можно найти в работах [19-21].

### 3.13. Архитектура MAC по управлению ресурсами в реальном времени

Общая архитектура предлагаемых мультиагентных систем представлена на рисунке 3.14.

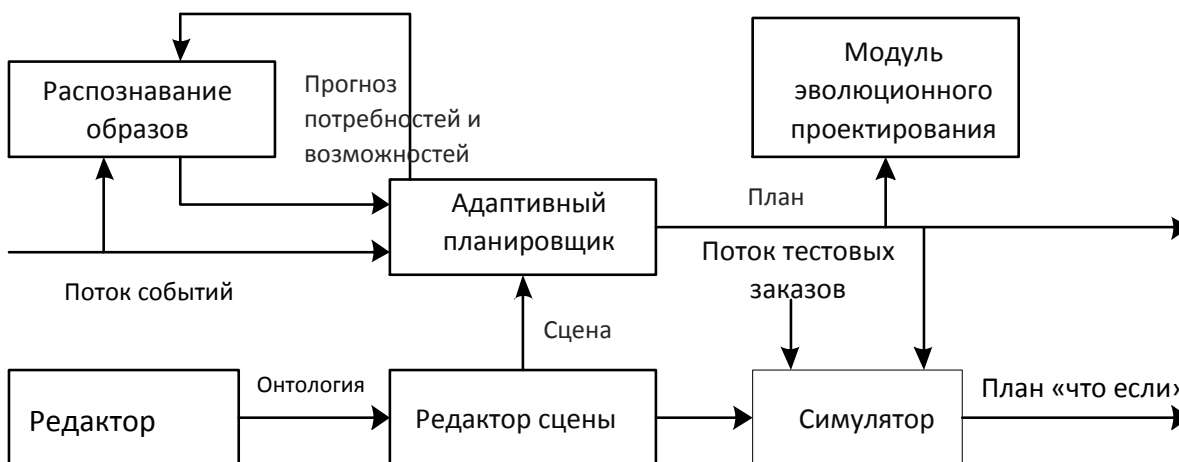


Рисунок 3.14. Архитектура MAC для управления ресурсами

Основные модули MAC для управления ресурсами описаны ниже.

#### Модуль распознавания образов ситуаций

Модуль распознавания образов ситуаций позволяет выявлять скрытые знания в данных, которые могут использоваться для прогнозирования потребностей или возможностей. Например, если крупный и выгодный заказ поступает каждую пятницу, разумно предварительно заказать определенные ресурсы для реализации этого заказа. И если вдруг, вопреки ожиданиям, заказ не поступает, система уведомит клиента и освободит ресурсы для других заказов.

## Адаптивный планировщик

Это основной модуль, который обрабатывает поступающий поток событий (новые заказы, отзыв уже запланированных, новый ресурс, выход из строя ресурса, задержки и другие) и в начале создает, а далее постоянно корректирует расписания в режиме реального времени, предоставляя пользователю возможность дорабатывать их в интерактивном режиме.

## Редактор онтологии

Помогает создавать или редактировать онтологию производственной или транспортной сети, которая требуется для последующего построения сцен этой сети. Онтология содержит классы объектов (грузовик, завод, склад) и их отношения (например, «ресурс закреплен за потребностью»), атрибуты (стоимость заказа) и в идеале правила принятия решений, модели поведения, бизнес-процессы и протоколы взаимодействий.

## Редактор сцены

Редактор сцены позволяет создавать конкретную ситуацию в модели производственной сети предприятия и вручную или автоматически описывать начальное состояние сети, извлекая данные из других источников (из баз данных, xls или xml файлов и т.д.). Для этого пользователь должен выбрать и загрузить соответствующую онтологию, которая используется в качестве словаря понятий и отношений при описании конкретной пользовательской сети. Если понятий и отношений, требуемые для определения новой ситуации в сети, не достаточно, то онтология предметной области должна быть расширена с помощью редактора онтологии, описанного выше.

## Симулятор

Моделирующая система (симулятор) является удобным инструментом, который помогает понять, к какому результату приведет то или иное изменение в системе в будущем, без разрушения текущего расписания. В любой момент текущее состояние, скажем, транспортной сети или сети цепочек поставок, может быть загружено в симулятор для поиска ответов на различные вопросы, например – что произойдет, если неожиданно поступят новые очень крупные заказы? Еще одна его функция заключается в том, чтобы смотреть и анализировать возможности перестраивать сеть (изменяя расположение основных ресурсов или делая доступным новый тип оборудования) и «разыгрывать» различные сценарии оптимизации сети параллельно с непрерывным планированием поступающих заказов.

## Модуль эволюционного дизайна

Модуль эволюционного дизайна автономно создает и развивает сети, создавая предположения о том, как адаптировать сеть к постоянно меняющемуся спросу и предложению. Например, если при производственном планировании работ в цехе нарушения сроков все время связываются с отсутствием токарей, то данный блок выработает предложение менеджерам увеличить число токарей и даже оценит упущенную прибыль за прошедший период, или, например, рекомендует мастеру вызвать из отпуска рабочего нужной компетенции.

Архитектура центрального компонента вышеупомянутой системы – адаптивного планировщика показана на Рисунке 3.15.

Кратко определим основные компоненты адаптивного планировщика.

## Онтология

Онтология представляет собой семантическую сеть знаний о том, как функционирует виртуальный мир предметной области, который в общем случае может содержать как декларативные (описательные), так и процедурные компоненты.



В виртуальном мире, описанном в онтологии, населенном физическими и абстрактными сущностями (объектами), можно создавать сценарии для выполнения действий над объектами и их реакциями в соответствии с правилами, взятыми из соответствующей предметной области знаний реального мира. Например, для агента заказа онтология логистики описывает, какие элементы необходимы, чтобы выполнить заказ; кто производит или поставляет эти элементы, и кто и где может заказать и получить их.

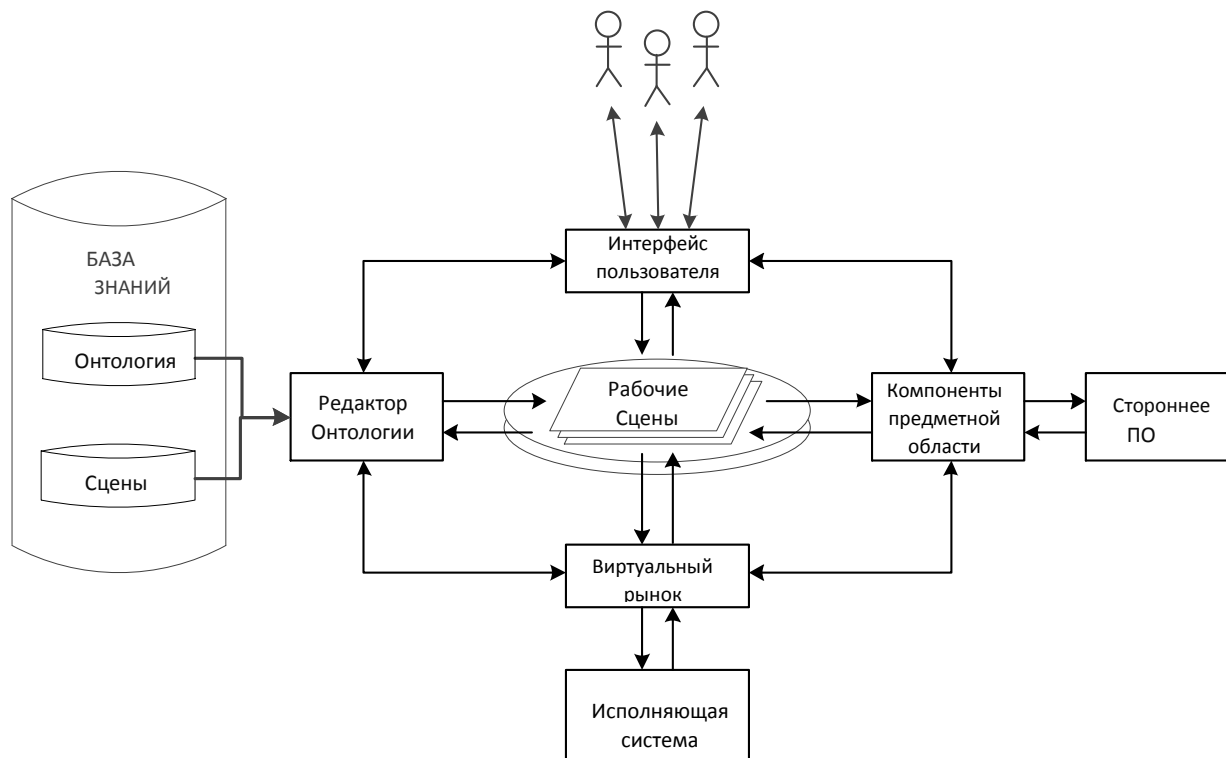


Рисунок 3.15. Архитектура адаптивного планировщика

Существует также необходимость описания абстрактных миров, например, мира логистики (который содержит такие объекты, как: заказ, расписание, срок и т.д.) или финансов (который включает прибыль, доход, сделки и т.д.).

В процессе создания сценария существует возможность определить параметры объектов и агентов и установить их начальные состояния (например, для склада или транспортной системы) и ввести начальные заказы.

Затем виртуальный мир может быть запущен – т.е. приведен в работу.

Для ускорения работы системы некоторые части онтологии могут быть запрограммированы в специальных библиотеках расширений исполняющей системы. В крайнем случае, чтобы увеличить эффективность системы, целая онтология предметной области может быть реализована в качестве набора объектов и методов, собранных в библиотеку расширений.

## Виртуальный мир

Виртуальный мир – это пространство, в котором работают агенты, т.е. исполняются автономные программы агентов.

Виртуальный мир является зеркальной моделью работы предприятия предметной области реального мира, в котором агенты выполняют свои задачи, сотрудничая или конкурируя с другими агентами.

## Виртуальный рынок

Виртуальный рынок содержит библиотеки программных компонент, поддерживающих работу агентов на виртуальном рынке, включая различные модели определения удовлетворенности агентов, микроэкономики, схемы переговоров и т.д.

Возможности виртуального рынка позволяют управлять активностью агентов при решении сложной задачи, что напрямую влияет на качество и эффективность получения результатов.

## Исполняющая система

Исполняющая система поддерживает асинхронную параллельную работу агентов и включает подсистему поддержки работы агентов, подсистему коммуникационной поддержки, подсистему управления переговорами и некоторые другие вспомогательные компоненты.

## Интерфейс пользователя

Загрузив виртуальный мир, пользователь может задавать различные сценарии из потоков событий.

Задание входных данных и получение выходных данных, а также визуализация процессов формирования, согласования и принятия решений, осуществляется через интерфейсы пользователя. Например, в системе логистики, в виртуальном мире компании, пользователь может поместить на экран города и дороги, сборочные конвейеры и транспортные средства.

Основные окна пользовательского интерфейса адаптивного планировщика обычно позволяют импортировать заказы и размещать их в очереди событий, запускать планирование и просматривать получаемые расписания с помощью диаграммы Ганта и на карте, а также видеть ключевые показатели эффективности (KPI) системы.

Можно настроить и расположить различные части окна так, как будет удобнее конкретному пользователю.

В любой момент пользователь может активировать диспетчер агентов и посмотреть, какие агенты в настоящее время работают в системе, просмотреть журнал переговоров и финансовых транзакций между агентами.

Чтобы проверить, как агенты принимают решения о распределении ресурсов, пользователи могут проанализировать журнал принятия решений агентов.

## 3.14. Мультиагентная платформа

Управление ресурсами в различных предметных областях, таких как управление проектами, транспортная или производственная логистика, железнодорожные перевозки или управление роением спутников – всегда сопряжено с особенностями в постановках задач, где принимаются во внимание весьма разные факторы.

При этом иногда даже в одной индустрии разные предприятия используют совершенно различные модели принятия решений, критические для бизнеса.

Чтобы не начинать программирование каждого нового MAC приложения «с нуля», рекомендуется определить компоненты мультиагентных систем, которые присутствуют в большинстве приложений и воспроизвести их в общей библиотеке, которая называется платформой для адаптивного планирования.

Для разработки такой платформы, обеспечивающей поддержку промышленных приложений, необходимо иметь значительный опыт в разработке, реализации, внедрении и поддержке мультиагентных приложений.

Наш опыт разработки платформ базируется на нескольких разработках, описание особенностей которых можно найти в [22-25].

Здесь будут описаны несколько рекомендуемых типовых компонент, которые могут являться составной частью платформы.

### Подсистема выполнения параллельных процессов

Эта подсистема призвана обеспечить управление большим числом нитей агентов по сравнению со стандартным механизмом операционной системы.

Переключение с управления одним процессом на другой организовано обычно за счет включения в программу специальных точек прерывания по требованию системы, которые отнимают много времени, поэтому более эффективный перехват управления сразу приводит к большому выигрышу в производительности системы.

Большие новые возможности открываются перед мультиагентными системами с развитием суперкомпьютеров [26] и созданием сетевых систем [27].

В последнее время появляется и все больше сервисных платформ, которые поддерживают параллельные легкие процессы, которые также могут эффективно использоваться при построении мультиагентных систем.

### Подсистема для поддержки принятия решений

Этот механизм позволяет программисту расширять возможности исполняющей системы, добавляя к системе новые модули виртуального рынка (расширения): как для разработки функциональных компонентов системы, включая новые типы агентов или модели микроэкономики, так и для разработки интерфейса.

### Подсистема поддержки онтологии и сцен

Основная задача подсистемы состоит в том, чтобы обеспечить доступ к онтологии и сценам, например, загрузки и сохранения соответствующих структур данных, поиск требуемых элементов, управления курсором в семантической сети и т.д.

Подсистема должна позволять прерывать любые процессы в любое время, а затем восстанавливать их, продолжая работу с любой сцены (состояния).

### Подсистема задания и выполнения сценариев

Поддержка языков сценариев агентов - важная часть онтологии, которая позволяет пользователям создавать собственные правила и сценарии работы агентов, учитывая особенности работы своего предприятия.

### Подсистема коммуникации

Одна из основных особенностей агентов - их возможность коммуницировать с другими агентами. В рассматриваемых МАС обычно требуется поддержка как синхронных, так и асинхронных режимов; необходимо накапливать очереди сообщений для каждого агента и процесса; обнаруживать сообщения, отправленные агентам, выведенным из строя, вести журнал сообщений для отладки взаимодействий между агентами и т.д.

### Подсистема визуализации

Эта подсистема позволяет визуализировать исходные данные, процессы и результаты работы системы.

## 3.15. Оценка МАС как сложных систем

Покажем, что разработанные мультиагентные системы удовлетворяют введенным выше семи критериям сложности.

### 1. Связность

Высокая связность агентов – ключевое свойство МАС для управления ресурсами. Обычно большое число разнообразных агентов взаимодействуют между собой, обмениваясь сообщениями. Но, как правило, Связность  $< 1$ , потому что не каждый агент будет взаимодействовать с каждым. Связи между агентами могут различаться по силе (прочности), и более слабые связи намного проще разрушить, для того, чтобы установить новые.

### 2. Автономность

Поведение агентов управляется целями, к которым агенты постоянно стремятся, используя сценарии (правила), хранящиеся в Базе знаний или заданные жестко на уровне кода системы.

Сценарии работы агентов разработаны так, чтобы предоставить им определенную свободу самостоятельно выбирать и пересматривать варианты решений, и иногда даже идти на метод «проб и ошибок» в выборе способа, как действовать, если знание о том, как решить проблему, является неполным.

Агенты никогда не останавливаются в своей работе (могут лишь «засыпать» на время) и в любой момент пользователь может обратиться к агенту и запросить его показатели, историю принятия решений, состояние счетов и т.д.

### 3. Эмерджентность

Поведение МАС не регулируется централизованно; напротив, оно возникает из локальных взаимодействий программных агентов непредсказуемо (порядок срабатывания агентов может быть недетерминированным), но отнюдь не случайно.

Новое решение (как переход из одного неустойчивого состояния в другое) может осуществляться как по мере прихода нового события (и даже малое событие может приводить к большим изменениям расписания), так и в результате внутренней проактивности системы, запускающей волну внутренних пересмотров решений.

Когда прибывают заказы и выполняется распределение ресурсов, то сначала связи выстраиваются более прочными, со временем, если используются виртуальные налоги, они слабеют и даже разрываются, а также регулярно подвергаются пересмотрам. Со временем, по мере прихода новых выгодных заказов, все большее число слабых связей разрывается и заменяется новыми более сильными связями, и, таким образом, процессы распада частей расписания дополняются процессами образования нового порядка, что позволяет всегда иметь в системе относительно стабильное расписание.

В экспериментах наблюдаются ситуации, когда решение всякий раз строится по-разному (например, в зависимости от того, кто первый начал переговоры), но конечный результат получается примерно один и тот же, если прямые и обратные связи при принятии решений уравновешивают друг друга.

### 4. Неравновесие

Возникновение события на входе системы побуждает пострадавших агентов приспособиться к нему, что запускает волну переговоров.

Если такие события случаются часто, у агентов не будет времени, чтобы выполнить их задачи и добиться равновесия как полного баланса интересов.

Кроме того, сила связей между агентами может существенно отличаться для каждой пары агентов в разные моменты времени.

Следовательно, в этом случае система будет большую часть времени работать в состоянии, далеком от равновесия.

## 5. Нелинейность

При определенных условиях самое небольшое изменение во внешней среде (например, прибытие нового незначительного заказа) вызывает значительные изменения в расписании («эффект бабочки»).

Эффектом бабочки можно управлять за счёт перераспределения виртуальных денег по заказам на основе прогноза, реализуемого через специальные тестирующие «виртуальные заказы», которые могут играть роль «датчиков», предсказывающих будущие значительные перемены расписания.

При определенных условиях переговоры агентов могут перерасти в колебательное поведение, состояние, указывающее, что система находится на грани между двумя аттракторами и не может решить, какой больше подходит. Такие колебания могут усиливаться, если они распространяются от узла к узлу в агентной сети и могут привести к ее распаду, если не будут приняты меры, гасящие распространение опасных колебаний.

Примером таких действий может служить временное уменьшение связности агентов или введение локальных демпферов решений.

## 6. Самоорганизация

Когда в мультиагентной системе возникает событие, возбужденный системой агент, назначенный на обработку события (например, агент сломанного грузовика), вместе с пострадавшими агентами заказов пытается пересмотреть распределение ресурсов; в результате, ранее установленные связи потребность-возможность могут быть разорваны, а новые сформированы самой системой без внешних инструкций.

Пострадавшие заказы просто переместятся на другие ресурсы, возможно, с ухудшением своего положения и положения некоторых из них, которое затем может быть улучшено с приходом новых заказов или освобождением занятых грузовиков.

В результате, система постоянно самоорганизуется в направлении повышения ценности своих решений, даже с учетом негативных событий, нарушающих планы.

## 7. Коэволюция (совместное развитие)

Когда МАС связана с бизнес-процессом предприятия, любое изменение в этом процессе должно отражаться в МАС; и наоборот, в течение определенного периода времени изменения, накопленные в МАС, могут отражаться в бизнес-процессах предприятия.

Еще более наглядно это свойство проявляет себя при взаимодействии адаптивных планировщиков в рамках «системы систем», когда изменения в планах одного подразделения немедленно вызывают изменения в планах второго, и наоборот, что будет подробнее рассмотрено в следующих главах.

## Выводы:

1. Мультиагентные технологии – перспективное новое направление в области интеллектуальных информационных технологий на стыке объектно-ориентированного программирования, параллельных вычислений, искусственного интеллекта и телекоммуникаций.

2. Мультиагентные технологии – это не только новая программная технология, но и подход к решению сложных задач, которые трудно решаются или не решаются вовсе в классической математике.

3. В этих целях мультиагентные технологии позволяют создавать интеллектуальные системы нового поколения, в отличие от традиционного «механистического» понимания ИИ, базирующиеся на фундаментальных принципах самоорганизации и эволюции, присущих живой природе, например, колонии муравьев или рою пчел.

4. В качестве концептуального базиса для создания моделей сложных адаптивных систем и методов адаптивного управления предлагается концепция сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей), развивающая холонический подход к созданию мультиагентных систем управления ресурсами в реальном времени.

5. Основным методом адаптивной перестройки ПВ-сети в разработанных системах является метод компенсаций, позволяющий пересматривать уже установленные ранее связи в ПВ-сети по событиям в реальном времени в консенсусе затронутых изменениями агентов.

6. Для реализации разработанных моделей, методов и алгоритмов предлагается архитектура построения прикладных мультиагентных систем и инструментальная платформа поддержки основных сервисов, базы знаний и протоколов переговоров агентов.

7. Показывается, что мультиагентные системы удовлетворяют введенным ранее критериям сложных адаптивных систем и потому могут являться практическим средством для управления сложными системами в реальном времени.

## Список литературы

1. Wooldridge M. An Introduction to Multi-Agent Systems. – JohnWiley&Sons, 2002. – 340 p.
2. Agent Technology: Computing as Interaction. A Roadmap for Agent Based Computing - <http://www.agentlink.org/roadmap/index.html>
3. Bonabeau E., Theraulaz G. Swarm Smarts. What computers are learning from them? // Scientific American. – 2000. - Vol. 282. - N 3. – P. 54-61.
4. A. Koestler. The Gost in the Machine. Arkana 1990.
5. Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis / Ed. J. Y-T. Leung. – Boca Raton: Chapman & Hall, 2004.
6. Stefan Vos Meta-heuristics: The State of the Art // Local Search for Planning and Scheduling / Ed. A. Nareyek // ECAI 2000 Workshop, Germany, August 21, 2000. – Springer-Verlag, Germany, 2001.
7. Organization-based agent-oriented programming: model, mechanisms, and language: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11704-013-2345-6#page-1>
8. Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автометрия. 2002. Т. 38. № 6. – С. 45-61.
9. Виттих В. А., Скобелев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и Телемеханика. 2003. №1. – С. 162-169.
10. Андреев В. А., Виттих В. А., Батищев С. В., Скобелев П. О. Методы и средства создания открытых мультиагентных систем для поддержки процессов принятия решений // Известия Академии Наук. Теория и системы управления. 2003. №1. – С. 126-137.
11. Виттих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. Т.45. № 2. – С. 78-87.
12. Скобелев П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. №12. – С. 33-46.
13. Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Application. – 10-th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011). – France, Toulouse. – Springer Verlag. – 2011, p. 5-14.

14. Skobelev P. Bio-Inspired Multi-Agent Technology for Industrial Applications. Multi-Agent Systems – Modeling, Control, Programming, Simulations and Applications. Faisal Alkhateeb, Eslam Al Maghayreh and Iyad Abu Doush (Ed.). InTech Publishers, Austria, 2011. – pp 495-522.
15. П.О. Скобелев. 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.
16. G Rzevski, P Skobelev. Managing a Virtual Environment. - Patent Application No. 0202527.8, 2003.
17. G Rzevski, I Minakov, P Skobelev. Automated Text Analysis. - Patent Application No. 305634, 2004.
18. G Rzevski, I Minakov, P Skobelev. Data Mining. - Patent Application No. 0403145.6, 2004.
19. Виттих В.А., Моисева Т.В., Скобелев П.О. Принятие решений на основе консенсуса с применением мультиагентных технологий // Онтология проектирования. – 2013. №2 (8). – С. 20–25.
20. Скобелев П.О. Ситуационное управление и мультиагентные технологии: коллективный поиск согласованных решений в диалоге // Онтология проектирования. – 2013. №2 (8). – С. 26–48.
21. P.Skobelev. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry. Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos (Ed.). – Elsevier. – 2015. – pp. 207-230..
22. Rzevski G., Skobelev P., Andreev V. MagentaToolkit: A Set of Multi-Agent Tools for Developing Adaptive Real-Time Applications // Proceedings of 4-th International Conference on Holonic Approach and Multi Agent Systems. Germany, June 2007. Volume 4659 LNAI, 2007, P. 303-313.
23. Андреев В., Андреев М., Батищева Т., Олейников А., Скобелев П., Чевелёв А. Конструкция агента в системах оперативного планирования и принятия решений // Труды VII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 27 июня - 1 июля 2005 года. Самара. 2005. – С. 414-420.
24. Ivaschenko A., Skobelev P., Tsarev A. Smart solutions multi-agent platform for dynamic transportation scheduling // 3rd Inter. Conf. on Agents and Artificial Intelligence (ICAART) ICAART 2011 (Rome, Italy, 2011). – Vol. 2. – P. 372–375.
25. Petr Skobelev, Denis Budaev, Vladimir Laruhin, Evgeny Levin, Igor Mayorov. Multi-Agent Platform for Designing Real Time Adaptive Scheduling Systems // Proceedings of the 12th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS 2014), 4-6 June, 2014, Salamanca, Spain. 2014. – Lecture Notes in Computer Science series, vol. 8473. – Springer, Switzerland. – P. 383-386.
26. О. Граничин, П. Скобелев. Суперкомпьютеры и мультиагентные технологии для решения сложных задач управления ресурсами в реальном времени // СуперКомпьютеры. – 2013. №4 (16). – С. 55–59.
27. Скобелев П. О., Царев А. В. Сетецентрический подход к созданию больших мультиагентных систем для адаптивного управления ресурсами в реальном времени. // Материалы Международной научно-практической мультиконференции «Управление большими системами», 14-16 ноября 2011, Москва, 2011. – Т.3. – С. 263-267.

# ГЛАВА 4: Эмерджентный интеллект

## 4.1. Интуитивное понимание

Человеческий интеллект – одно из самых сложных понятий, нам известных.

Наш интеллект дает нам множество весьма разнообразных способностей:

- распознавание образов с выделением семантически важной информации;
- накопление, систематизация и использование знаний об окружающем мире;
- понимание значения символов, слов, изображений, высказываний;
- познание (приобретение знаний) из данных, текстов, изображений, собственного поведения или других, а также посредством исследований и экспериментов;
- анализ (разбор) сложных ситуаций;
- планирование и оптимизация планов для достижения целей;
- принятие решений в условиях неопределенности, а, следовательно, решение частично определённых задач;
- достижение целей в условиях частого возникновения непредвиденных событий;
- ориентация и навигация в незнакомом пространстве;
- построение маршрутов движения в среде с обходом препятствий;
- взаимодействие (общение) с элементами внешней среды, в том числе, другими разумными существами и машинами;
- непрерывная адаптация к изменениям условий среды обитания;
- создание (построение) новых понятий, принципов, подходов, теорий, методов, моделей в науке;
- создание творческих произведений в литературе, музыке и других искусствах;
- постановка и достижение целей для команд путем соревнования и/или сотрудничества с другими командами или индивидуальностями и т.д.

Важным свойством человеческого разума в течение нескольких последних столетий является стремление к созданию своей собственной модели - искусственного интеллекта, где слово «искусственный» означает созданный человеком, а не природой.

Концепция «искусственного интеллекта» (ИИ) в последнее время начала особенно активно разрабатываться в связи с появлением мощных компьютеров и развитием программного обеспечения для роботов, одновременно, стимулируя разработки в области интеллектуальных машин [1], универсальных решателей задач [2], экспертных систем [3-4], нейронных сетей [5] и других многочисленных приложений.

При этом в сфере ИИ ранее всегда предполагалось, что сам ИИ можно создать из некоторых базовых «блоков» (модулей дедукции, индукции и других), механически их объединяя примерно так же, как сейчас собирают машину на конвейере. Однако, в ходе наших теоретических и экспериментальных исследований сложных систем мы пришли к выводу о том, что такая механическая трактовка вряд ли будет иметь большое будущее.

На наш взгляд, «большой интеллект» будет возникать как результат самоорганизации в ходе взаимодействия множества относительно малых и достаточно простых систем, наделенных, прежде всего, автономностью как способностью обеспечивать свое существование в среде и достижение поставленных целей, для чего потребуются оперативно реагировать на изменения в среде, самостоятельно принимать решения по формированию и исполнению планов и согласованно взаимодействовать с себе подобными в ходе их исполнения. В этой связи мы полагаем, что следует трактовать ИИ не как объект, а как *особое свойство сложных систем*, возникающее и проявляющее себя в адаптационном поведении этих систем, связанное более со взаимодействием их элементов, чем со способностями одного элемента [6].

Мы потратили более 25 лет, чтобы выработать и подтвердить эту гипотезу, создавая многочисленные экспериментальные прототипы и первые промышленные образцы



мультиагентных систем, наблюдая за их работой и анализируя процессы принятия решений агентами и людьми (диспетчерами и т.д.), выполняющими ту же работу.

*Главный вывод этих исследований состоит в том, что все представленные выше виды интеллектуальной деятельности человека при решении сложнейших задач, от распознавания образов – до обучения новым знаниям или планирования маршрутов, реализуются на основе фундаментальных принципов самоорганизации и эволюции, в ходе взаимодействия десятков, сотен, тысяч и миллионов разнообразных агентов, многих из которых ученым еще предстоит открыть, изучить и описать, как это постепенно происходит, например, с иммунной системой человека.*

Необходимо отметить, что данная идея полностью согласуется и подтверждается результатами многих исследований в области нейрофизиологии и генетики.

Действительно, сама по себе нейронная сеть человека, состоящая из нескольких миллиардов нейронов, является сложной системой, в которой интеллект не связан с каким-либо одним индивидуальным компонентом (нейроном), а возникает из взаимодействия этих компонентов, управляемых генетическими знаниями, заложенными в каждой клетке, а также приобретенными знаниями.

Три выдающиеся книги авторов М. Минского [7], Дж. Эдельмана [8] и Д. Нобля [9] послужили нам в этой работе источниками вдохновения и аргументации.

Для разрабатываемых мультиагентных систем здесь и далее *интеллектуальность* будет подразумевать под собой *способность принимать решения в условиях неопределенности и действовать адаптивно* к меняющейся среде.

В бизнесе неопределенность чаще всего возникает из-за отсутствия моделей поведения участников, не всегда полной и корректной исходной информации, возникновения непредвиденных событий и ряда других причин, но так или иначе, неопределенность присутствует постоянно. Интеллект, определение которого было дано выше, является ключевым ресурсом для успешного ведения бизнеса в современном мире.

Принимая решения в условиях неопределенности, люди используют знания о предметной области, которые обычно основаны на личном опыте, а также способны рассуждать о сложившейся проблемной ситуации и делать выводы. Люди обычно применяют удачные решения проблемных ситуаций в прошлом (в особенности, часто повторяющиеся, называемые далее «паттернами»), многократно используя их в новых ситуациях.

Интеллект программных агентов развит не настолько хорошо и, тем не менее, мультиагентные системы могут справляться с ситуацией неопределенности, демонстрируя достаточно высокие адаптационные возможности.

Откуда же берется интеллект в рассматриваемых системах?

Здесь мы вплотную подходим к интуитивному пониманию «вспыхивающего» или «эмерджентного» интеллекта (Emergent Intelligence) как особого свойства сложной системы и одновременно универсума любого творческого процесса.

Возьмем для примера двух собеседников, которые в ходе приятной прогулки начали неторопливый разговор между собой по важному и интересному для обоих поводу.

Вот в ходе разговора один из собеседников высказывает неожиданный тезис, который через мгновение находит глубокий отклик у второго и позволяет ему сформулировать в ответ острый вопрос или совсем новую мысль, которая, в свою очередь, обратным ходом помогает уточнить и усилить мысль первому, и этот процесс далее многократно усиливается и ускоряется. В результате, словно перепрыгивая через три ступеньки, два человека за короткое время делают великое открытие или изобретение, порождают блестящую бизнес-идею, ставят

долгожданный диагноз сложному пациенту, пишут великолепную оперу или журналистскую статью и т.п.

На наш взгляд, в рассматриваемой сложной системе из двух индивидуумов (каждый из которых сам по себе сложная система) возникает та самая автокаталитическая реакция, ставшая ключевым открытием в нелинейной термодинамике И.Пригожина - спонтанно возникающая в заранее не известные моменты времени цепная реакция, ведущая к интеллектуальному резонансу, вспыхивающая по событию подобно разгорающемуся из одной искры пламени пожара.

Заметим, что возможно данный выдающийся результат никогда не был бы получен, если бы два эти человека не встретились и работали бы по отдельности.

Спонтанно возникший на короткое время феномен образования коллективного разума и достижения интеллектуального резонанса заключается в том, что собеседники взаимно катализировали друг друга, а именно, направляли и поддерживали диалог как движение совместной мысли, сужали область допустимых значений и ограничивали возможные отклонения или, напротив, давали неожиданные подсказки друг другу для радикальной смены самого направления этого движения – и вот уже мысль рождена и подхвачена, идея решения оказывается мгновенно развита и результат на столе.

Можно ли хотя бы надеяться на возможность получить подобный результат простым комбинаторным перебором всех вариантов? Вряд ли, слишком долго ждать.

Но чем этот описанный творческий процесс принципиально отличается по своей природе от распознавания образов, поиска маршрута на карте или построения оптимального плана выполнения производственного заказа? На наш взгляд, ничем, вне зависимости от того, идет ли этот процесс в одной голове или во многих одновременно, или на сервере мультиагентной системы, или в распределенной среде Интернета вещей.

К сожалению, такие исключительно продуктивные разговоры в мире людей обычно очень редки, поскольку требуют выполнения целого ряда особых важных предусловий: глубокого взаимопонимания, искренней доброжелательности, горячего желания решить проблему, общих ценностей, в рамках которых стороны готовы на взаимные уступки, командной работы на общий результат, предметной базы знаний для генерации вариантов, разнообразия мнений и предложений, взаимного уважения и умения слушать друг друга, наконец, даже чувства юмора – этот ряд может продолжить каждый, кто хотя бы раз переживал радость достижения результата в эффективной командной работе.

На практике гораздо чаще все бывает наоборот, ведь всегда найдется много желающих «погасить» искру и затормозить «автокаталитические реакции», что случается не только по причине отсутствия компетенций или в силу амбиций, но и по причине отсутствия понимания ситуации. Чем больше иерархий и промежуточных начальников, чем более регламентированы процедуры взаимодействий, тем меньше продуктивных обсуждений, что грозит предприятиям застою и деградацией.

Итак, эмерджентный интеллект - это особое свойство сложной адаптивной системы, спонтанно возникающее и исчезающее в ходе взаимодействий агентов, а не какой-либо специальный модуль, как до сих пор это обычно понималось в ИИ области.

При этом далеко не всякое взаимодействие приводит к появлению эмерджентного интеллекта – свод правил, построенный на основе онтологии, должен подсказывать агентам по ситуации, с кем и как организовывать взаимодействие для достижения нужного им ценного результата.

При этом механизмы такого взаимодействия, казалось бы, не очень сложны и характеризуются точным и вовремя заданным вопросом, неожиданным, но остроумным ответом, встречным предложением, учитывающим особенности ситуации и т.д.

Разработке таких механизмов в виде моделей и методов, катализирующих взаимопонимание и работу на общий результат, и будет посвящена настоящая глава.

Хотя большая часть обсуждаемых применений будет связана с управлением ресурсами в реальном времени, можно утверждать, что предложенные модели, методы и алгоритмы построения сложных адаптивных систем не ограничены данной областью применения и будут полезны во многих других приложениях.

А может быть, иногда даже полезны и для организации командной работы не только агентов, но и самих людей?

## 4.2. Эмерджентный интеллект в природе и бизнесе

### 4.2.1. Аналогия из мира природы

Природу простейшего коллективного интеллекта часто иллюстрируют на примере поведения колоний муравьев или роя пчел.

Исследователи признают, что, хотя интеллект и физическая сила одной пчелы не так велики, но рой пчел, согласованно действующих и объединяющих свои ресурсы и усилия, может победить крупного зверя и даже человека.

Возникающий феномен такого коллективного поведения для совместного решения сложных задач называют «интеллектом роя» (Swarm Intelligence) [10-11].

Можно считать, что контуры управления и схемы взаимодействия насекомых в рое пчел или колонии муравьев с петлями положительных и отрицательных обратных связей и задают механизмы работы «интеллекта роя», многократно повышающего уровень интеллекта отдельных экземпляров в рамках согласованно действующего сообщества в целом. Пусть прямых переговоров и умных взаимодействий между такими агентами в «интеллекте роя» может и не быть, феромонные дорожки муравьев, по которым они выбирают путь к пище, или танец пчелы, показывающий направление полета к источнику меда, являются примером весьма эффективных косвенных коммуникаций для выработки согласованных взаимодействий.

Вместе с тем, как недавно открыли химики при изучении явлений супра (над) молекулярных взаимодействий, свой язык такого взаимодействия имеют даже молекулы, выстраивающие сложные молекулы из простых в ходе определенных «переговоров», которым также свойственны запросы и ответы, уступки и встречные предложения [12].

Эти исследования подтверждают еще один важный тезис, что индивидуальный интеллект любой особи, в свою очередь, оказывается построенным как коллективный интеллект на следующих уровнях (принцип матрешки).

Однако, миллионы муравьев, постоянно воспроизводимые колонией, каждый день разбегаются от гнезда в поисках пищи случайным образом и постоянно погибают, попадая в воду, застревая в траве или становясь жертвами других насекомых, птиц или животных. Информация об этих событиях достигает гнезда косвенно, изменение направления поисков пищи не является предметом принятия решения какой-либо одной особи или, тем более, какого-либо коллективного обсуждения проблемы на «совете» директоров муравейника. Общее решение возникает как цепочка адаптаций поведения множества особей,

принимающих решения и выбирающих свой путь при постоянной вариации начальных условий.

Заметим, что эффективность «интеллекта роя» в данном случае является не очень высокой, что на практике приводит к большим потерям ресурсов особей и задержкам в принятии важных решений.

Тем не менее, в последнее время подобный подход завоевывает все большее применение для решения самых разных сложных задач, от задач кластеризации персональных данных о клиентах банка - до решения задачи коммивояжера и прокладывания маршрутов в транспортной логистике [13-15].

В этих работах для определения наилучшего маршрута одновременно из множества узлов транспортной сети система начинает случайный поиск наилучшего обхода точек, который помечается специальным «виртуальным феромоном». Выбирая в дальнейшем уже сложившиеся успешные маршруты, новые «виртуальные муравьи» усиливают «запах» дорожки, и тем самым привлекают еще больше новых муравьев. Поскольку количество выбранных маршрутов растет, многие варианты, даже вполне хорошие, теряются, поскольку феромон выветривается («дорожки высыхают»), но самые лучшие из них запоминаются «системой» и используются в следующих пробах и ошибках. Рано или поздно складывается приемлемая и далее почти не улучшаемая конфигурация маршрутов, которая в ряде случаев превосходит по качеству результаты, найденные при использовании другими известными алгоритмами поиска решений.

Как отмечается на сайте Европейской Ассоциации по мультиагентным системам, в настоящее время работы по созданию систем эмерджентного интеллекта находятся в «эмбриональной стадии» [16].

Данная книга, как надеются авторы, будет являться важным практическим шагом в развитии наших знаний об эмерджентном интеллекте.

#### 4.2.2. Аналогия из мира бизнеса

В организациях с многоуровневой иерархией люди, как правило, большую часть времени заняты выполнением команд сверху-вниз и заполнением отчетов, и не существует полноценного взаимодействия между людьми даже одинакового статуса из разных департаментов в процессе принятия решений.

При этом решения часто принимаются на разных уровнях иерархической структуры единолично и без консультации с другими членами команды, за исключением узкого круга консультантов и аналитиков. Затем принятые решения спускаются ниже стоящим сотрудникам на исполнение – как результат, в таких организациях не существует эмерджентного интеллекта. Таким организациям приходится рассчитывать, в основном, только на интеллект людей, которые принимают ключевые решения на вершине пирамиды, и штат их консультантов.

Преодолению проблем таких решений в классических бюрократических организациях служат инструменты создания всевозможных «комитетов», «рабочих групп» и т.д.

Однако, на практике, этот подход, как правило, только усугубляет проблемы, поскольку в состав таких комитетов делегируют далеко не лучших работников, по принципу, чтобы там был «наш представитель», и ключевые условия для организации продуктивных взаимодействий вновь не выполняются.

Напротив, в организациях, где иерархические структуры заменены на сетевые команды лучших специалистов, ответственных за принятие решений, природный интеллект членов

команды может многократно усиливаться и взаимно обогащаться в результате их взаимодействия.

Такой интеллект можно уже полноценно называть командным «коллективным интеллектом» (Collective Intelligence) [32], который также может рассматриваться как класс эмерджентного интеллекта.

Члены правильных команд всегда имеют возможность мгновенно реагировать на первые «грубые» предложения, поступающие от заинтересованных сторон, развивать их или предлагать альтернативы, выдвигать радикально новые идеи и обсуждать получаемые решения. В ситуации, когда каждый член команды обладает уникальным знанием или навыком, когда участники имеют возможность работать сообща на результат (в то же время, конкурируя между собой) и не проявляют амбиций, эгоцентрического или другого деструктивного поведения, а выступают с уважением и доброжелательно по отношению к друг другу, действуют во благо организации в целом, тогда результаты командной работы становятся гораздо лучше, чем результаты, даваемые даже продвинутыми людьми, работающими по одиночке. Общий уровень знаний, в таком случае, выше, общая способность к размышлению тоже достаточно велика, творческий подход и продуктивность в командах возрастает и появляется возможность порождать новые блестящие идеи «на лету», не говоря уже о том, что повышается продуктивность, надежность и живучесть организации, переставшей зависеть от желаний или настроения одного человека.

Хорошие команды всегда демонстрируют явные признаки эмерджентного интеллекта, условия спонтанного или направленного возникновения которого ученым еще предстоит полноценно изучать во всех деталях.

Однако, часть этих условий для налаживания хорошей командной работы уже известна и даже отмечалась выше: внутренняя мотивация людей, активное слушание, стремление к познанию и созиданию, временное «забывание» различных статусов членов команды, уважение к чужому мнению и внимание к деталям, поддержка проб и ошибок, работа на результат и т.д.

Если эти предпосылки выполнены, как правило, возникает эмерджентный интеллект в команде, который может быть очень эффективен, т.к. улучшает все стадии процесса принятия решения:

- Проблемная ситуация анализируется сообща с тем, чтобы уменьшить неопределенность (анализируются схожие проблемные ситуации; легче генерируются альтернативные сценарии будущих разработок; предсказываются ценности различных вариантов).
- Всеми членами команды формируется общее видение ситуации и коллективно выбираются лучшие варианты решения проблемной ситуации, которые, в свою очередь, оцениваются всеми участниками команды для того, чтобы понять, насколько они близки к решению проблемы в реальной жизни.
- Решения принимаются пошагово и прозрачно для всех, на каждом шаге оценивается значение этого решения всей командой, мнение каждого слышится всеми и мнение даже стажера может подсказать совершенно новый путь развития целой компании.
- Сотрудники активно ищут новые знания по всем доступным каналам, и команда ценит каждый квант нового знания, который приносится на алтарь общего решения задач и т.д.

Возрастающая сложность бизнес среды – передний край осознания высокой актуальности и значимости налаживания эффективной командной работы, где сегодня каждый день доказываются преимущества эмерджентного интеллекта в ходе принятия решений по сравнению с традиционными подходами.

В этой связи, все большее распространение получают новые методы организации компаний, призванные укреплять продуктивную командную работу [17-18]:

- Горизонтальные «плоские» организации с минимальной иерархией постепенно вытесняют вертикальные (иерархические) организации;
- Сетевые принципы взаимодействия, переговоры и динамичное ценообразование постепенно замещают иерархические и централизованные инструкции «сверху вниз» и фиксированные цены (продукты, услуги, зарплаты);
- Осуществляется декомпозиция монолитных предприятий на «хозрасчетные» бизнес-единицы, не только кооперирующиеся, но и конкурирующие друг с другом (виртуальные предприятия) как внутри предприятия, так и во внешней среде;
- Переход от «механического» конструирования организаций (департаменты и отделы, бизнес-процессы, роли и задачи и т.п.) к их «выращиванию» на основе знаний через серию усложняющихся реальных задач, где подразделения создаются под задачи, а не под сотрудников (филогенез сотрудника в части решаемых задач должен повторять онтогенез организации - подобно тому, как развитие ребенка в утробе матери повторяет эволюцию всего рода-вида людей);
- Замена традиционных бизнес-процессов на «целостные» модели деятельности, в которой каждый отдел (сотрудник) имеет высокую автономность и самостоятельность и вносит свой вклад как в разработки, так и в продажи, отвечая за весь результат деятельности организации в целом;
- Создание всевозможных условий для рождения идей и установления прямых контактов между разработчиками и клиентами для возникновения «искры» и поиска в прямом диалоге с клиентом ярких новых проектов;
- Поддержка непрерывного обучения в организациях, ориентированная на возрастающую роль знаний в развитии бизнеса, постепенно замещает в корпорациях набор «готовых» сотрудников с определенным уровнем знаний.

Переход организаций от жестких иерархий к самоорганизующимся сетевым структурам отражает общую для современного бизнеса тенденцию поиска решений, гарантирующих большой интеллект и адаптивность в принятии решений.

Очевидно, что новые организации могут эффективно поддерживаться только сложными адаптивными системами - такими, как разрабатываемые мультиагентные системы.

### 4.3. Определение эмерджентного интеллекта

Рассмотрим теперь более формальные определения эмерджентного интеллекта.

Начнем со следующего важного объяснения понятия эмерджентного поведения [19]:

«Феномен эмерджентного поведения не может быть сведен только к отдельным частям системы. Целое представляет собой гораздо больше, чем просто сумма частей, если оно образуется в результате взаимодействия между некоторыми своими частями. Феномен эмерджентности может иметь собственные свойства, отличающиеся от свойств частей. Например, дорожная пробка, которая явилась результатом поведения и взаимодействия водителей, управляющих транспортными средствами, может быстро распространяться совершенно в обратном направлении по отношению к тому, в котором движутся машины, вызвавшие затор. Подобное свойство эмерджентных феноменов делает их очень сложными для понимания и непредсказуемыми: эмерджентные феномены могут быть контринтуитивными».

Другое определение звучит так: «Эмерджентное поведение является результатом действия механизмов нелинейной обратной связи между частями объекта. Это поведение не является

специально запрограммированным, чтобы создавать подобные «эмерджентные» феномены» [20-21].

Эмерджентный интеллект является всего лишь одним аспектом эмерджентного поведения сложных систем.

*Наше определение: эмерджентный интеллект - это свойство сложных систем, которое возникает из взаимодействий агентов, причем не является неотъемлемым свойством агентов.*

При недостатке знаний (в головах людей или в онтологии мультиагентной системы), определяющих направления возможного взаимодействия агентов в новых ситуациях, сложная система может прийти в состояние хаоса (ссоры, беспорядки и т.д.).

На наш взгляд, наиболее полно эмерджентный интеллект проявляет себя в спонтанно возникающих автокаталитических реакциях, открытых И.Пригожиным в химии [22-25], отнесенным в нашем случае к процессам принятия решений и согласованного изменения этих решений агентами в случае непредвиденных событий.

Общая природа данных процессов свойственна фундаментальным явлениям самоорганизации в живой и неживой природе и, в частности, происходит при взрыве атомной бомбы или в резонаторе лазера, когда энергия света лавинообразно нарастает за счет взаимодействия света с молекулами газа, при социальных революциях, стремительном развитии успешного бизнеса или внутреннем озарении автора, делающего открытие или изобретение.

Но, как уже отмечалось выше, при невыполнении ряда важных условий, может иметь место и обратный эффект, когда возникающие вспышки «интеллекта» могут «гаситься» безрезультатным «шумом» обмена пустыми сообщениями.

#### 4.4. Подходы к реализации эмерджентного интеллекта

В системах, основанных на взаимодействии между людьми, эмерджентный интеллект создается лишь в командах, участники которых работают на общее благо и консультируются друг с другом перед тем, как принять решение, достигая согласованных решений и баланса интересов.

Подобные консультации приводят к непрерывному пошаговому улучшению решений. Например, один участник предлагает «грубое» решение, а другие члены, подхватывая первый результат, по очереди предлагают другие варианты, которые тем или иным способом улучшают это решение. Полученное решение никогда не является окончательным, лучшим и неизменным; части уже принятого решения могут быть в ходе процессов принятия решений и переговоров полностью или частично разрушены и реконструированы, формируя новые направления совместного поиска решения.

В рассматриваемых мультиагентных системах для создания эмерджентного интеллекта предлагается использовать те же самые принципы продуктивной командной работы.

В ходе решения сложной задачи любой из агентов должен иметь возможность быстро предложить начальное решение части сложной проблемы, а другие агенты, в свою очередь, улучшить это решение, проактивно внося свои собственные предложения. Решения принимаются в процессе переговоров агентов, что предполагает уступки по определенным критериям в интересах общего целого. Каждый агент обладает только своим, локальным знанием (как специалисты в междисциплинарных командах), поэтому сразу образуются конфликты и общее решение достигается шаг за шагом путем их разрешения. На каждом шаге агенты оценивают, улучшает ли предложенное решение важные показатели предприятия или

нет – это может быть доход, доля рынка, а также другие важные бизнес- или социальные критерии, или сочетание нескольких критериев. При принятии решения агенты, очень напоминающие рабочие группы из членов команды, создаваемые по принципу «круглого стола» под каждую новую проблемную ситуацию, могут конкурировать между собой или работать сообща, причем как на общую цель, так и одновременно в собственных интересах.

Из этого следует, что процесс принятия решения не может быть запрограммирован заранее под каждую конкретную ситуацию. Решение достигается за счет сотен или даже тысяч локальных взаимодействий, причем число вовлеченных в процесс решения активных агентов, количество последовательных или параллельных процессов в системе и направление, в котором пойдут переговоры, заранее не известны.

Тогда сценарии решения возникшей проблемы (например, нужен новый план при выходе из строя критического ресурса) не могут быть даны наперед, а генерируются заново индивидуально в процессе взаимодействия агентов под каждую конкретную ситуацию, с учетом всех ее заданных или выявляемых в ходе решения задачи деталей.

При этом начальный шаблон сценария решения задачи может быть «вброшен» на такой «круглый стол» для ускорения процесса, но ведь это может давать и обратный эффект и приводить к замедлению, если ситуация слишком изменилась, как, например, феромонная дорожка, ведущая к опустевшему источнику пищи для колонии муравьев.

По своей конструкции, через инстинкты или из расширяемой онтологии агенты должны знать, с кем им следует разговаривать, но в каждой ситуации не могут знать, кто им ответит, какое предложение поступит и в какой момент времени, но решение придется принимать в согласии (консенсусе), что вносит свой дополнительный существенный недетерминизм в принятие решений.

Итак, на каждом шаге агенты пересматривают заново входную информацию и реагируют на возникшие события (задержки, поломки, изменения). Реакцией может быть самостоятельно принятое решение или решение, принятое после консультации с другими агентами или с пользователем. Такой подход позволит получать более выгодные, адекватные и устойчивые, сбалансированные решения, легко контролируемые, объяснимые и, при необходимости, модифицируемые пользователями.

Еще раз подчеркнем, что эмерджентный интеллект - это свойство, которое возникает «ниоткуда» (нет ни одной специально сконструированной такой компоненты), как автокаталитическая реакция принятия или пересмотров решений, спонтанно и в заранее не предвиденный момент времени, и так же неожиданно исчезает, но в процессе своего существования определяющим образом управляет работой всей системы, оказывая влияние на поведение агентов, его породивших.

Важный принцип работы самоорганизующейся системы, в ходе которого «локальные взаимодействия» агентов рожают «глобальные структуры» (новое расписание, новое знание агентов, коалицию агентов, активацию агента предприятия или расписания, изменение стратегий агентов и т.д.), которые, в свою очередь, получают возможность активно влиять на «локальные взаимодействия» породивших их агентов, является определяющим для проектирования мультиагентных систем эмерджентного интеллекта.

По мнению проф. Куперса и ряда других ведущих ученых института Санта-Фе (США), эта схема являет ключевую особенность любых самоорганизующихся систем, возникающих в самых различных областях природы и сферах деятельности человека [26-30].



## 4.5. Анатомия командной работы агентов

Первое поколение наших систем было создано для того, чтобы решать сложные задачи распределения ресурсов посредством организации косвенного взаимодействия относительно простых агентов, по аналогии с работой колоний пчел и муравьев.

Второе поколение было более эффективным за счет предоставления возможности агентам иметь доступ к базе знаний и улучшать результаты благодаря более развитым переговорам. Используя знания о предметной области и переговоры, агентам не надо совершать систематический или случайный комбинаторный поиск всех возможных вариантов решения. Вместо этого, агенты способны запрашивать и уточнять друг другу выполнимые варианты или взаимно ограничивать выбор друг другу, чтобы быстро получить первое приемлемое, пусть не оптимальное, решение, которое в данной ситуации и в данный момент времени можно получить, а далее уточнять варианты, если для этого есть время.

При этом агентам не требуется каждый раз пересчитывать все решение – достаточно создать «рабочую группу» агентов и фрагмент сцены, куда приглашать всех заинтересованных (затрагиваемых) новым событием (ситуацией) агентов и позволять найти им локальное решение в консенсусе (согласии), после чего записать решение в общую сцену (память). Такая рабочая группа (одна или несколько одновременно) могут быстро подсчитать, насколько ухудшается или улучшается решение по отношению к текущему значению, если результат негативный, может быть создана другая группа (ы) и так далее до получения приемлемого решения.

Здесь всегда возникает вопрос, как же можно принимать решения на каждом шаге, если конечная цель далеко впереди и сразу трудно оценить все последствия?

Решение в том, чтобы стараться как можно быстрее идти вперед, чтобы поскорее дойти до конца, и с «высоты» достигнутого положения остановиться, развернуться назад и проанализировать худшие места полученного решения, чтобы далее их последовательно улучшать, разрешая локальные конфликты на выбранных участках расписания.

Так, в простейшем случае веточка, положенная муравьем в основание новой части муравейника, определяет условия для размещения следующей ветки и т.д. Муравьи не будут пересматривать и изменять ее положение в зависимости от того, насколько хорошо легла данная ветка. Если начальное положение окажется неудачным, через какое-то время вся часть гнезда естественным образом рассыплется под собственным весом и процесс построения начнется муравьями сначала. Через большое число попыток можно ожидать, что будет построена более или менее устойчивая конструкция – за недостаток более «умного» адресного взаимодействия приходится расплачиваться огромным числом неудачных попыток.

Нельзя ли теперь сделать этот процесс более содержательным и быстро достигающим результата?

В сравнении с муравьями агенты имеют возможность прямой более эффективной коммуникации - принимать или отвергать предложения других агентов или даже пересмотреть исходную постановку задачи для того, чтобы получить лучшее решение или ускорить процесс поиска решения. Ключ в том, что решение одного агента может сужать область допустимых решений для другого агента, помогая ему принять хорошее решение за более короткое время, исключая перебор вариантов в глубину или ширину. Если решение второго агента, в свою очередь, в обратную сторону, дает новый толчок первому, и тот принимает новое решение, улучшающее его показатели, такой взаимосогласованный и взаимообусловленный процесс взаимодействия агентов самоускоряется и быстро приводит к построению, возможно, совершенно неординарного решения, которое трудно было бы предположить заранее, выполняя монотонный комбинаторный перебор вариантов. Этот процесс по своей природе, как

было показано выше, весьма напоминает разговор двух высококвалифицированных специалистов, когда высказывания одного позволяют другому быстро понять ситуацию и предложить решение, которое, в свою очередь, может быть тут же улучшено первым и т.д.

Таким образом, важнейший принцип эмерджентного интеллекта состоит в том, что результат работы одного агента должен «подсказывать» направление или наоборот ограничивать и сужать область возможных решений для другого агента (какого вида следующую ветку искать) для наилучшего и скорейшего достижения его целей.

Из этого следует, что эмерджентный интеллект агентов, получающих в свое распоряжение базу знаний и более развитые схемы переговоров с уступками, должен превосходить моделируемый интеллект роя пчел и колоний муравьев.

#### 4.6. Пример работы эмерджентного интеллекта

Покажем, как рождается интеллектуальность в цепных реакциях взаимодействий агентов в создаваемых мультиагентных системах рассматриваемого класса [31].

В качестве примера выберем уже обсуждавшуюся ранее мультиагентную систему планирования грузовых перевозок (для краткости будем называть ее далее просто – Планировщик) [32].

Напомним, что рассматриваемая система работает как автономная интеллектуальная система, способная к самоорганизации и адаптации к изменениям в среде для достижения поставленных целей в условиях неопределенности. При возникновении новых событий агенты изменяют ранее согласованные связи потребностей и возможностей для того, чтобы соответствовать новым требованиям. Этот процесс поиска новых соответствий и изменения связей в ПВ-сети мира транспортной логистики и означает самоорганизацию.

Рассмотрим более подробно характерный пример решения задачи динамической консолидации заказов на перевозку грузов в системе.

Данными для анализа будут получаемые результаты планирования, а также журналы принятия решений и переговоров агентов в ходе их взаимодействия.

Пусть имеется некоторая упрощенная сцена, задающая состояние виртуального мира транспортной логистики, что показано на Рисунке 4.1.

Эта сцена содержит два грузовика, каждый из которых связан с несколькими рейсами, которые, в свою очередь, связаны с грузами. Каждая связь, объединяющая потребность и возможность, отмечена пиктограммами, обозначающими удовлетворенность агентов друг другом. Видно, что заказ 1 удовлетворен выбранным ресурсом. Однако, некоторые из ресурсов по различным причинам не так довольны или совсем не удовлетворены, это может происходить из-за того, что обратные рейсы некоторых грузовиков проходят без полной загрузки или распределение части грузов по машинам не лучшее по срокам и т.д.

Пусть нет никакой возможности улучшить данную ситуацию, и скорость процесса планирования, выражаемая числом изменений плана в единицу времени, замедляется до полной остановки, тогда фиксируется «динамический останов» с построением неуплучшаемого равновесия, что дает возможность выдать результат пользователю.

Определим подробнее данную начальную ситуацию в системе, которая характеризуется следующими состояниями агентов и связями между ними:

- Заказ 1 успешно размещен на грузовиках;
- Агенты грузовиков 1 и 2 сформировали рейсы для заказа 1;
- Агенты рейсов сформировали группы грузов для каждого рейса;
- Для каждой связи между агентами оценивается ценность с обеих сторон (представлена цифрами на связях);

- Некоторые агенты грузов совершенно не удовлетворены, так как их пробег слишком высок, либо грузовик им не полностью подходит и т.д.;
- Некоторые агенты рейсов не полностью удовлетворены, так как геометрия маршрутов их поездок не совершенна и сильно отличается от идеала;
- Некоторые агенты грузовиков не удовлетворены, так как заполнены не до конца;
- Уровень удовлетворенности агента предприятия нормальный;
- Для неудовлетворенных агентов нет способа изменить ситуацию и все попытки улучшить ситуацию не приводят к результатам.

В этот момент неожиданно приходит заказ 2 с несколькими новыми грузами, которые сразу же начинают борьбу за ресурсы, разворачиваясь в следующий процесс:

- Пусть Агенты грузов нового заказа 2 договариваются разместиться в рейсах 4 и 5, делая первый рейс особенно успешным для своих грузов;
- Тогда на очередной фазе проактивности Агент груза 1, в очередной раз фиксируя свою неудовлетворенность положением в рейсе 1, начинает рассматривать для себя опцию перейти в рейс 4;
- Агент рейса 4 также заинтересован в присоединении груза 1, поскольку это делает его еще более выгодным без дополнительных перестроек маршрута;
- Агент груза 1 покидает рейс 1 и именно тут начинается «катастрофа» самоускоряющегося разрушения сложной структуры данного рейса;
- Агент рейса 1 делает попытку перестроить маршрут, чтобы сделать его более оптимальным, но этот процесс завершается безрезультатно;
- Агенты рейсов обязаны предупреждать свои грузы о том, что маршрут рейса изменился, т.к. их микроэкономика очень чувствительна к любым изменениям. Грузы «просыпаются» и начинают пересчитывать свои показатели. Может выясниться, что кому-то доставка будет уже не в срок, а кому-то окажется слишком дорого платить за крюк. В общем случае, новые грузы вносят свою плату в общую копилку и забирают ее оттуда с уходом, работа в таких случаях обычно строится по принципу «разделяемых расходов» («Shared Costs»);

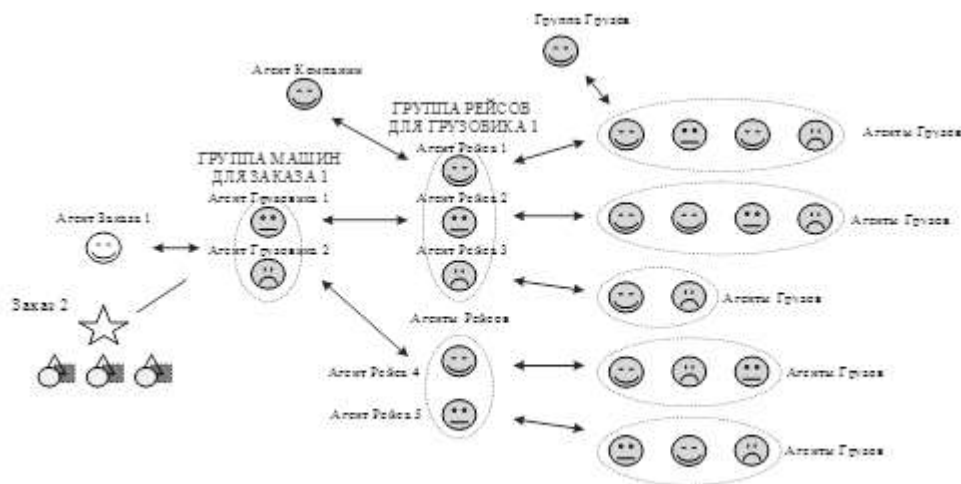


Рисунок 4.1. Модель неустойчивой ситуации в плане грузоперевозок, при которой возникает цепная реакция перестройки расписания

- Агент рейса 1 вынужден выполнить пересчет параметров маршрута и известить все свои грузы, что теперь их транспортировка будет обходиться дороже;
- Все другие агенты грузов рейса 1 вычисляют новые значения своих параметров и, возможно, еще один из грузов решает покинуть маршрут;

- Агент рейса 1 вынужден снова выполнить пересчет параметров маршрута, и теперь для всех оставшихся грузов перевозка становится еще более невыгодной. Тогда другие недовольные грузы, каждый по своей причине (экономика, сроки и т.д.) решаются «перейти» в другие грузовики и другие рейсы, где складывается более выгодная для них ситуация. При этом ситуация для остающихся в Рейсе 1 грузов становится еще и еще хуже, т.к., например, цена их поездки с уходом «коллег» все более увеличивается;
- В результате, сначала 1, потом 2 и далее 4 или 16 грузов решают уйти – начинается самоускоряющийся процесс разрушения и полной структурной перестройки расписания, в ходе которого все грузы могут «убежать» от грузовика;
- Все возрастающее на каждом шаге число грузов может покинуть маршрут до тех пор, пока маршрут не становится полным «банкротом» и не исчезает из сцены мира;
- Если рейс 1 разрушается полностью, грузовик 1 должен начать поиск новых заказов, и все может повториться заново.

Получается, что размещение грузов заказа 2 «потянуло» за собой новую возможность для мало удовлетворенных агентов улучшить свое состояние. Начавшиеся переговоры между грузами заказа 2 с грузовиком 2, который согласился принять новый груз и, в случае необходимости, создать новые рейсы, катализировали ситуацию для грузов рейса 1, и, возможно, множества других грузов, что позволило на стадии проактивности запустить процессы изменения ранее принятых решений для ряда заказов и ресурсов, обычно всегда желающих улучшить свое положение и только ждущих своего часа. В результате, из, казалось бы, на первый взгляд, относительно стабильного состояния (равновесия) система переходит в совершенно новое, совсем не похожее на старое, состояние, в терминах теории сложности, из одного равновесия – к другому.

Важно заметить, что в дальнейшем может наблюдаться процесс образования нового порядка – новое расписание через некоторое время установится на этом «пострадавшем» грузовике, возможно, с несколько или даже совершенно другой конфигурацией грузов.

Теоретически, возможно, начнет наблюдаться и «осцилляция» решения, которая никогда не позволит структуре расписания «затвердеть» и потерять гибкость, если только эластичность такой перестройки не уменьшается с приближением момента времени для принятия окончательного решения (Commit Time).

Рассмотренная выше архитектура виртуального мира логистики открывает возможности для наблюдения и моделирования большого комплекса феноменов самоорганизации и нелинейного поведения сложных динамических систем, включая динамическое образование неравновесных структур различной вложенности и конфигурации (образование некоторого «порядка» из «хаоса») и их разрушение с переходом в новое состояние через состояние частичного хаоса (с уточнением связей и их разрывом), осцилляции как повторяющиеся возникновения и исчезновения самоподобных структур в разных зонах расписания, резонансные явления и катастрофы и т.д.

Одним из наиболее интересных и мощных феноменов рассматриваемой архитектуры и являются «катастрофы», наиболее ярко отражающие эмерджентный интеллект системы - нарастающие по скорости до «взрывного» лавинообразные процессы изменений в расписании, связанные с исходом заказов и разрушением сложившейся структуры расписания для его крупномасштабной перестройки.

Заметим, что в данном примере процесс катастрофы возникает в ходе проактивного улучшения грузом своего положения. Этот процесс также может возникать, например, при появлении нового заказа, отказе ресурса или любых других событиях, но лишь в определенных ситуациях «готовности» внутренней структуры расписания к изменениям.

Можно привести пример, когда находящаяся в очень неустойчивом состоянии сложная структура, в которой установлено множество связей, но каждый агент весьма неудовлетворен своим состоянием, полностью распадается под действием самого минимального входного заказа и образует совершенно новую структуру или множество меньших структур совершенно другой конфигурации. При этом такая структура может пройти полную трансформацию через состояние полного хаоса (нераспределенных заказов), в котором все связи постепенно

разрываются, и лишь только потом начинают формироваться заново. Это отражает другой известный в бизнесе факт, что чем ближе система к состоянию хаоса – тем легче ее перестройка и тем более чувствительной она является по отношению к изменениям во внешней или внутренней среде.

Направление, в котором начинает идти такая «цепная реакция», отражает определенную «поляризацию» радаров целей агентов, участвующих во взаимодействии, вектора интересов которых так или иначе складываются и начинают усиливать друг друга.

Важнейшими исследовательскими вопросами, которые теперь встают на повестке дня и требуют дальнейшего исследования для подобных систем, становятся задачи измерения скорости подобных реакций и времени переходных процессов, обнаружения количества и конфигурации аттракторов в фазовом пространстве системы, возможности достижения одного произвольного состояния равновесия из другого, разработки методов детекции приближения к точкам бифуркаций, управления процессами виртуального рынка через налоги и инвестиции, торможения или ускорения катастроф и других нелинейных процессов и т.д.

Для стабилизации ситуации могут вводиться новые виды более согласованных переговоров, например, если грузовик берет новые грузы, но при этом вынужден выполнить небольшой крюк, он должен, прежде всего, спросить свои грузы, не приведет ли это решение к резкому повышению неудовлетворенности их агентов, чтобы не разрушить сложившееся расписание, если оно имеет хорошие показатели, когда «лучшее» может напрямую оказаться врагом «хорошего».

Таким образом, в ходе поступления потока событий процессы построения расписания проходят через стадии замедления и ускорения, проявляют неожиданно большую чувствительность даже к маленьким изменениям, достигают относительно устойчивых стабильных состояний или, наоборот, очень «неравновесных» состояний, близких к хаосу, в которых, время от времени, через катастрофы, кардинально перестраивают структуру расписания, осциллируют при наличии близких равных решений и т.д.

Не правда ли, эти процессы гораздо больше напоминают всю нашу сложную жизнь по сравнению с обычными программными автоматами, работающими по принципу «запустил программу – получил результат»?

Многие подобные интересные аспекты самоорганизации были обнаружены нами в экспериментальных исследованиях создаваемых мультиагентных систем.

Возникающее спонтанное самоускорение (автокатализация) переговоров агентов ведет к быстрому разрушению существующего расписания с целью создания его новой, более качественной версии. Такое ускорение обычно является следствием накопления энергии (виртуальных денег), которые «стреляют» в определенный момент времени, приводя к своеобразному «подрыву» расписания с его значительной структурной перестройкой, подобно «катастрофе» в классических динамических системах.

Спонтанное ускорение или торможение работы системы может возникнуть без видимых внешних, но под действием накапливаемых внутренних сил и других причин [31].

Важно отметить, что чем ближе внутреннее состояние системы к состоянию хаоса, т.е. чем ближе неопределенность приближается к значению 1 и чем слабее становятся связи в системе, тем чувствительней она к изменениям и тем легче ее модифицировать. Это подтверждает известный эмпирический вывод о том, что сложные системы наиболее эффективно работают «на грани хаоса», поскольку в этих условиях им легче и дешевле изменять связи, что особенно важно в условиях высокой неопределенности и динамики изменений в среде.

Примером практического применения данного принципа может являться компания, которая не берет новых сотрудников в штат с ростом числа проектов, а привлекает лишь временных соисполнителей по договорам подряда. В любой момент, если выясняется неспособность исполнителя качественно сделать работу, такая связь может быть легко разорвана без значительных затрат для замены такого исполнителя.

Управление работой сложной системы «на грани хаоса» призвано обеспечивать и поддерживать высокую эффективность бизнеса.

## 4.7. Развитие моделей эмерджентного интеллекта

### 4.7.1. Создание коалиций агентов

Во многих случаях скорость и эффективность переговоров агентов можно увеличить, объединив в коалицию (группу) некоторые заказы и ресурсы и назначив такой группе специального Агента представителя, действующего от лица, в интересах и по поручению всех участников группы.

Например, несколько небольших заказов никак не могут разместиться на больших и дорогих грузовиках. Но если они сконсолидируются в один большой заказ, они станут представлять интерес для перевозчиков, и агент такой группы сможет договориться с грузовиком, который удовлетворяет требованиям всех членов группы.

Другой пример: несколько заказов, уже размещенных на грузовике, не совсем удовлетворены своим размещением. Частично удовлетворенные заказы могут захотеть объединиться в группу и поручить Агенту группы организовать переход на грузовик меньшей емкости и найти, таким образом, выход, удовлетворяющий всех участников группы. Или, например, если первый заказ должен перевезти груз из А в В, а второй заказ из В в С (а затем грузовику надо вернуться в А), то наилучший вариант для этих двух заказов – это сформировать группу для поиска третьего заказа с подхватом груза на обратном пути и его доставкой из С в А.

Ресурсы с одинаковыми или похожими целями также могут принять решение объединиться в группу и начать поиск заказов для группы как целого.

Чтобы подчеркнуть тот факт, что агенты, образующие группу, по-прежнему автономны, их группы часто называются сообществами агентов. Агент сообщества может, если это целесообразно, время от времени принимать решения от лица сообщества без консультации с его членами, считая обязательным внесение коррективов в тех случаях, когда обстоятельства предполагают такую возможность. Если же далее находятся агенты, недовольные такими решениями, они в любое время могут отказаться от этого решения и выйти из сообщества, таким образом, “исправить” предыдущее решение, принятое без общей консультации. Решения, принятые без консультаций и согласований, увеличивают скорость процесса планирования и часто не требуют исправления, как в примере, где агент сообщества решает разместить целую группу заказов на неожиданно ставшем доступным подходящем грузовике, и таким образом, увеличивает прибыль предприятия, не тратя напрасно время на длительные консультации.

Важно отметить, что формирование или уничтожение сообществ может запускаться агентами автономно в целях увеличения ценности решений по ситуации.

Если разместить группу заказов удовлетворительно невозможно, агент группы может попросить определенные заказы, препятствующие успешному размещению группы, уйти из нее. Члены группы могут вести переговоры со своим Агентом группы или подчиняться его указаниям (тут возможно множество вариантов организации взаимодействий, от голосования – до авторитарных решений), но постоянно пересматривают свое состояние в группе и также могут самостоятельно решать уходить из группы при определенных условиях.

С агентов, желающих состоять в группе, могут взиматься членские взносы: постоянные или пропорциональные получаемым результатам, связанным с участием в группе. Агенты, не удовлетворенные работой представителя группы, могут потребовать роспуска группы или индивидуально покинуть группу для самостоятельного активного поиска вариантов. По той же

методике из групп агентов могут формироваться группы групп, образующие более сложные иерархические или сетевые структуры. Таким образом, агенты могут динамически создавать новые сообщества (фактически, новые организации) для того, чтобы коллективно решать более сложные задачи, которые они не могут решить на индивидуальном уровне.

Переход целой группы заказов на новый маршрут или грузовик (когда целый «гарем» грузов ушел к другому грузовику) можно рассматривать как пример мгновенной и весьма эффективной реконструкции большого фрагмента расписания, повышающего качество всего расписания в целом.

Такой подход развивает принципы коалиций, в настоящее время все более активно изучаемых исследователями [33-34].

Члены коалиции могут вести различные по характеру переговоры со своим Агентом коалиции, отвечая на его запросы или выступая с собственными предложениями.

Коалиции могут рассматриваться шире - как новые организации разных типов с различными формами микроэкономики, например, с каждого агента могут потребовать плату за членство и финансирования активностей агента такого сообщества. Как уже отмечалось, агенты, не одобряющие работу агента организации, могут потребовать роспуска сообщества или могут сами покинуть его, чтобы начать самостоятельный поиск вариантов. Сообщества или организации таких агентов, в свою очередь, могут формировать объединения, представляющие более сложные иерархические или сетевые структуры, и агенты могут динамически создавать новые организации для решения сложных задач, которые они не могут решить в одиночку. В любом случае, сообщества формируются и распускаются как сверху-вниз по директивному указанию, так и снизу-вверх, самостоятельным образом.

Рассматриваемые принципы построения организаций агентов, от простых коалиций – до сложных организаций, важны для проектирования многоуровневых взаимодействий агентов и согласования интересов как по горизонтали, так и по вертикали.

В будущем в зависимости от происходящих изменений в среде, каждое сообщество должно иметь возможность самостоятельно выбирать себе форму организации для эффективного решения своих задач.

#### 4.7.2. Обработка знаний агентами

Агенты должны быть сконструированы таким образом, чтобы иметь доступ к знаниям о предметной области, использовать эти знания для принятия решений и даже создавать новые знания на основе получаемого опыта [35-37].

Знание о предметной области может быть доступно агентам в двух уровнях:

- Концептуальное знание об окружающем мире (называемое «онтология»), содержащее классы объектов предметной области (например, грузовики, заказы, расписания, маршруты), атрибутов (например, объем перевозимого груза, средняя скорость), отношений (например, грузовик движется вдоль дороги) и ограничений (например, водители могут работать только 6 часов в день)
- Сцена мира (фактическое знание), содержащая экземпляры онтологических классов объектов и отношений (включающие значения атрибутов), которые задают ситуацию в бизнес-сети предприятия (например, Грузовик 17 имеет грузоподъемность 5 т, движется по маршруту между точками А и В, водитель С предпочитает ночные смены, но будет в отпуске на следующей неделе т.д.).

Эти две части (уровня) вместе представляют собой Базу Знаний системы, которая может пополняться и развиваться пользователями.

Термин «онтология» заимствован из философии, где он означает описание бытия мира, в котором мы живем. В последнее время термин онтология получил большое распространение в компьютерной индустрии для формализации классов объектов и отношений предметной области, их атрибутов и возможных значений в рамках Semantic Web.

На основе знаний о предметной области агенты конструируют сцену, которая является моделью определенной ситуации реальной жизни.

В наших планировщиках типичным примером сцены является текущее расписание размещения ресурсов, отображающее связи между заказами и ресурсами, их атрибуты, включая значения, местоположение, доступность и т.д. (например, маленькая часть сцены может описываться так: «Грузовик 17» «Едет» «из точки А» «в» «точку В»).

При возникновении событий (новые заказы, отмены и задержки), агенты начинают взаимодействовать между собой так, чтобы изменить текущую сцену (например, расписание) с учетом нового события.

Компьютерное представление формальных знаний о предметной области и сложившейся ситуации помогает агентам:

- Анализировать ситуацию и принимать решения (например, «Грузовик 17 в данный момент не может быть использован»).
- Проверять входные данные на их корректность (например, «точка В не определена в нашей бизнес-сети»).
- Задавать пользователям вопросы, если, например, ожидаемый факт отсутствует (например, «Что случилось, почему нет данных от Грузовика 14? Когда Грузовик 17 начал свою работу?») и т.д.

Важно отметить, что представление сцены расписания как семантической сети решения позволяет агентам локально изучать ситуацию и не брать во внимание весь объект сцены в целом, а только лишь часть, непосредственно связанную с текущими задачами агента (достаточно представить себе объем реальной сети из 500 тысяч связанных работ, например, отражающей план небольшого цеха на пару месяцев вперед). Заказ, возникший в городе А, должен сначала искать решения в своей окрестности и добиваться подхвата грузовиком в этом городе, зная сеть связей дорог и размеченные на ней договора с другими грузовиками, и далее, лишь при отсутствии результата или при наличии времени, методом расширяющейся окружности рассматривать другие варианты, используя связывающие отношения в сцене.

Кроме того, отделение знания предметной области от кода (метод, аналогичный сосредоточению всего биологического знания всех клеток организма в их геноме) дает возможность системе быть более гибкой, что можно проиллюстрировать следующим образом:

- Знание о предметной области может быть модифицировано экспертами и консультантами без необходимости привлекать программистов и даже при определенных условиях без необходимости прерывать работу системы.
- Текущие знания в сцене могут ежедневно обновляться в системе, уточняя и расширяя новые состояния и параметры заказов, грузовиков и грузов, правила для водителей, стратегии принятия решения и т.д.
- Механизмы рассуждений могут быть встроены в логику принятия решения агентов (например, способность делать запросы типа «Дай мне все грузовики, которые направляются в точку В и принадлежат компании N») с целью сделать процесс создания новых агентов более простым и дешевым.
- Логика принятия решений агентов может быть настроена и модифицирована без перепрограммирования.
- Новые знания могут вноситься в онтологию в результате автоматического обучения агентов из опыта (с разрешения оператора).



Предлагается в будущем также содержать в онтологии альтернативные сценарии поведения агентов с оценкой эффективности их использования на практике. Если какие-то правила успешно применялись, они могут получать определенные баллы, которые позволят системы выбирать их в первую очередь в подобной же ситуации при последующих запусках.

При отсутствии явно выраженных предпочтений система может принимать случайные решения, выбирая правила из готовых, и запоминать эффективность их применения.

### 4.7.3. Обучение из опыта

В последующих разделах будут показаны возможности построения мультиагентных систем по автоматическому извлечению знаний, где агенты ведут переговоры по кластеризации данных с целью идентифицировать паттерны поведения, связанные с удачным или неудачным решением проблемных ситуаций.

Первые опыты показывают, что эти системы также работают гораздо более эффективно, чем традиционные системы по извлечению данных [38-39].

Новые возможности кластеризации данных могут быть встроены в интеллектуальные планировщики для того, чтобы наделить их способностью обучаться на основе опыта и использовать новые знания для дальнейшего улучшения своей работы.

Например, знания об эффективности тех или иных водителей можно получить, анализируя историю поездок и подсчитывая число ДТП, опозданий на погрузку и т.д.

Любая закономерность (паттерн) в поведении транспортной логистической сети (например, знание худших водителей), сужает поле возможных решений и тем самым избавляет от обширных поисков и ошибок (не надо назначать плохих водителей лучшим клиентам).

*Обучение из опыта заключается в процессе извлечения знаний о закономерностях в объемах получаемых на практике данных.*

Другими словами, речь идет о способности создаваемых систем обобщать эмпирические закономерности в числовых данных, что является важным современным направлением в области извлечения знаний (data mining) и распознавания образов (pattern recognition), позволяя системе обучаться и адаптироваться в ходе работы.

Повторяющиеся виды заказов от одного и того же клиента, обнаруженные при рассмотрении истории работы планировщика, являются примерами таких образов, которые система может использовать для прогнозирования и более эффективного использования флота: предварительное бронирование для данного клиента позволяет не перераспределять заказы в «последнюю минуту» (если же этот большой заказ не состоялся, у системы остается возможность перераспределить имеющиеся заказы по-новому, с учетом оставшихся свободными ресурсов).

Любая закономерность, т.е. устойчивый «рисунок» (паттерн) в поведении логистической сети, сужает пространство планировочных решений и, следовательно, значительно сокращает работу по рассмотрению вариантов.

При этом структура подпространств кластеров, которая в традиционных алгоритмах data mining выбирается жестко для всех кластеров сразу (например, параметры заказов с датами их прихода), в разрабатываемых системах возникает в процессе кластеризации – и при этом у разных кластеров может формироваться различная структура. Таким образом, система может обнаруживать абсолютно неожиданные закономерности. С другой стороны, пользователи, зная, какие именно паттерны они ищут, могут задать свои требования и настроить фильтры, подсвечивающие нужные кластеры (например, имеющие максимальное число записей, или максимальную плотность скопления записей или динамику кластеров, переходящих перегиб от уменьшения – к росту и т.д.).

Кластеризация осуществляется следующим образом: каждой записи назначается агент; агенты записей сразу же после создания начинают посылать друг другу сообщения в поиске похожих записей для формирования кластеров; когда несколько агентов записей договариваются об образовании кластера, создается агент кластера, чья цель – привлечение новых записей; агенты записей и кластеров продолжают переговоры до завершения процесса кластеризации всех записей.

Благодаря способности сообществ агентов к самоорганизации, процесс кластеризации является очень гибким и может идти в реальном времени. В этом случае при поступлении новой записи, сообщество агентов пересматривает сформированные кластеры и находит наилучшее место для вновь прибывшей записи (данный процесс фактически полностью аналогичен описанному выше процессу планирования заказов и ресурсов в реальном времени).

Кластеры могут включать подструктуры (например, кластер заказов на перевозки в Европу может содержать несколько подгрупп заказов по перевозке товаров разных типов и в разные недели сентября). В очень динамической среде структуры кластеров часто изменяются с прибытием новых записей, в более устойчивых условиях структуры кластеров весьма постоянны.

Обнаружение кластера предполагает наличие правил, связывающих принадлежащие кластеру записи, и эти правила могут быть использованы в качестве эмпирических обобщений, например, заказы на перевозку нефти в Китай в декабре имеют определенный объем и т.д. Такие правила образуются и исчезают динамически и могут использоваться для принятия решений только в ситуации, сходной с существовавшей при сборе данных. Правила, полученные из данных, собранных в логистической среде, «искаженной» такими непредвиденными факторами, как например, локальные вооруженные конфликты в портах отгрузки или единичный скачок цен на нефть, не могут использоваться в ситуациях, на которые данные факторы не действуют. Тем не менее, эти правила гораздо чаще составляют предмет очень полезных «открытий», которые можно использовать в качестве прогнозов для менеджеров по маркетингу, сбыту и т.д., а также в качестве обобщений для принятия некоторых начальных решений в планировании.

*Адаптивная кластеризация может обнаружить совершенно неожиданные паттерны в данных, которые позволят с каждым запуском системы непрерывно улучшать качество планирования.*

В этом случае мультиагентная система для управления ресурсами может быть построена как две постоянно взаимодействующие подсистемы следующим образом (Рисунок 4.2).



Рисунок 4.2. Мультиагентная система, состоящая из Планировщика и Распознавателя

В такой архитектуре Планировщик может непрерывно отдавать результаты планирования Распознавателю, который извлекает закономерности из этих результатов и встречно корректирует знания и правила для коррекции логики планирования.

Таким образом, мультиагентные системы в ходе своей работы могут не только находить паттерны данных (обучаться), но они также способны автономно применять полученные знания для улучшения своих способностей к решению задач, в частности, к планированию.

Типичными примерами кластеров в логистике могут служить группы заказов, объединенные по их параметрам (пункты отправки и назначения, географические регионы, объем партии поставки), повторяющиеся последовательности заказов от различных клиентов, геометрические формы «хороших» маршрутов, группы сходных по свойствам грузовиков и т.п. Закономерность типа "Далекие заказы, требующие более 8 часов времени поездки, всегда едут на внешних перевозчиках", немедленно динамически порождает стратегию "Далекий заказ в начале размещать на третий флот», и только когда сформируется более плотно заполненное расписание, будет проверяться возможность улучшения ситуации путем использования собственных транспортных средств. Знание таких паттернов позволяет индивидуализировать агентов, используя приобретенный опыт планирования, например, легкий и мелкий заказ ведет себя не так, как далекий и объемный.

Использование новых знаний позволяет существенно улучшить качество и повысить эффективность принимаемых решений.

#### 4.7.4. Выявление и перестройка неблагоприятных участков

Неблагополучный участок решения – это секция расписания, в которой клиенты не удовлетворены расписанием, или ресурсы загружены не полностью, или выполняют убыточные перевозки и т.д.

Поиск таких «слабых звеньев» и переназначение ресурсов производится всегда, когда для этого у системы есть время или полученные результаты слишком критичны.

Для иллюстрации рассмотрим простейший планировщик, работающий в пакетном режиме. Все заказы и ресурсы известны заранее. Когда ресурсы начинают конкурировать за заказы, каждый пытается захватить наилучший вариант. Когда на рынке заканчиваются свободные заказы, каждый агент анализирует свое расписание на предмет неблагоприятных участков. Если, например, агент грузовика определяет такой участок в точке загрузки или разгрузки некоторого заказа, он делает попытку продать его другим агентам грузовиков, в случае если эта точка может повысить качество его расписания. Это предложение может вызвать конкуренцию между заинтересованными агентами грузовиков, и таким образом, начинается процесс перераспределения заказов и пошагового улучшения расписания. Процесс перераспределения ресурсов может быть инициирован любым агентом, который не полностью удовлетворен своими связями, до тех пор, пока есть время для продолжения улучшения расписания.

Аналогично работает и планировщик реального времени, сочетая фазы быстрой реакции на новые события и проактивного улучшения фрагментов расписания со стороны любых неудовлетворенных агентов.

Необходимо отметить, что такой планировщик, тем не менее, не всегда найдет наилучшее решение по всем критериям (которые, как известно, на практике могут быть противоречивы и даже не совместимы).

Для таких случаев предлагается возможность интерактивного взаимодействия с оператором, предоставляя возможные варианты для улучшения или изменения каждого важного решения.

Например, пользователь может отменить распределение любого заказа, установить ему новые цели или критерии, а также предпочтения и стратегии и начать его новое размещение.

В результате такого интерактивного взаимодействия оператора и системы, расписание наполовину «вручную» доводится до нужного уровня качества, отвечающего текущей потребности предприятия.

#### 4.7.5. Зависимые расписания / передача ограничений

Традиционные планировщики сначала составляют маршрут доставки, включающий, например, 7-15 точек погрузки и разгрузки грузов, и только после этого составляют расписания смен и поездок для водителей.

Этот последовательный (сверху-вниз) каскадный или водопадный бизнес-процесс не является наилучшим подходом, так как работа водителей жестко регламентируется различными правилами и инструкциями и должен иметь место также встречный процесс согласований, когда планирование осуществляется от ограничений водителей (например, в некоторый день в транспортной компании может иметься значительный недостаток водителей, обусловленный болезнями, отпусками и т.д.). Таким образом, составление расписания водителей не является последовательным процессом и может приводить к необходимости перестройки расписания грузовиков.

Предлагаемые планировщики должны составлять такое расписание, одновременно обеспечивая согласованный поиск решений для целой цепочки связанных между собой сущностей с взаимозависимыми расписаниями. В простейшем случае агент грузовика посылает заказ на водителя и, если необходимого водителя нет, запрашивает встречное предложение, когда водители могут быть доступны, после чего пересматривает свое расписание соответствующим образом.

Еще один способ может состоять в том, что наиболее подходящий водитель передает грузовику свои ограничения и тот уже не может планировать маршрут, не принимая во внимание ограничения водителя.

Например, если у самого подходящего для грузовика водителя есть только 2 часа, грузовик может принимать заказы только в географической области, достижимой из текущей точки его нахождения в течение 2 часов.

#### 4.7.6. Метод созидательных разрушений

В предлагаемом подходе штабной агент, отвечающий за интересы предприятия в целом, может играть большую роль, чтобы заботиться о глобальных интересах системы, или другими словами, максимизировать ценность решений для предприятия, влияя на стратегии агентов, правила работы на виртуальном рынке и налоги в системе.

Кроме того, если агент предприятия находит одну или несколько частей расписания, содержащих слабые связи, он может инициировать процесс перестроения этих частей расписания – ведь эта часть расписания могла сложиться под действием процессов, которые уже потеряли свою актуальность, но участвующие агенты по отдельности не могут «вырваться» из «тисков» самоорганизации в этом участке.

Перестроение может также основываться на изменении целей или критериев агентов, участвующих в переговорах, запущенных с тем, чтобы дать им возможность сформировать улучшенные структуры, направленные, например, на минимизацию затрат или снижение рисков. Для выполнения этой задачи на определенный период времени формируется новая группа агентов. Если перераспределение не вызывает нужного улучшения, предыдущее расписание может быть восстановлено.

Этот метод по своей природе близок методу «провокаций», в котором путем введения случайных возмущений ищется возможность для улучшения решений в классической численной оптимизации, но в предлагаемом подходе за счет комбинирования стратегий работы «сверху-вниз» и «снизу-вверх» обеспечивается большая интеллектуальность, гибкость и эффективность этого процесса. Агент предприятия должен постоянно следить за

результатами или процессами переговоров агентов, определяя неблагополучные участки и предлагая изменения с целью повышения ценности предлагаемых решений в нужном направлении, непосредственно в ходе планирования. Такое вмешательство не похоже на случайную «мутацию» в генетических алгоритмах (что вполне может также применяться, когда совершенно не остается никаких других вариантов), оно является результатом анализа проблемы.

Агент предприятия может также предложить кредит или инвестиции агентам важных заказов или дефицитных ресурсов, чтобы улучшить их позицию на виртуальном рынке. Посредством такого вмешательства агент предприятия, как представитель интересов глобального расписания, которое было создано взаимодействиями локальных агентов, обратным ходом влияет на работу этих же агентов, что является важным аспектом самоорганизации.

Важно также отметить, что у агента предприятия нет права указывать другим агентам, что делать и как правильно работать; он влияет на условия работы агентов и тонкую настройку их критериев, запуская процесс повторных переговоров агентов так же, как разумные руководители современных предприятий скорее помогают и стимулируют, нежели приказывают своим сотрудникам и дают прямые указания.

#### 4.7.7. Развитие микроэкономики реального времени

Микроэкономика в методе компенсаций регулирует процесс пересмотра принятых ранее решений и повторных переговоров агентов, направленных на поэтапную перестройку расписания; при этом учитываются специфические особенности новоприбывших заказов и текущее состояние расписания, и в процесс вовлекается только необходимое количество агентов потребностей и возможностей.

Напомним, что основной принцип метода компенсаций состоит в том, что если входящий заказ не может найти подходящий для себя свободный ресурс, он может предложить наиболее подходящему ему ресурсу, уже занятому другим заказом, компенсацию за разрыв связи с ним. Такое предложение может повлечь за собой волну переговоров, включая «просьбы» освободить данный ресурс от предыдущего заказа и установить связь вытесненного заказа с новым ресурсом. Волна разрывов существующих связей и установления новых может затронуть множество уже имевшихся размещений, особенно тех, которые только частично удовлетворяли участников.

Решающим правилом является условие, что сумма всех улучшений состояний агентов, например, при приходе нового заказа, превосходит сумму ухудшений других агентов, которые делают уступки первым ради общего блага.

Переустройство сложившихся ранее связей между возможностями и потребностями представляет собой процесс самоорганизации системы, который приводится в действие возникновением новой потребности и подпитывается имеющимися в наличии виртуальными деньгами. Процесс завершится, когда будет достигнуто новое равновесие или закончатся деньги, т.е. виртуальные деньги выступают в роли отсечки для длинных переговоров.

Виртуальные деньги, которыми оплачивается компенсация, предоставляются агентами заказа или ресурса, попросившими о повторных переговорах. В исключительных случаях, когда заказ принадлежит особо важному клиенту, Агентом предприятия может быть выделена дополнительная сумма виртуальных денег, чтобы обеспечить его выполнение даже за счет снижения ценности этого решения для предприятия.

Процесс самоорганизации в мультиагентных системах, «запускающийся» при возникновении определенных событий, в частности, при приходе нового заказа, имеет много интересных аспектов, которые можно наблюдать, изучая логи (протоколы) переговоров агентов. Один из

таких феноменов – возникновение «катастроф» (распадов больших участков тщательно созданного расписания), порожденных поступлением в систему даже совсем малых заказов. За каждой такой катастрофой следует интенсивное построение нового расписания, дающее, как правило, лучший результат.

В развитие метода компенсаций предлагается введение налогов на различные аспекты работы системы (пребывание в системе, коммуникацию и др.) и описанной выше валюты второго рода (валюта первого уровня рассчитывается на основе физических расходов, например, для грузовых перевозок, это стоимость топлива, амортизация грузовика и оплата водителя), которая описывает затраты на оплату работы агентов, коммуникацию между ними и т.д.

При этом появляются новые возможности для развития экономики реального времени.

В случаях с частыми событиями адаптивное перепланирование заказов и ресурсов в режиме реального времени с учетом налогов и экономики второго рода существенно увеличивают ценность решений компании, что является невозможным при использовании более простых методов, в которых распределение проходит на основе аукционов или по принципу «кто первым пришел, того первым и обслужили», без пересмотра ранее принятых решений.

В ситуациях, характеризующихся высокой изменчивостью, перестройка связей между заказами и ресурсами при возникновении любого значительного изменения имеет преимущества по сравнению с обычным инкрементальным подходом, когда связи заказов с ресурсами образуются по принципу захвата первого свободного слота времени в порядке поступления заказов.

Накопленные системой в целом или отдельными агентами виртуальные деньги могут инвестироваться в попытки глобального пересмотра принятых решений. Процесс самоорганизации на виртуальном рынке системы можно регулировать такими интервенциями Агента предприятия или изменением стратегий предприятия для достижения нужных результатов в каждый момент времени.

Кроме того, при декомпозиции модели предприятия до уровня агентов отдельных деталей и других сущностей становится возможным подсчитать индивидуальные затраты и прибыли по каждой единице продукции или отпущенной услуге, например, включая стоимость производства, транспортировки и хранения (Activity-Based Costing).

Наглядный график изменения себестоимости продукции за счет длительного хранения некоторой части изделий на складе может сразу подсказывать менеджерам, где можно вести оптимизацию и оценивать получаемые результаты.

Более того, рассмотренные выше возможности позволяют динамически в реальном времени формировать цены на продукцию и услуги с учетом изменяющегося баланса спроса и предложения, обеспечивая предприятию важные конкурентные преимущества.

Например, мультиагентные системы могут определять цену места в грузовике в качестве функции от спроса, прогнозируемой в реальном времени и изменяемой при каждой последующей продаже услуги по перевозке.

#### 4.7.8. Проактивность заказов и ресурсов

Проактивность – одно из ключевых условий эффективной работы в команде. Трудно представить себе продуктивную команду, все участники которой пассивны и не имеют предложений для улучшения общего результата.

И наоборот, весьма важными оказываются различные виды проактивности агентов заказов и ресурсов при построении систем эмерджентного интеллекта. Например, когда грузовики

недовольны тем, что они не полностью загружены, они могут проактивно искать другие варианты, предлагая свои услуги агентам заказов и применяя динамически рассчитываемые по ситуации скидки.

Агенты не полностью загруженных грузовиков могут перехватить инициативу и проактивно искать те заказы, которые загрузили бы грузовики полностью, что может делаться «зрячим» образом, исходя из уже принятых заказов. То же относится и к ранее распределенным заказам, которые были не активны по каким-либо причинам в течение некоторого времени, за которое ситуация могла измениться в выгодном для них направлении.

Успешное привлечение ресурсом заказов, ранее запланированных на других грузовиках, приводит к «волновому эффекту» повторных переговоров, что, в свою очередь, повышает ценность решений для предприятия.

Проактивность может быть также направлена и к пользователям. Система может предложить диспетчеру ускорить или отложить поставку определенных грузов, чтобы увеличить ценность решений для предприятия.

Например, если заказ, который должен быть доставлен завтра, может быть с выгодой доставлен сегодня, эта опция должна быть предложена клиенту, даже если он не требовал более раннюю поставку.

#### 4.7.9. Преодоление ограничений

Во многих задачах логистики имеется ряд ограничений, которые в реальной жизни могут быть иногда преодолены или даже совсем отброшены, если никакие другие варианты не могут быть найдены.

Рассмотрим пример, когда ни одному грузовику не разрешается прибывать на склад назначения после 13.00. Если, однако, в полученном расписании грузовик прибывает на склад в 13.05 и этот вариант единственный отлично подходящий для предприятия, следует задуматься о том, нельзя ли, в конце концов, преодолеть данное ограничение и дать данному грузовику возможность выполнить эту поездку, вместо того чтобы оставить заказ неразмещенным.

Решение о преодолении ограничений может быть поддержано путем анализа результатов матчинга (поиска соответствия) между агентами в реальном времени или просмотра лога переговоров агентов пост-фактум. Специально созданному агенту может быть дано поручение найти все возможные варианты преодоления ограничений (т.е. решения которые были уже «почти» приняты, но отвергнуты из-за небольшого нарушения ограничений). В данном случае 5 минут могут рассматриваться как относительно небольшое отклонение от правила с точки зрения склада, и система может самостоятельно принять решение о преодолении ограничения или запросить согласие от оператора планирования или менеджера склада.

В этом примере журнал переговоров агентов играет роль еще одной «глобальной структуры», которая временно создается и существует не только для протоколирования решений, но и для поиска и устранения «неблагополучных участков» в системе.

Это еще один случай, когда система проактивно выходит с предложением на пользователя – но теперь с предложением пересмотреть постановку предложенной ей ранее задачи, если при заданных условиях эту задачу решить не удалось.

#### 4.7.10. Ситуативная балансировка интересов агентов

Качество расписания зависит от достижения динамического равновесия между интересами всех участников в рассматриваемой системе.

В логистике перевозок такими участниками являются клиенты, заказы, грузовики, поездки, смена водителя, склады и т.д. Все они имеют значения, цели, предпочтения и ограничения и определенную сумму виртуальных денег. Отметим, что цели и предпочтения могут меняться в частном порядке во время процесса создания расписания за счет изменения стратегии предприятия в ответ на ситуативные изменения. Например, в некоторых ситуациях необходимо перевозить грузы быстрее и дешевле с учетом уровня приемлемого риска и отдельных ограничений/предпочтений грузовладельцев. В других случаях это может потребоваться, чтобы доставить такое количество грузов, какое в принципе возможно, чтобы обеспечить уровень обслуживания, которого ожидает VIP-клиент, даже если это уменьшает прибыль предприятия.

В некоторых случаях баланс интересов может быть достигнут только частично, в случае, когда участники в процессе планирования находят приемлемое расписание, несмотря на то, что некоторые участники не совсем довольны результатом.

Агент предприятия или, возможно, оператор, могут вмешаться в такие ситуации. Они могут изменить весовые коэффициенты между затратами, рисками, временем доставки и уровнем обслуживания, и, таким образом, спровоцировать новый виток локальных переговоров и поиска новых вариантов.

#### 4.7.11. Управление активностью агентов

Агенты могут находить в онтологии идеальные значения показателей, которые они максимизируют, а также выяснять, достигнуты ли эти значения в результате сделок на виртуальном рынке.

Удовлетворенным является тот агент, который обеспечил полное соответствие значения своего объекта требуемому уровню или, в некоторых случаях, если реализованное значение выше среднего по рынку. Агент является частично удовлетворенным, если значение показателей его объекта лишь частично соответствует необходимому уровню. Удовлетворенные Агенты могут защищать результаты своих договоренностей, тогда как частично удовлетворенные Агенты настроены на активный поиск лучших возможности для своих объектов.

Например, если агенту такси, заканчивающему работу, назначают клиента, который едет в направлении, противоположном дому водителя, то его агент будет только частично удовлетворен и начнет заранее искать “лучшего” клиента. С другой стороны, если агенту такси назначен клиент, который едет в том же направлении, в котором требуется поехать водителю, он будет полностью удовлетворен, и будет отклонять любые запросы от других агентов заказов без достойной компенсации.

Эта особенность помогает повышать прибыль предприятия, при определенных условиях, давая частично удовлетворенным агентам приоритет в перепланировании.

#### 4.7.12. Возможность ввода новых агентов «на лету»

Качество решений, как уже обсуждалось выше, во многом зависит от выбора уровня грануляции (детализации) агентов, чтобы принимать во внимание при выборе решений как можно больше важных факторов.

Например, если решается задача выдачи в аренду автомобилей, то важными агентами будут агенты станций сдачи машин в аренду, машин и водителей, а также задач, решаемых водителями (помыть, заправить, перегнать и т.д.).



Если же речь идет о стратегическом управлении цепочками поставок машин для аренды автомобилей, то агенты задач водителей на станциях могут не понадобиться.

Тем не менее, для постепенного повышения уровня сложности решений должна быть разработана возможность вводить новых агентов без полного перепрограммирования системы.

#### 4.7.13. Самопроверка и восстановление после сбоев

Как было показано ранее, способности рассматриваемых планировщиков к самоорганизации позволяют сети поставок быстро восстанавливаться в случае таких событий, как отмена заказа, задержка или поломка ресурса и т.д.

Механизм восстановления прост: агент, с чьим ресурсом/заказом связана проблема, направляет сообщение всем агентам по отношению «использует» с указанием, что больше не может служить ресурсом, это делает агентов свободными и запускает их активность по поиску новых ресурсов.

Проходит новая волна переговоров и пересмотра связей между ресурсами и заказами, и система переходит в новое рабочее состояние, отражающее новый баланс интересов всех участников.

Похожий механизм может использоваться для восстановления после непредвиденных сбоев в рассматриваемых планировщиках из-за дефектов данных или ошибок, не обнаруженных на стадии тестирования программного обеспечения.

В этих целях в системе может иметься агент расписаний, который следит за корректностью планов, составляемых агентами заказов и ресурсов. В онтологии этого агента может находиться описание «правильных» расписаний, говорящее о том, например, что в каждом плане есть, по крайней мере, одна операция, или время погрузки груза должно предшествовать времени его доставки клиенту. Обнаружив ошибку в расписании, вызванную, например, неправильными действиями агентов задач и ресурсов, такой агент расписания может осуществить «чистку» (удалит остатки операций неудачно запланированного заказа) и запускает заново процесс планирования для «сбойного» участка расписания - по сути, обеспечивая возможный обход поврежденных участков программной системы, т.к. первое расписание было построено при других начальных условиях.

В целом, такой подход обеспечивает большую надежность и живучесть в работе программной системы даже при наличии ошибок в данных и дефектов в исходном коде.

#### 4.7.14. Системы систем (рой роев)

Для решения очень сложных проблем управления ресурсами, например, планирования работы крупного предприятия по сборке авиационных двигателей или работы железнодорожных станций большой страны, требуются масштабируемые решения.

Рекомендуемое решение для этого случая состоит в том, чтобы создавать «системы систем» адаптивного планировщиков на основе сетцентрического подхода, взаимодействующих через общую шину предприятия так же, как ранее взаимодействовали агенты внутри одного решения.

Первый экспериментальный опыт такой работы будет описан в одной из последующих глав настоящей книги [40].

#### 4.7.15. Интеллектуальная пропускная способность агентов

Интеллектуальная пропускная способность агентов – концепция, разработанная учеными, исследующими командную работу, для измерения силы интеллектуального взаимодействия между членами команды.

Было показано, что взаимодействие в командах обычно строится на трех уровнях.

Наиболее часто в командах происходит обмен данными, что соответствует весьма узкой части общей ширины полосы пропускания смысловых сообщений между людьми (например, обсуждение цены конкретной вещи на рынке, обсуждение достоинств той или иной марки машины и т.д.). Результатом такого обсуждения является обычно лишь набор цифр или специфических фактов, которые мало применимы к другим ситуациям и к тому же часто меняются.

Ширина полосы пропускания и пропускная способность взаимодействия между людьми увеличивается, если участники обмениваются знанием. Знания позволяют моделировать и прогнозировать мир, объяснять, предвидеть или интерпретировать всевозможные данные, и потому это делает взаимодействие более продуктивным для всех участников.

В качестве примера таких знаний могут служить прогнозы, позволяющие моделировать изменения в мире. Агенты следующих поколений должны иметь возможность прогнозирования изменений, которые произойдут после следующего шага. Например, агент товара на полке должен знать, когда он может быть продан по общей динамике продаж данного вида товаров и беспокоиться, если дело идет по-другому, переопределяя время заезда машины в результате переговоров и объем своего товара в магазине для пополнения склада.

Другой пример может быть связан с агентом грузовика, который должен знать вероятность появления груза для подхвата на обратном пути.

Ширина полосы и пропускная способность команды достигает максимума, если предмет обмена – мудрость, которая интегрирует знания и обширный жизненный опыт, выраженный в готовых и проверенных жизнью рецептах, не требующих долгих рассуждений.

Возможность общения с мудрым человеком в команде позволяет за самое короткое время добиться наибольшего эффекта, радикально меняя направление работы, структуру команды, модель поведения людей, при этом в творческих командах всегда сохраняется возможность улучшить и развить решение.

Легко представить себе интеллектуальную силу команды, возникающую в результате эмерджентного взаимодействия «мудрейших», если они оказываются способны понимать и взаимодействовать друг с другом и согласны обмениваться мудростью.

Это перспективное направление остается наименее изученным и требует дальнейших исследований.

### 4.8. Работа с эмерджентным интеллектом

#### 4.8.1. Недетерминизм эмерджентного интеллекта

Программные агенты являются достаточно простыми программными объектами (программами), которые следуют собственной логике принятия решений, задаваемой набором состояний и правилами перехода.

Агенты при этом могут определять, какая логика принятия решений в настоящий момент наиболее подходящая, например, выбирая из набора сценариев самый подходящий для текущей ситуации.

Результатом работы агента, как правило, является сообщение агентам или модификация объекта (например, фрагмента расписания), который был построен другими агентами. При этом не известно, где и когда начнется тот или иной вид активности, как много будет центров активности (какие агенты начнут работать и когда), какие процессы будут идти последовательно, а какие параллельно, как много стартует параллельных нитей, какие отношения установятся между элементами и т.д.

Недетерминизм поведения роя агентов является прямым следствием «смешения» (взаимного влияния) поведений множества разных машин состояния, которые работают последовательно или параллельно, синхронно или асинхронно по отношению друг к другу, активируют или прекращают работу друг друга и передают друг другу сообщения.

Но такое поведение, хотя и недетерминированное, не является случайным. Каждый агент, прямо или косвенно, принимает во внимание предложения других членов группы (роя), и этот факт согласований действий помогает агентам улучшать качество решений и достигать результаты в кратчайшие сроки.

При этом говорят, что агенты работают «на границе хаоса», поскольку им часто ничего не стоит установить новую или разорвать уже существующую связь, что диктует их высокую чувствительность к изменениям и может порождать нестабильность результата, когда вдруг, как в калейдоскопе, найденное решение заменяется на совершенно другое, не имеющее ничего общего с прежним («эффект бабочки»).

Недетерминированность процесса не означает только, что результат запуска программы при одних и тех же условиях всякий раз будет иной (это случается по ряду причин, например, не так просто восстановить начальное состояние для старта системы, учитывая большую прослойку операционной системы, различные стратегии квантования, которые влияют на то, кто первым начнет переговоры и т.д.). Это означает, что система не работает по заранее определенному жесткому плану, предписанному для каждой заранее предусмотренной ситуации. Это также означает, что в случае возникновения непредвиденного события система гибко найдет способ выполнить поставленную задачу, а не сразу выйдет из строя, как это делают современные программы. Для случая транспортной сети, непредвиденное событие может привести к тому, что перевозка просто замедлится, разделится на несколько «ручьев» (каналов), поменяет перевозчика, резко сдвинутся сроки отправки грузов и т.п.

Неотъемлемый внутренний недетерминизм реальной транспортной системы или цепочки поставок находит полное соответствие с недетерминизмом команды агентов. Поэтому предлагаемый умный «рой» агентов может моделировать, планировать и выполнять различные ситуации реальной жизни.

Последствия такого «сдвига парадигмы» от централизованных и последовательных алгоритмов к параллельным и недетерминированным взаимодействиям программ в сложно-адаптивных системах для различных аспектов взаимодействия человека и компьютера сложно переоценить. Достаточно, например, только сказать об открывающейся возможности эволюционного создания компьютерных программ, когда программист может добавлять новые части кода (новых агентов) в диалоговом взаимодействии с системой, без ее останова или перезапуска.

Другая возможность заключается в использовании совершенно новой интерактивной системы взаимодействия с пользователем, которая больше похожа на увлекательную игру, чем на традиционный оптимизатор. Выходя на пользователя с некоторым черновым решением, основанным на текущей ситуации, система всегда готова гибко «переиграть» цели и задачи любой компоненты, а также достроить и перестроить варианты, не начиная «с нуля», а

двигаясь от «достигнутого», причем еще и в зависимости от оставшегося в распоряжении оператора времени.

Все эти новые открывающиеся возможности являются результатом перехода к интеллектуальным системам нового поколения, базирующимся на самоорганизации.

#### 4.8.2. Проявления эмерджентного интеллекта

Создаваемые самоорганизующиеся системы все больше отличаются от традиционных компьютерных программ – постепенно превращаясь в автономные интеллектуальные системы, способные работать в полном цикле любого живого организма, включая фазы восприятия, планирования и контроля исполнения планов.

Такие системы способны автономно реагировать на непредвиденные события путем перепланирования частей расписания, которые были затронуты этими событиями. Реакция на одно и то же событие каждый раз меняется в зависимости от ситуации, в момент его возникновения. Система быстро находит возможный вариант встраивания события в план, не выполняя полный комбинаторный перебор всех вариантов, а лишь адаптивно изменяя существующие договоренности для разрешения возникших конфликтов. Предложения агентов улучшаются контрпредложениями поэтапно, пока дальнейшие улучшения не станут незначительными (убывающая доходность) или система не исчерпает время, отведенное на планирование.

Эти аспекты поведения создаваемых интеллектуальных систем существенно отличают их от детерминированного поведения алгоритмических систем, позволяя более эффективно распределять возможности по потребностям в изменяющихся условиях.

Ключевой вопрос при этом в том, как управлять самоорганизацией и взаимодействием агентов, чтобы достигнуть желаемого состояния.

Недетерминизм, присутствующий в мультиагентной системе, наделяет её интеллектуальным поведением, но иногда и служит причиной ряда проблем для разработчиков и пользователей системы, в числе которых можно отметить следующие:

- Поведение системы трудно предсказуемо, хотя система всегда находит сбалансированное решение по обстоятельствам ситуации.
- Реакция системы на события может сильно колебаться от быстрой до медленной, когда необходимы большие изменения в расписании.
- Система может выходить на пользователя и делать запросы в заранее не предвиденные моменты времени.
- Почти невозможно проследить за причинно-следственной цепочкой волновой реакции при входящем потоке событий.
- Необратимая эволюция расписания не позволяет сделать откат к его предыдущим версиям, если только не было специального сохранения.
- Зависимость результатов от времени усложняет анализ поведения системы.
- Решение трудно объяснить пользователю путем прослеживания всех многочисленных взаимодействий.

Вместе с тем, решение этих проблем всегда легко осуществляется в рамках конкретных приложений, как правило, на основе учета специфики предметной области.

#### 4.8.3. На пути к нелинейной термодинамике

Интересно, что мультиагентная система, созданная, в первую очередь, для составления сложных расписаний грузовых перевозок, вдруг начинает демонстрировать нелинейное поведение, аналогичное поведению живых систем.

Если в продолжение этой аналогии постараться найти причины любых событий в системе, то, как и в реальном мире, можно обнаружить, что все они являются результатом стечения множества обстоятельств, и ни одно из них не было создано преднамеренно и ни одно из них не могло быть предсказано, поскольку итоговое решение распределения ресурсов по потребностям является результатом сотен и тысяч *Предположений* и *Опровержений* по терминологии Карла Поппера [41].

Согласно Карлу Попперу, вся наука движется вперед методом проб и ошибок следующим образом. Сначала предлагается гипотеза, которую проверяют, и результаты проверки встраиваются в улучшенную версию теории, которую снова проверяют. Процесс повторяется до тех пор, пока теория не становится стабильной. Тогда ее только и можно считать новой теорией. Карл Поппер описывает этот процесс как последовательность предположений и опровержений. Этот процесс аналогичен диалектике Гегеля, которая состоит из трех шагов: «тезис, антитезис и синтез».

Не правда ли, этот процесс напоминает образование сложных молекул из простых, а также рассмотренный выше процесс формирования сложных расписаний?

Наши многочисленные эксперименты позволяют продолжить эту мысль и еще более укрепить связь наших результатов с нелинейной термодинамикой И.Пригожина.

Так, уже сейчас видна возможная связь между количеством сообщений между агентами, приходящихся на условную единицу пространства сцены мира агентов в единицу времени, и информационной «температурой» в этой точке пространства.

Вполне логично допустить, что чем выше «плотность» сообщений, а значит, тем больше количество конфликтов во фрагменте сцены, которые нужно разрешить, тем выше будет такая «температура» в этой точке и, скорее всего, тем больше времени понадобится для разрешения спорных вопросов (чем больше конфликтов – тем больше сообщений в этой зоне – тем «горячее» ситуация).

Выявление фрагментов расписания с высокой «температурой» показывает проблемные зоны расписания, которые могут быть эффективно распараллелены на другие сервера, а изменение параметров микроэкономики виртуального рынка или проведение точно направленных интервенций в «больные» зоны открывает радикально новый способ управления качеством и эффективностью построения расписаний.

Если считать, что виртуальные деньги эквивалентны энергии, а виртуальные налоги задают механизмы диссипации (потерь на трение), и что любое расписание как сеть связей между потребностями заказов и возможностями ресурсов является устойчивым неравновесием (неустойчивым равновесием), отражающим баланс (консенсус) их интересов, можно говорить о том, что впервые термодинамика Пригожина может быть полноценно воссоздана в компьютерном мире как совершенно новый способ решения сложных задач, при котором осуществляется направленное управление самоорганизацией виртуального мира.

Возможно, что помимо управления ресурсами, эти новые подходы, модели и методы позволят в будущем решать и другие самые сложные задачи, стоящие сегодня перед человечеством.

## 4.9. Оценка уровня адаптивности системы

Эмерджентный интеллект должен обеспечить мультиагентной системе возможность адаптивного поведения при возникновении различных событий на различных уровнях.

Адаптивность системы может предполагать также изменение как ее структуры, так и логики функционирования с целью сохранения текущего или достижения другого заданного состояния при изменении внешних условий.

Рассмотрим возможный подход к измерению *уровня адаптивности* системы.

Пусть 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.

В этой связи, для оценки динамики мультиагентной системы предлагается подсчитывать среднюю удовлетворенность  $y$  агентов задач и ресурсов в зависимости от времени:

$$y(t) = \frac{\sum_j y_j^{task}(t) + \sum_l y_l^{res}(t)}{M(t) + N(t)} \quad (1)$$

где  $y_j^{task}$  – удовлетворенность агента  $j$ -й задачи,  $y_l^{res}$  – 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 (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  $y_1$ , но через время  $T$  стабилизируется на новом уровне  $y_2$  за счет перепланирования (Рисунок 4.3).

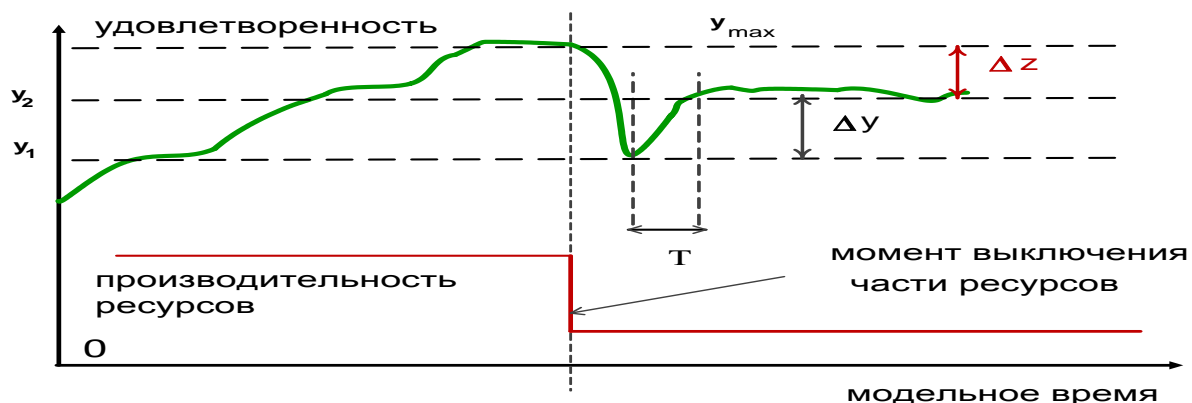


Рисунок 4.3. Адаптивность системы по событию выхода из строя ресурса (частичная потеря и последующее восстановление удовлетворенности)

Как видно из Рисунка 4.3, после момента максимального спада средней удовлетворенности до уровня  $y_1$ , через время  $T$  система приходит к новому квазиравновесному состоянию  $y_2$ ,  $\Delta z = y_{max} - y_2$  – безвозвратно потерянная удовлетворенность.

Подобный эффект частичного восстановления может наблюдаться не только при исключении ресурсов, но и при появлении новых задач и других событиях.

Фактически, чем больше прирост ценности решения и чем меньше время переходного процесса в реакции системы на событие, тем выше уровень адаптивности системы.

Так определенная степень адаптивности системы может служить основой для оценки меры ее эмерджентного интеллекта [42].

## Выводы:

1. Базовое интуитивное понимание эмерджентного (вспыхивающего) интеллекта связывается с процессами протекания автокаталитических реакций в самоорганизующихся системах.

2. Ближайшие аналогии из мира природы и мира бизнеса помогают понять ограниченность представлений об искусственном интеллекте как механической сборке «умных» модулей (дедукции, индукции и других).

3. Предлагается концепция «эмерджентного интеллекта» интеллектуальной системы нового поколения, базирующаяся на процессах самоорганизации и эволюции.

4. Предложен ряд моделей и методов, позволяющих от относительно простого «интеллекта роя» и «командного интеллекта» перейти к более сложному «эмерджентному интеллекту», использующему знания о предметной области и обучение из опыта, прогнозирование и моделирование, а также другие высоко интеллектуальные функции.

5. Предложенная мера адаптивности позволяет оценить выигрыш от оперативной перестройки планов по событиям в реальном времени.

6. Мера адаптивности может быть использована и для оценки силы эмерджентного интеллекта системы.

## Список литературы

1. Rzevski, G (ed.), "Mechatronics: Designing Intelligent Machines", Butterworth Heinemann, 1995.
2. Newell, A. and Simon, H. A. GPS, a Program that Simulates Human Thoughts. In Billing, H. (ed.), Lernende Automaten, 1961, pp. 109-124.
3. Feigenbaum, E. A., Buchanan, B. G. and Lederberg, J. "On Generality and Problem Solving: A Case study using the DENDRAL Program". In Meltzer, B. and Michie, D. (eds) Machine Intelligence, Volume 6, 1971, pp. 165-190.
4. McDermot, J. "R1: A Rule-Based Configurer of Computer Systems". Artificial Intelligence, Volume 19(1), 1982, pp. 39-88.
5. Rumelhart, D. E. and McClelland, J. L. (eds) "Parallel Distributed Processing", MIT Press, Cambridge, 1986.
6. Rzevski, G., Skobelev, P., "Emergent Intelligence in Large Scale Multi-Agent Systems". International Journal of Education and Information Technology, Issue 2, Volume 1, 2007, pp. 64-71.
7. Minsky, M., "The Society of Mind". Heinemann, 1985.
8. Edelman, G., "Bright Air. Brilliant Fire. On the Matter of the Mind". Allen Lane the Penguin Press, London, 1992.
9. Noble, D., "The Music of Life". Oxford University Press, 2006.

10. Bonabeau E., Theraulaz G. Swarm Smarts. What computers are learning from them? // Scientific American. – 2000. - Vol. 282. - N 3. – P. 54-61.
11. Eric Bonabeau. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. [http://www.redfish.com/research/bonabeau\\_abm.pdf](http://www.redfish.com/research/bonabeau_abm.pdf).
12. Коновалов А.И. Супрамолекулярные системы – мост между неживой и живой материей. <http://www.youtube.com/watch?v=reMOIIV584Y>.
13. Luca Maria Gambardella, Eric Taillard, Giovanni Agazzi. MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System For Vehicle Routing Problems With Time Windows – Technical Report IDSIA, Lugano, Switzerland, 1999.
14. Dr. Jonathan Thompson. Ant Colony Optimisation. School of Mathematics, Cardiff University, SWORDS, 2004.
15. Ants Factory: <http://mas.cs.umass.edu/downloads>.
16. Agent Technology: Computing as Interaction. A Roadmap for Agent Based Computing - <http://www.agentlink.org/roadmap/index.html>.
17. Rzevski George, Skobelev Peter and Korablin Mikhail: "Multi-Agent Models of Networked Organizations". Proc. of Intern. Workshop "New Models of Business: Managerial Aspects and Enabling Technology", School of Management of Saint Petersburg State University, Russia, June 28-29, 2001. – P. 46-49.
18. V.A. Vittikh, V.B. Larukhin, A.V. Tsarev. Actors, Holonic Enterprises, Ontologies and Multi-Agent Technology // V. Marik, J.I. Martinez, P. Skobelev (Eds.): Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2013), August 26 - 28, 2013, Prague, Czech Republic. – HoloMas 2013, LNAI 8062. – P. 13-24, 2013. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013. /
19. <http://www.kurzweilai.net/meme/frame.html?main=/articles/art0463.html%3Fm%3D4>
20. Московский международный синергетический форум. - <http://www.synergetic.ru/>
21. Chaoscope. - <http://www.btinternet.com/~ndesprez/>
22. G. Nicolis and I. Prigogine. Selforganisation in Nonequilibrium Systems: from Dissipative Structures to Order through Fluctuations, John Wiley, 1971
23. I. Prigogine. Is Future Given? World Scientific, 2003.
24. G, Nicolis and I. Prigogine, Exploring Complexity, W H Freeman, 1939.
25. I. Prigogine. The End of Certainty. The Free Press, 1997.
26. Koppers G. Self-organization - The Emergence of Order. From local interactions to global structures. no2, PDF, July 1999 - <http://www.uni-bielefeld.de/iwt/sein/paper>.
27. Stuart A. Kauffman At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity, Oxford University Press, New York, NY, 1995.
28. Stuart A. Kauffman, The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution, Oxford University Press, New York, NY, 1993.
29. John H. Holland, Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity, Addison-Wesley, 1995.
30. John H. Holland, Emergence: From Chaos to Order, Oxford University Press, NY, 1998.
31. Skobelev P., Glashenko A., Grachev I., Inozemtsev S. MAGENTA Technology Case Studies of Magenta i-Scheduler for Road Transportation - Proceedings of 6th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS'07; Honolulu, HI; United States; 14 - 18 May 2008. 2007, Article number 273, Pages 1390-1397.
32. Onn M. Shehory, Katia Sycara and Somesh Jha. Multi-agent Coordination through Coalition Formation. Report on work supported in part by ARPA Grant #F33615-93-1-1330, by ONR Grant #N00014-96-1-1222, and by NSF Grant #IRI-9508191.



33. Talal Rahwan. Algorithms for Coalition Formation in Multi-Agent Systems. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering, Science and Mathematics of School of Electronics and Computer Science, August 2007.
34. Абрамов Д. В., Андреев В. В., Симонова Е. В., Скобелев П. О. Разработка средств построения и использования онтологий для поддержки принятия решений // Труды VII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 27 июня - 1 июля 2005 года. Самара. 2005. – С. 435-440.
35. Скобелев П.О. Онтология деятельности для ситуационного управления предприятиями в реальном времени // Онтология проектирования. – 2012. № 1(3). – С. 6 – 38.
36. Andreev V., Iwkushkin K., Minakov I., Rzevski G., Skobelev P.: The Constructor of Ontologies for Multi-Agent Systems. In 3rd International Conference 'Complex Systems: Control and Modelling Problems', Samara, Russia, September 4-9 2001. – P. 480–488.
37. G Rzevski, I Minakov, P Skobelev. Data Mining. - Patent Application No. 0403145.6, 2004.
38. Вольман С. И., Карягин Д. В., Минаков И. А., Скобелев П. О. Разработка системы нахождения бизнес правил с использованием кластеризации на примере данных логистических компаний // Труды VII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 22 июня-28 июня 2005 года. Самара. 2005. – С.409-413.
39. Andreev M., Ivaschenko A., Skobelev P., Tsarev A. A Multi-Agent Platform Design for Adaptive Networks of Intelligent Production Schedulers. – 10-th International IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Lisbon, Portugal, 1-2 July 2010. – Volume 10, Issue PART 1, 2010, Pages 78-83.
40. Popper, K., "Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge". Rutledge & Kegan Paul Ltd, London (1963).
41. Petr Skobelev, Igor Mayorov, Sergey Kozhevnikov, Alexander Tsarev, Elena Simonova. Measuring adaptability of "swarm intelligence" for resource scheduling and optimization in real time // Proceedings of the 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2015), Lisbon, Portugal, 10-12 January, 2015. – Vol. 2. – SCITEPRESS. – P. 517-522.

# ЧАСТЬ 2 - КОММЕРЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

## ГЛАВА 5: Адаптивное планирование морских танкеров

### Проблема

Одним из первых наших заказчиков стала компания в Лондоне, располагающая крупнейшей флотилией танкеров третьего класса VLCC (Very Large Crude Carrier) – это очень большие танкеры грузоподъемностью от 160 000 до 320 000 тонн для перевозки нефтепродуктов.

Флот этой компании, объединившей танкеры разных судовладельцев во избежание конкуренции и демпинга цен, насчитывал более 40 кораблей, что составляло немногим менее 10% общего объема мирового танкерного флота. Данный флот использовался для транспортировки сырой (не прошедшей очистку) нефти из Персидского залива на восточное и западное побережья США, а также из Колумбии в Европу и Азию.

Составление маршрутов и расписаний движения танкеров осуществлялось командой из пяти очень опытных и квалифицированных диспетчеров. Эти специалисты, занимающиеся планированием общего флота, так же как и сами компании-участники проекта и принадлежащие им танкеры, были распределены по разным странам и работали в разных временных зонах.

Рынок транспортировки нефти, на котором действовала компания, был подвержен частым изменениям в силу колебаний спроса и предложения и нестабильности цен на нефть, изменений транспортных налогов и т.д.

Однако действовало и много других непредсказуемых факторов, влияющих на управление танкерами, например, очередь танкеров, образующаяся на входе в Панамский канал, и постоянные колебания платы за проход через этот канал, зависящие от длины очереди. Танкеры, принадлежащие заказчику, были слишком большими, чтобы войти в канал с полной загрузкой (не позволяла глубина осадки), поэтому им приходилось выгружать часть нефтепродуктов, которая затем перемещалась по трубопроводу на другой конец канала и далее загружалась там обратно в танкер.

Из-за многочисленных тесных связей между операциями в расписаниях танкеров даже небольшие изменения в одной его части могли иметь трудно предсказуемые серьезные последствия для другой, казалось бы, независимой, части расписания.

Ресурсы в нашей задаче имели много ограничений, в частности, суда обладали фиксированными параметрами (объем и тип перевозимой нефти), которые должны были учитываться при проектировании расписания. Более того, различные клиенты, так же как и суда, имели различающиеся индивидуальные предпочтения, которые нужно было принимать во внимание. Например, владельцы некоторых судов имели черные списки портов, в которые их суда не имели права заходить, и также порты имели списки судов, которым запрещалось в них разгружаться. Важно было также оперативно решать, где лучше заправиться самому танкеру, в каком порту оставаться для ожидания следующего заказа и какое время его ожидать, по каким морским путям двигаться, прогнозировать погодные условия и т.п.

Ошибки в планировании танкерного флота обходятся очень дорого, поэтому диспетчеры должны создавать тщательно продуманные и обоснованные расписания, легко читать и понимать их, а при необходимости – быстро и качественно дорабатывать.

Неожиданная перспектива потери услуг главного диспетчера из-за внезапной болезни побудила клиента всерьез задуматься о приобретении системы для планирования.

Все попытки заказчика найти на рынке готовое решение для этой сложной задачи оказались безрезультатными.

## Решение

### Краткий обзор

С первых шагов разработки стало ясно, что мировой рынок транспортировки нефти, на котором действовал наш заказчик, - чрезвычайно сложная система, включающая в себя добывающие компании и крупных потребителей, перевозчиков, порты и поставщиков топлива, а также других участников, включая даже политиков.

При этом стало очевидно, что высокая и совершенно неконтролируемая динамика событий изменений на этом рынке требует не только построения качественного начального расписания, но и гибкого и адаптивного (без остановки) событийного изменения построенных планов в непрерывно-скользящем режиме.

Разработка такого мультиагентного планировщика и стала нашим первым применением мультиагентных технологий для управления ресурсами в реальном времени [1].

Планировщик состоял из базовых компонент, описанных в первой части книги, а именно: базы знаний, виртуального мира агентов, интерфейсов пользователей, реализованных на платформе J2EE.

Первая версия планировщика имела простейшую встроенную «жесткую» онтологию, выполненную как объектная модель, и логику работы, реализующую методы, близкие методам поиска решения в глубину.

### База знаний

Фрагмент разработанной онтологии для планирования танкеров показан на рис. 5.1.

Среди классов объектов представлены: Танкер, Домашняя страна, Клиент, Владелец, Заказ, Маршрут, Груз, Порт погрузки, Порт назначения, Точка заправки, Текущий статус.

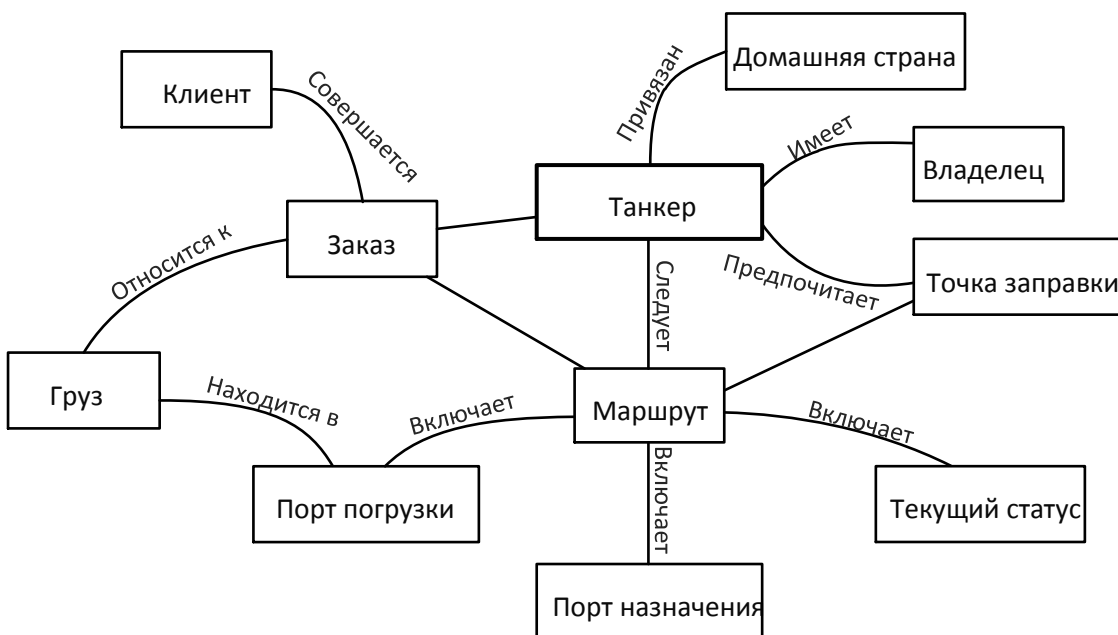


Рисунок 5.1. Фрагмент онтологии танкеров

Наличие данных понятий позволило задавать и программировать логику планирования фактически на специализированном проблемно-ориентированном языке предметной области управления танкерами.

## Виртуальный мир

В виртуальный мир танкерной компании были включены следующие программные агенты:

- Агент флота (агент предприятия), главной заботой которого является приоритизация заказов и ресурсов согласно политике роста стоимости предприятия.
- Агент заказа, ищущий наиболее подходящий ресурс (судно, команду) с учетом даты доставки и стоимости ресурсов, включая цену порожних пробегов, заправки танкера топливом и т.д.
- Агент маршрута, который прокладывает оптимальные пути для танкеров с учетом сроков заказов, расстояний, точек заправки и порожних пробегов.
- Агент танкера, заботящийся о наиболее эффективном использовании судна.
- Агент конкурентов, который наблюдает за ценообразованием услуг конкурирующих флотов и следит за конкурентоспособностью предложения собственного флота, включая позиции конкурентов, о которых сообщают капитаны своих танкеров в каждом порту.
- Агент груза, следящий за тем, чтобы нефть была размещена в танкере с подходящими свойствами и надлежащим оборудованием с учетом габаритов и типа груза, а также транспортных пошлин на тот или иной тип нефти.
- Агент команды, подбирающий танкеру персонал с учетом предстоящего маршрута, специализации членов команды, размеров оплаты труда и расписания движения танкера.
- Агент порта, который следит за тем, чтобы на посещение портов планировались только суда, имеющие соответствующие разрешения для данных портов. При этом агент должен учитывать ряд финансовых и юридических факторов.
- Агент заправки, осуществляющий поиск лучших точек заправки, балансируя между стоимостью топлива на них и стоимостью пути до этих точек.

Все диспетчерские решения по распределению ресурсов и созданию расписания принимаются посредством переговоров между программными агентами. Например, агенты заказов, грузов и танкеров договариваются о распределении танкеров между заказами, в то время как агенты заказов, танкеров, маршрутов, портов и заправок обсуждают маршруты для каждого танкера.

Если танкер ломается и нуждается в починке, агент танкера отправляет сообщение всем связанным с ним агентам заказов, информируя их о прерывании выполнения назначенных задач. Агенты заказов, в свою очередь, выходят заново на виртуальный рынок и начинают новую волну переговоров, подбирая другие суда, маршруты, команды и прочие ресурсы, чтобы все же выполнить требования заказов.

Если цена на топливо на выбранной заправочной точке неожиданно изменяется, агент заправки отправляет сообщение агентам танкеров, которых затрагивает это событие, и которые начинают новый круг переговоров, чтобы выбрать себе маршрут с посещением более дешевой точки заправки.

## Соединяя виртуальный и реальный миры

Еще до внедрения нашего планировщика в распоряжении заказчика находилась централизованная база данных, где сохранялась и регулярно обновлялась информация о создаваемых расписаниях и фактических движениях судов.

Эта база данных была задействована в качестве основного хранилища информации и выступала в качестве узла связи (хаба), через который адаптивный планировщик получал и отправлял сообщения в остальные подразделения компании.

На каждом танкере, в свою очередь, находился терминал, подключенный непосредственно к этой базе данных. Местоположение танкеров контролировалось при помощи GPS и записывалось в базу данных планировщика.

Диспетчеры общались с клиентами по телефону и вручную вводили их заказы в базу данных вместе с необходимой сопутствующей информацией.

Важным требованием была оперативность работы планировщика, который должен был успевать выдавать решения – новые планы с расчетами себестоимости и прибыли – уже в ходе телефонного звонка клиента на перевозку нефти.

Менеджеры клиентов могли наблюдать за работой флота через экраны, подключенные к нашему планировщику.

Владельцы танкеров могли отслеживать степень использования своих ресурсов, общий доход флотилии и формирующуюся собственную прибыль.

## Результаты внедрения

Финансовый результат внедрения нашего первого промышленного адаптивного планировщика оказался весьма значительным:

- ежегодная экономия на порожних пробегах составила не менее 3 дней на каждый танкер, при условии, что цена 1 дня простоя такого танкера – около 150 тыс. долларов США;
- время возврата инвестиций с учетом сокращения этих порожних пробегов танкеров флота в 40 судов составило менее 6 месяцев;
- стоимость одного специалиста-диспетчера высокого класса составляет не менее 100 тысяч фунтов в год, а обучается новый человек не менее 5 лет – разработанная система позволила сократить данное время в 1.5-2 раза и сделать бизнес компании менее зависимым от конкретных персоналий;
- были и другие существенные статьи сокращения издержек, которые трудно оценить количественно. Например, планировщик снизил число часто скрываемых ошибок в расчетах поставок нефти и, следовательно, выплаты неустоек.

В дальнейшем знания о предметной области транспортировки нефтепродуктов были впервые собраны вместе и вынесены в онтологию компании с возможностью редактирования объектов и связей, легко обновляемую и модифицируемую, по крайней мере, программистами.

Планировщик был разработан как для работы в режиме моделирования и оценки возможности приема и размещения новых заказов, так и для поддержки принятия решений в реальном времени.

В режиме реального времени планировщику требуется от нескольких секунд до нескольких минут, чтобы провести анализ ситуации при поступлении нового заказа и показать рассчитанные стоимости размещения этого заказа в плане компании и получаемую при этом прибыль. Это позволяет более оперативно вести переговоры и принимать решения прямо в ходе телефонного разговора в ответ на запросы клиентов.

В результате существенно повысилась конкурентоспособность компании на рынке.

## Список литературы

1. Himoff J., Skobelev P., Wooldridge M. Magenta Technology: Multi-Agent Systems for industrial Logistics – Proceedings 4th International Conference on Autonomous Agents and Multi agent Systems, AAMAS 05; Utrecht; Netherlands; 25 July 2005 through 29 July 2005. Pages 99-105.

# ГЛАВА 6: Адаптивное планирование такси

## Проблема

На момент запуска проекта по управлению такси в распоряжении нашего заказчика – самой крупной и широко известной Лондонской службы корпоративных такси для крупных банков и других известных компаний (не путать с черными кэбами) – находился парк в 2000 автомобилей, оборудованных GPS-навигаторами.

В этом парке были представлены самые разные машины, включая престижные дорогие марки представительских автомобилей для встречи Мадонны в аэропорту, а также микроавтобусы и внедорожники, и даже прицепы для выезда на природу. Некоторые автомобили были оснащены специальным оборудованием в кабине для того, чтобы отвечать особым требованиям клиентов.

Одновременно до 700 водителей работали ежедневно, конкурируя между собой в борьбе за клиентов.

В арсенале компании находилась современная ERP-система, а также центр приема звонков из более чем 100 операторов, одновременно принимающих заказы на такси. Часть вызовов клиенты делали через интернет-сайт.

Многочисленная команда квалифицированных диспетчеров подбирала клиентам автомобили.

Ниже представлены основные характерные особенности работы компании и требования к работе планировщика:

- очень большое количество заказов: до 13 000 в сутки;
  - высокая интенсивность потока заказов в час пик - иногда более 1500 в час;
  - время поступления заказов и точки маршрутов были непредсказуемы;
  - большая разнородность заказчиков, в число которых входили VIP-клиенты, физические лица и компании, которые заказывали и детские кресла, и транспортировку людей с инвалидностью, и перевозку домашних животных. На разные группы клиентов распространялись различные системы скидок, которые менялись в зависимости от уровня прибыльности клиента;
  - большое количество вольнонаемных водителей (фрилансеров), арендующих автомобили у компании. Им разрешалось самим определять удобный для них график работы, который можно было изменять изо дня в день;
  - ключевым требованием являлась необходимость выдерживать гарантированное время подачи такси в центре Лондона, которое должно составлять менее 15 минут с момента поступления заказа, это был главный маркетинговый девиз компании;
  - требовалось разработать систему, которая находила бы наиболее выгодные варианты распределения водителей по клиентам в адаптивном режиме с учетом высокой динамики заказов;
  - система должна учитывать, что водитель по пути к себе домой также может подвозить клиентов, чтобы сократить холостой ход – расстояние, пройденное таксистом без пассажиров;
  - следует отдавать приоритет водителям, получившим меньшее количество заказов в день, чтобы повысить их уровень удовлетворенности от работы.
- В процессе работы диспетчеров постоянно возникают события, требующие перестроения плана, к числу которых можно отнести:

- появление новых заказов;
- изменение или отмена уже принятых к исполнению заказов;
- изменения в анкетных данных водителей;
- изменения статусов водителей и их расположения;

- неявка клиента и ложные вызовы;
- поломки транспортных средств и ДТП с участием такси;
- задержки, обусловленные высокой плотностью движения;
- задержки, обусловленные очередями в аэропортах и железнодорожных вокзалах и т.д.

Планирование работы водителей и использования автомобилей в описанных условиях представляется чрезвычайно сложной задачей, решить которую невозможно с применением традиционных методов.

Имевшийся у заказчика обычный планировщик, хватавший первую ближайшую машину в момент появления нового заказа и далее не изменявший этого плана при появлении рядом более выгодных заказов, начал быстро «задыхаться» с развитием бизнеса и ростом числа заказов, порождая очевидно невыгодные варианты поездок.

## Решение

### Краткий обзор

Причины основных сложностей в бизнесе такси – это высокая степень непредсказуемости появления заказов и нахождения машин, большой разброс в расположении первоначальных и конечных точек маршрута, необходимость учета индивидуальных требований клиентов, постоянно меняющаяся плотность городского движения, очень высокая частота негативных событий и различные требования водителей.

Нашим решением было использование адаптивной мультиагентной системы, способной обеспечить непрерывное оперативное распределение такси по клиентам (на это требуется всего несколько секунд), что дает возможность за короткое время исключить или минимизировать последствия любого негативного события и извлекать максимальную пользу из любого позитивного события [1].

Процесс планирования в системе построен на взаимодействии между агентом заказа и агентами водителей. Последние представляют в системе таксистов, находящихся неподалеку от клиента – в радиусе достижимости заказа за заданное время. Как только меняется количество заказов на такси или наличие готовых к работе автомобилей, система мгновенно реагирует на это перераспределением водителей по заказчикам в реальном времени. При этом планировщик вносит только такие изменения, которые гарантированно увеличивают прибыль компании.

Планировщик работает в операционной платформе компании, интегрирующей модули расчета зарплаты водителей и другие.

Система размещается на сервере приложений и взаимодействует с другими модулями также путем обмена сообщениями, получая из Call-центра, GPS-датчиков и с электронной карты Лондона и его окрестностей всю информацию, необходимую для принятия решений и автономного распределения ресурсов.

Система функционирует 24 часа в сутки, позволив сократить ряд диспетчеров.

Несколько наиболее опытных диспетчеров в основном только наблюдают за работой системы и вмешиваются в процессы принятия решений лишь в нестандартных ситуациях.

### База знаний

В качестве узлов онтологии выступают классы объектов, используемых для принятия решений по распределению ресурсов в компании: клиент, заказ, маршрут, автомобиль и водитель.

Заказ имеет следующие атрибуты:

- расположение исходных и конечных точек маршрута;
- тип заказа: срочный или забронированный заранее на конкретную дату и время;

- вид сервиса (обычный или представительский автомобиль, микроавтобус, и т.д.);
- важность заказа (число от 0 до 100 в зависимости от клиента);
- дополнительные требования (возможность транспортировки животных, наличие детского кресла и т.д.).

Ниже представлены атрибуты водителя и автомобиля:

- тип автомобиля;
- наличие специального оборудования (детских кресел и т.д.);
- опыт водителя (начинающий или опытный);
- домашний адрес водителя;
- местонахождение автомобиля на данный момент (координаты по данным с GPS-навигатора);
  - статус водителя («недоступен», «на перерыве», «на заказе», «свободен», «будет свободен через 5/10 минут», «на пути домой»);
  - знание водителем иностранных языков.

Фактические данные об имеющихся ресурсах и заказах (экземплярах объектов) сохраняются в реляционной базе данных.

Сцены отражают модель ситуации в компании в текущий момент времени: местонахождение автомобилей, их статус и т.д.

## Виртуальный мир

Распределение такси по клиентам осуществляется путем переговоров между Агентами заказов, прикрепленными к клиентам, и Агентами водителей, представляющими таксистов.

Агенты заказов являются наиболее активными: они составляют списки доступных автомобилей и запускают процесс переговоров с Агентами водителей. В первой версии системы Агенты водителей были реактивными: они только отвечали на запросы от Агентов заказов и применяли выбранный вариант. Как правило, Агенты заказов и Агенты водителей конкурируют между собой или сотрудничают друг с другом в зависимости от того, какой вариант является наиболее выгодным для компании. В случае, который описывается в данной главе, помимо указанных выше мы использовали дополнительные типы агентов, а именно Агентов внешних событий, Агентов маршрутов, Агентов региональной загрузки и Агентов распределения заказов.

Для принятия решений агенты руководствуются гибкими, ситуативно рассчитываемыми критериями, а не жесткими приоритетами, что эффективно только при работе с разными категориями заказчиков. Например, если поступает звонок от VIP-клиента и в системе имеется единственное такси, отвечающее всем требованиям вызова, но оно уже назначено на другой заказ, система перенаправит данный экипаж на обслуживание VIP клиента и, при необходимости, запустит процесс поиска другого водителя для потерпевшего заказа.

Планировщик, в первую очередь, прилагает все усилия для максимизации прибыли компании. Далее в порядке рекомендации следуют остальные показатели работы компании, такие как сроки доставки, качество предоставляемых услуг, социальная справедливость и т.д. В частности, выбирая таксистов из двух примерно равных вариантов, система назначит на вызов того водителя, который давно не получал заказы, чтобы все водители выполняли примерно равное количество заказов.

В ситуации, когда один диспетчер принимает новый заказ и назначает на него автомобиль, которому придется ехать с севера на юг, чтобы забрать клиента, а второй диспетчер, независимо от первого, назначает на другой вызов автомобиль, которому необходимо ехать с юга на север, агенты могут выявить данную аномалию в планировании и предложить диспетчерам изменить их решения.

Система распределения такси работает короткими циклами. Между циклами система собирает события и ставит их в очередь. В каждом цикле, одно за другим, обрабатываются



события, стоящие в очереди, затем системный диспетчер передает управление соответствующим агентам. Каждое событие запускает цепь переговоров между Агентами. После обработки всех событий и определения лучшего возможного варианта планирования система переходит в состояние ожидания нового события. Варианты оцениваются с помощью циклических перестановок.

Чтобы уменьшить размерность пространства поиска возможных решений, используется механизм предварительного матчнга (поиска соответствий), который определяет совместимость заказов и водителей, исключая неподходящие варианты.

Для сравнения и оценивания пар заказ-водитель, созданных на предыдущем этапе, используется микроэкономика. Каждому варианту присваивается оценка. Варианты с высокой оценкой сохраняются, чтобы позже не надо было получать ее повторно. Оценка вычисляется на основе многокритериальной модели как сумма произведений значений критериев и их весов, которые могут корректироваться.

Для оценки вариантов применяются следующие критерии: расстояние от текущего местонахождения автомобиля до пункта заказа, предполагаемое время в пути до пункта заказа, предпочтения при выборе водителя (приоритет отдается водителям, которые давно не назначались на заказы), опыт водителя, расстояние от водителя до центра региона (для использования водителей из отдаленных районов), качество предоставляемого сервиса, важность заказа, место, занимаемое водителем в очереди (если он ожидает в аэропорту), домашний адрес водителя (если он ищет заказ по пути домой) и некоторые другие.

Процесс планирования включает следующие этапы:

1. Новый заказ встает в очередь событий.
2. Проверяется возможность планирования заказа.
3. Заказу назначается агент.
4. Все водители, которые могут выполнить данный заказ, включаются в предварительный матчнг (чтобы убрать неподходящие варианты).
5. Выполняется оценка всех пар водитель-заказ в соответствии с критериями, основанными на микроэкономике.
6. Агент заказа запрашивает стоимость выполнения заказа у агентов выбранных водителей. Эта стоимость включает затраты на передачу заказа от ранее назначенного водителя.
7. Водитель получает информацию о стоимости переназначения, отправив запрос текущему заказу.
8. Если новое назначение оказывается лучше предыдущего, оно принимается.
9. Процесс, описанный на этапе 6, выполняется для всех кандидатов на заказ, для которых первоначальная оценка (без переназначений) была лучше текущей.
10. Если во время цикла не происходит никаких изменений, обработка события считается завершенной.

Чтобы найти решение, настолько близкое к оптимальному, насколько это возможно, система использует задержку между назначением такси клиенту и моментом, когда водителю отправляются инструкции по заказу (принятие к исполнению). В этот интервал времени автомобиль считается доступным для новых назначений, но любое новое назначение утверждается, только если новое предложение приводит к улучшению показателей эффективности. В случае необходимости, Агенты водителей пытаются «прийти к договоренности» друг с другом о предлагаемом переназначении заказа, предлагая компенсацию водителю, который теряет хорошего клиента, чтобы повысить общую стоимость сделки. Такое перепланирование уже распределенных ресурсов порождает «волну» переговоров с целью разрешения конфликтов между новыми и старыми заказами. Длина цепочки перепланирования ограничена только временем, необходимым для того, чтобы добраться до клиента и в таких оживленных городах, как Лондон, обычно достаточно до 4 изменений плана. Таким образом, система создает расписание и постоянно пересматривает

его, пока возможно улучшение показателей эффективности и еще есть время для перепланирования.

Для каждого заказа время принятия заказа к исполнению подсчитывается динамически с учетом важности заказа, вида предоставляемого сервиса и ряда других параметров. Когда интервал времени принятия к исполнению истекает, информация о заказе отправляется водителю, и заказ ставится на контроль исполнения. Введение динамического времени принятия заказов к исполнению повысило эффективность работы автопарка за счет более выгодного назначения заданий водителем.

Когда появляется новый заказ, система автоматически находит самый подходящий автомобиль и выполняет предварительное бронирование, если он был свободен, или начинает раунд переговоров с уже распределенными заказами, которые еще не отправлены на контроль исполнения. В случае срочного заказа в среднем требуется 9 минут, чтобы автомобиль приехал забрать клиента. Заказы, сделанные заранее, распределяются мгновенно, но система продолжает перераспределять их по мере появления более подходящих автомобилей и не принимает их к исполнению до момента, когда водитель должен будет отправиться выполнять заказ. В интервал времени между появлением срочного заказа и принятием его к исполнению система обычно несколько раз (обычно до 4 раз) улучшает исходное назначение водителей клиентам.

Если водителям разрешается руководствоваться только своими предпочтениями, в некоторых районах может появиться избыток водителей, в то время как в других их будет недостаточно. Чтобы предотвратить такие ситуации, была предусмотрена возможность распределять автомобили в соответствии с прогнозом потока заказов в районах города. На основе информации о текущем потоке заказов и распределении их в прошлом, прогнозируется ожидаемый поток заказов, что позволяет системе генерировать краткосрочные (30-минутные) оценки, которые обычно оказываются достоверными. Основываясь на прогнозах, система рассылает незанятым водителям сообщения с рекомендациями оставаться на месте или двигаться в район, где ожидается увеличение потока заказов. Эта функциональность позволяет улучшить распределение автомобилей за счет уменьшения времени отклика и порожнего пробега, а также увеличения количества посадок клиентов.

Если существует вероятность появления VIP-заказа далеко от места, в котором водителю было рекомендовано находиться, система может посоветовать водителю подъехать ближе к вероятному месту заказа, предлагая ему взамен гарантированный следующий заказ. Эта функциональность является очень важной, т.к. продуктивность работы в загруженных районах определяет фактическую эффективность автопарка - в не загруженных районах обычно достаточно автомобилей для выполнения поступивших заказов). Такая функциональность поддерживается с помощью подсистемы распознавания образов, которая может прогнозировать место следующего заказа, используя динамический интеллектуальный анализ данных.

В обычном режиме планирования программа может перехватить водителей, направленных в загруженные районы, для назначения на новые заказы. Например, автомобиль направляется к центру города, где имеется много невыполненных заказов. Он еще не въехал в зону видимости этих заказов (максимальное расстояние, на котором разрешено назначение на заказ), поэтому может быть назначен другому клиенту, находящемуся в зоне его видимости, даже если этот заказ не такой срочный, как заказы в центре города. В результате некоторые водители могут никогда не доехать до проблемного района. Чтобы не допустить этого, система может временно изменять критерии назначения на заказ, предоставляя водителям возможность добраться до района с критической ситуацией, не будучи перехваченными другими заказами. В операционной платформе поднимается соответствующий флажок, который обозначает временное ограничение приема срочных заказов в проблемных районах даже от клиентов с низким приоритетом. При необходимости система может временно расширить зону, в которой водителям разрешается искать заказы. Как только нагрузка уменьшается, введенные ограничения отменяются.

Система старается также распознать попытки мошенничества со стороны водителей.

В связи с тем, что все взаимодействие системы с водителями автоматизировано, время от времени таксисты пытаются получить преимущество, сознательно предоставляя ложную информацию.

Были зафиксированы следующие случаи:

- Водители пытались сократить время ожидания, сообщая, что они стоят в очереди в аэропорту, когда в действительности они находятся очень далеко от аэропорта.
- Водители пытались получить заказ раньше, активируя статус «свободен через 10 минут», хотя они только начинали выполнять заказ.
- Водители пытались получить заказы в определенном направлении несколько раз за день, многократно нажимая на кнопку «на пути домой».

Чтобы уменьшить мошенничество, агенты водителей отслеживают расписание водителей и, при необходимости, игнорируют их запросы.

В процессе реализации системы были внесены изменения с целью улучшения процесса планирования, например, механизм назначения на заказы, которые заранее забронированы водителями, чтобы выполнить их по дороге из дома на следующий день.

Чтобы минимизировать последствия сбоев, когда происходит разрушительное событие (например, появление нового заказа или изменение статуса водителя), в процесс переговоров вовлекаются только агенты, которых затрагивает эта ситуация, и изменяются только те части расписания, на которые она влияет.

## Соединяя виртуальный и реальный миры

Система взаимодействует с потребителями и водителями. Клиенты звонят в колл-центр или посещают интернет-сайт, чтобы сделать заказ, изменить или отменить его, и информация заносится в систему. Водители взаимодействуют с системой, используя GPS-навигаторы, мобильные телефоны или планшеты, передавая информацию о своем местоположении, статусе и направлении передвижения, а также получая инструкции о посадке клиентов.

## Результаты

Этап эксплуатации и сопровождения системы начался в марте 2008 года, всего через 6 месяцев после старта проекта.

Результаты оказались чрезвычайно высокими: на 98.5% всех заказов водители были назначены автоматически, без помощи диспетчеров; количество потерянных заказов уменьшилось до 2%; порожний пробег был сокращен на 22.5%. Каждый автомобиль получил возможность еженедельно выполнять 2 дополнительных заказа за то же время при том же использовании топлива, что увеличило прибыль от каждого автомобиля на 5-7%.

Время, которое потребовалось для возврата инвестиций, составило 2 месяца с начала этапа эксплуатации и сопровождения системы. В течение первого месяца эксплуатации эффективность использования автопарка возросла на 5-7%. Это дало возможность выполнять дополнительное количество заказов при прежнем размере таксопарка, что в денежном выражении принесло компании увеличение дохода на 5 млн долларов в год. Дополнительная прибыль распределяется между компанией и водителями. В соответствии со статистикой, зарплаты водителей выросли на 9% с 2008 года, появилась возможность расширения парка автомобилей.

В список улучшений также входит сокращение количества задержек при подаче такси в 3 раза, что привело к значительному повышению качества услуг. Теперь среднее время от момента заказа такси до подачи автомобиля составляет 9 минут, что является лучшим показателем в Лондоне. Для заказов с высоким приоритетом, это время составляет не более 5-7 минут. Сокращение данного показателя особенно заметно в загруженных районах.

Возможность принять заказ по пути домой и усовершенствованный механизм назначения экипажей (по сравнению с предыдущей системой) позволили сократить ежедневный пробег всего автопарка на 3-4 мили, в результате чего выигрывает и каждый водитель, и экология города.

К улучшениям можно отнести и анализ передвижений автомобилей, который дает возможность определить их скорость, провести частичную оптимизацию работы компании, принимая во внимание принципы курьерской доставки (основное преимущество курьерской работы – возможность выполнять несколько заказов одним курьером), а также внести ряд других корректив, целью которых является повышение эффективности бизнеса.

Компания такси выиграла престижный конкурс «The Orange Best Use of Technology in Business Award» как «зеленое такси» за сокращение выхлопов вредных газов путем минимизации порожних пробегов.

## Список литературы

1. Glaschenko A., Ivaschenko A., Rzevski G., Skobelev P. Multi-Agent Real Time Scheduling System for Taxi Companies // Proceedings of AAMAS 2009 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems 10–15 May, 2009, Budapest, Hungary – pp. 29 – 36.

# ГЛАВА 7: Адаптивное планирование сдачи автомобилей в аренду

## Проблема

Нашим клиентом стала одна из крупнейших в мире компаний, занимающаяся сдачей в аренду автомобилей, и наша задача состояла в разработке планировщика, работающего в режиме реального времени, который предстояло запустить в эксплуатацию на территории Великобритании.

Территория, с которой нам предстояло работать, была разделена на несколько районов с офисами компании для сдачи в аренду автомобилей. В эти офисы поступали заказы, а рядом, как правило, находились места парковки и гаражи, в которых обслуживались автомобили. Каждый водитель фирмы начинал в них свой рабочий день. Во всех офисах работали опытные диспетчеры, которые вручную занимались распределением водителей и автомобилей по заказам. Диспетчеры работали как с клиентами, так и с водителями, изменяя расписания по мере необходимости. От диспетчеров не требовалось понимания общей картины положения дел в компании и оптимизации бизнес-процессов, поскольку это было вне их компетенции, что приводило к противоречивым решениям и отсутствию кооперации между офисами.

Стоящая перед нами задача требовала принятия ряда взаимосвязанных решений, в том числе, следующих:

- Из гаража какого офиса лучше выбрать автомобиль, учитывая предпочтения клиента, доступность автомобилей, расстояния, затраты на перемещение?
- Какому водителю поручить помыть и доставить автомобиль?
- Какому водителю поручить доставку другого водителя к месту расположения автомобиля или обратно в офис?
- Как минимизировать сверхурочную работу водителей?
- Куда и как вернуть водителя: обратно в офис, из которого его забрали, в другой офис или домой?

При изучении проблемы быстро выяснилось, что для выполнения многих задач необходимо использовать дополнительный автомобиль с водителем, и тогда сложность возрастает до такого уровня, что с ней нельзя справиться вручную или с помощью традиционного программного обеспечения для планирования.

Среди часто возникающих непредвиденных событий были выделены следующие:

- неожиданное появление новых заказов;
- изменение или отмена принятых заказов;
- выход автомобилей из строя;
- болезни, отгулы и опоздания водителей;
- водитель не может найти заказчика арендованной машины или ключи от машины, которую надо забрать;
- потеря водителем мобильного телефона.

Решения принимались на основании следующих основных критериев: стоимость каждого километра, пройденного автомобилем/водителем, штраф за опоздание при доставке возвращенного автомобиля, стоимость сверхурочной работы водителей и штрафы за увеличение или уменьшение стоимости заказа.

Работа по передаче в аренду автомобилей характеризуется многочисленными конфликтами между заказами, например:

- Очень важно осуществлять возврат автомобиля как можно раньше, а его доставку как можно позже. Но в случае большого количества заказов и в условиях, когда невозможно выполнить все задания вовремя, приоритет необходимо отдавать поставке машин для наиболее срочных заказов.
- Система должна эффективно планировать рабочее время водителей, при этом оптимизируя доставку автомобилей. Например, если возможно доставить автомобиль в компанию завтра, нет нужды за сверхурочные заставлять водителя делать это сегодня, если только не возникает дефицита машин уже сегодня или рано утром завтра.
- В случае пробок в городе лучше отложить возврат автомобиля обратно в офис и выполнить доставку из имеющегося резерва.
- Чтобы сократить лишнее перемещение автомобилей, забирать их лучше только тогда, когда на них поступает новый заказ, чтобы понимать, на какую станцию лучше доставить;
- Если в обычном режиме машины доставляются и моются в собственной мойке, то в режиме часа пик лучше мыть машины на чужих мойках, чтобы исключить задержки, пусть с потерей части прибыли.

Сочетание режимов непрерывного планирования доставок и их исполнения является ключевым требованием для компаний, занимающихся прокатом автомобилей. Необходимо, чтобы система не только генерировала и обновляла расписание, но и сразу же выдавала инструкции по его исполнению, а также отслеживала весь процесс выполнения до передачи машины клиенту.

В этих целях было решено использовать мобильные устройства водителей, куда начали рассылать инструкции по выполнению запланированных задач, чтобы иметь возможность получать с мест сигналы подтверждения начала и окончания каждой операции, ведь при этом задержка любой операции может привести к перепланированию многих остальных операций в плане.

Главное требование к системе состояло в том, чтобы планировать 100% заказов, соблюдая все требования клиентов и учитывая ограничения в работе водителей, обеспечивать доставку водителей в офисы в нужное время, никогда не оставлять водителей вне офисов без автомобилей и соблюдать запланированную последовательность действий в ходе подготовки и доставки автомобилей.

Число вариантов планов для каждого заказа в этом процессе очень велико для полного комбинаторного перебора, и, кроме того, постоянно случаются непредвиденные события.

Планировщик должен справляться с большим количеством заказов и ресурсов, а также неопределенностью, связанной с постоянной чередой событий, и, в то же время, создавать расписания, оптимизирующие значения заданных критериев по прибыли, равномерности загрузке водителей и другим показателям.

Насколько нам известно, такие системы прежде не были реализованы и не применялись на практике.

## Решение

Сложность бизнеса в сфере аренды автомобилей сильно отличается от сложности управления такси.

В отличие от такси, ключевой проблемой в данном бизнесе является многосвязность расписаний действий водителей в реализуемых ими заказах, когда один водитель становится узким местом для нескольких заказов, что еще более усложняется разнообразием требований клиентов (задано 16 градаций машин с вариантами замены), динамичным поступлением событий, пространственной распределенностью и индивидуальным характером всех процессов и т.д.

При этом в масштабе всей сети очень трудно вручную проверить, лучшее ли решение было найдено откуда взять автомобиль и какого типа, где разместить возвращенную клиентом машину, какого взять водителя с учетом переработок и сверхурочных?

Нашим решением было создание мультиагентного планировщика, поддерживающего многосвязные расписания заказов и ресурсов [1-2].

Примеры функций агентов в разработанной системе представлены ниже:

- Агенты присваиваются каждому заказу (как только таковые поступают в систему) и соревнуются за доступные машины и водителей путем переговоров о возможном бронировании и доставке машин к нужному месту.
- Агенты станций накапливают информацию о расписании своих машин и водителей с целью дать наиболее выгодное предложение клиенту.
- Агенты сдачи машины в аренду ведут переговоры с Агентами автомобилей, чтобы заполучить желаемое транспортное средство.
- Агент Доставки ведет переговоры с Агентами водителей, чтобы выбрать исполнителя, который доставит автомобиль в необходимое место.
- Агент водителя ведет переговоры с другими Агентами водителей, чтобы найти себе помощника, который доставит водителя к месту, где автомобиль будет передан в аренду или подберет его после выполнения заказа и т.д.

По мере изменения ситуации, например, при появлении новых заказов или изменении уже принятых, задержке доставок автомобилей или отгулов или болезни водителей, агенты перестраивают расписание, чтобы в реальном времени адаптировать его к новым событиям.

Целью проведения таких переговоров является обычно увеличение прибыли предприятия или минимизация ущерба от непредвиденных событий.

## База знаний

Знания предметной области по аренде автомобилей хранятся в онтологии в виде семантической сети, узлами которой являются классы объектов (концепты), а связи между узлами выражают классы возможных отношений между ними (Рис. 7.1).

Онтология разделена на 3 части (суб-онтологии):

- 1-я часть включает классы объектов аренды автомобилей: типы заказов, виды автомобилей, водитель и клиент и др.
- 2-я часть состоит из классов объектов расписания: задача, опция и операция, в этой части определяются логические связки задач и операций.
- 3-я часть содержит классы объектов, определяющие экономику мира агентов: критерии принятия решения, бонус и штраф (например, за поздний возврат машины, доставку с опережением, сверхурочную работу и т.д.).

Пользователи могут напрямую влиять на процесс принятия решений агентами, расширяя классы объектов и указывая значения сущностей.



Рисунок 7.1. Фрагмент онтологии аренды автомобилей

Онтология системы спроектирована таким образом, что владелец компании может легко вносить коррективы, подстраиваясь под изменения в сфере своего бизнеса (Рисунок 7.2).

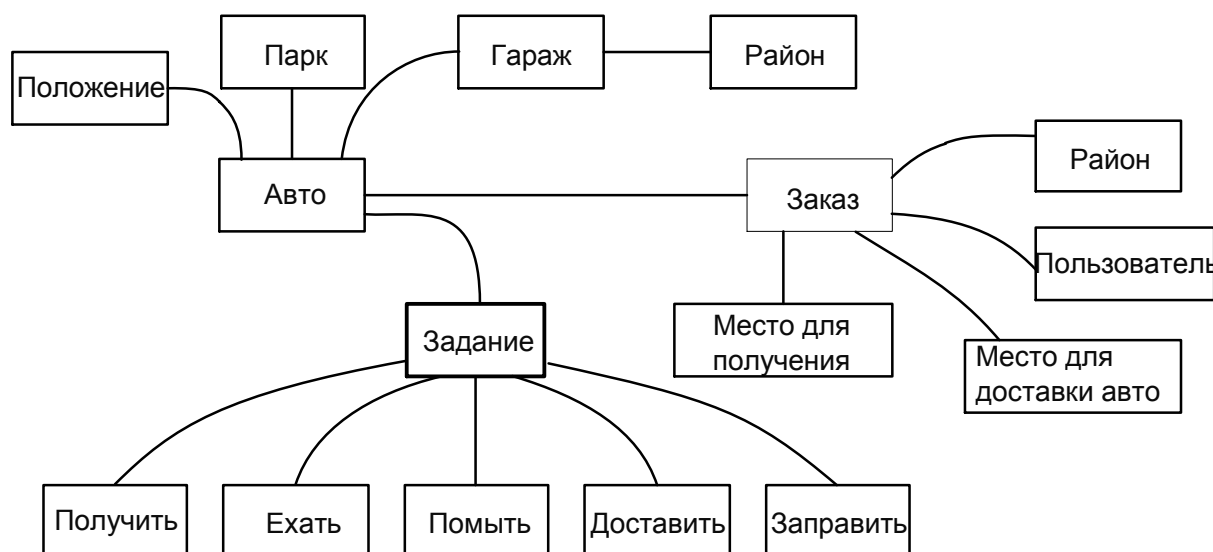


Рисунок 7.2. Пример сцены аренды автомобилей

Сцена мира здесь показывает, на какой заказ забронирован автомобиль, какой водитель доставит то или иное транспортное средство и т.д.

Сцены отображают взаимозависимости между экземплярами в данной проблемной ситуации, позволяя агентам отслеживать все важные связи между объектами, операциями и участниками событий.

## Виртуальный мир

Проблема назначения исполнителя на заказ решается путем проведения переговоров агентов потребностей и возможностей.



Ключевыми являются следующие виды агентов: Клиента, Заказа, Офиса, Аренды, Автомобиля, Водителя, Доставки авто, Возврата авто и Агент Мойки автомобиля.

Процесс планирования начинается с разделения сложной задачи «доставить автомобиль» на несколько подзадач. Каждая подзадача запускает свой механизм переговоров между агентами. Например, Агент Офиса ищет у себя автомобиль и если находит грязный автомобиль, создает подчиненного себе Агента Мойки, занимающегося поиском наиболее подходящей кандидатуры водителя, который смог бы помыть автомобиль в нужное время.

В более сложных случаях количество подзадач может быть довольно большим, и между заданиями могут установиться взаимозависимости. Например, Агент Аренды осуществляет поиск наиболее подходящего транспортного средства, Агент Автомобиля, в свою очередь, ищет наиболее подходящего водителя, а Агент Водителя выбирает еще другого водителя (курьера), чтобы довезти первого водителя домой после доставки автомобиля.

Поиски вариантов осуществляются посредством обмена сообщениями между агентами, а не через обычные поисковые комбинаторные алгоритмы.

Во время переговоров между агентами, нацеленных на поиск наиболее оптимального варианта использования ресурсов, часто возникают конфликты, требующие разрешения. Например, если единственный подходящий и доступный Агенту Аренды автомобиль уже забронирован другим клиентом, конфликт может быть решен путем корректировки параметров распределения и перебронированием с заменой автомобиля, чтобы удовлетворить обоих клиентов, либо путем частичного перепланирования, в зависимости от того, какой из вариантов дает наилучшее итоговое решение.

Связи между потребностями и ресурсами, которые устанавливаются во время переговоров агентов, не являются постоянными. Наоборот, пока еще есть время перед принятием выбранного решения, агенты осуществляют поиск вариантов, более близких к оптимальному, и могут разорвать старые связи и создать новые. Каждый агент старается оптимизировать процесс распределения ресурсов и может инициировать поиск лучшего решения, при этом работает проактивность агента.

Например, если по каким-либо причинам выбранный водитель оказывается недоступен (из-за человеческого фактора, аварии или тому подобного), его агент будет активирован для поиска всех заказов, на которые может повлиять данное происшествие, и проинформирует их о недоступности прежде назначенного ресурса. Тогда активируются агенты этих заказов для поиска подходящих ресурсов и начала переговоров, которые могут вызвать частичное перепланирование.

Основные классы агентов и схемы переговоров агентов показаны на рисунке 7.3.

В данной архитектуре у каждой задачи и подзадачи есть свой агент, называемый Агентом Потребности. Его основная задача – привлечь наиболее подходящие ресурсы. Этот процесс может запустить волну переговоров, если какой-либо из Агентов Ресурсов отклонит предложение Агента Потребности. Агенты различных видов задач и подзадач могут иметь разную логику принятия решений. Возможны случаи, когда Агентам Потребностей необходимо информировать остальных агентов о результатах своей деятельности для координации решений.

Основная роль Агентов Ресурсов заключается в поиске ответов на предложения от Агентов Потребностей, которые основываются на подсчетах затрат по выполнению задач (заказов на

аренду). Каждый Агент Ресурса может произвести подсчет как предварительной стоимости, так и полной стоимости при назначении ресурсов на выполнение заказа (предельные издержки или *marginal cost*). Агент этого вида может разбить начальное задание на несколько действий. Самой важной функцией Агента Ресурсов является создание обязательств выполнить задачу, порученную ресурсу за определенную сумму в заданный срок.

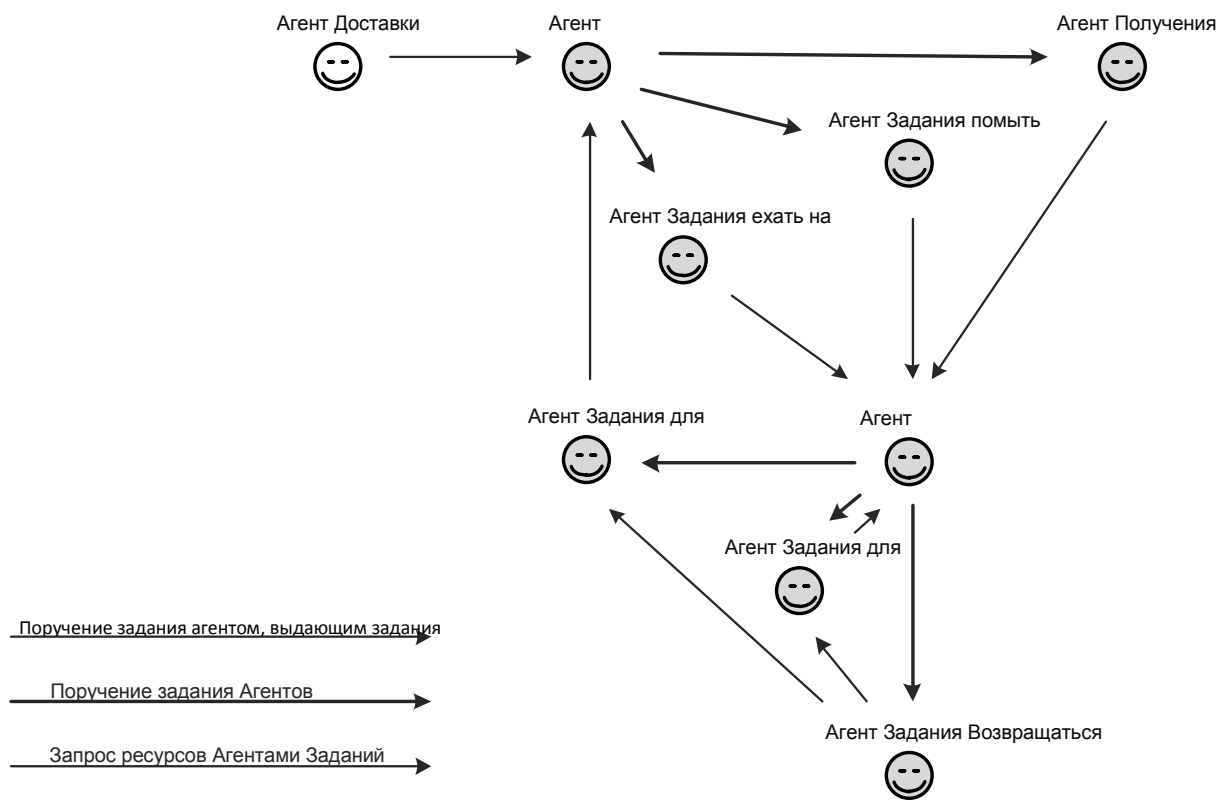


Рисунок 7.3. Пример схемы переговоров между агентами

Мультиагентный планировщик для проката автомобилей работает с 7 видами Агентов Потребностей, каждый из которых соответствует одному типу задачи: Доставка, Мойка, Вождение, Сбор (Встреча), Перемещение, Автомобиль и Отправление домой.

Имеются также 2 основных типа Агентов Ресурсов: Автомобиль и Водитель.

Большинство назначений ресурсов инициируется Агентами Потребностей (планирование и перепланирование нового заказа, изменение условий возврата автомобиля и т.д.). Но в некоторых случаях Агенты Ресурсов становятся активными. Они могут посылать сообщения Агентам Потребностей с целью найти задачу, для которой имеющийся ресурс был бы наилучшим вариантом, и в случае удачного завершения данного запроса они инициируют перепланирование.

В случаях, когда непредвиденное событие приводит к невозможности выполнения ранее назначенного задания или к недоступности ресурсов, соответствующие агенты начинают процесс перепланирования.

Управляемый событиями поэтапный процесс назначения ресурсов на выполнение задания не гарантирует построения оптимального расписания для всех ресурсов в любой момент времени.

Поэтому, если существует запас по времени, используются различные способы проактивного улучшения расписания.

Данный процесс включает анализ «узких мест» и применение различных эвристик. Кроме того, мы добавили Агента Предприятия, который время от времени просматривает расписание и докладывает о неэффективном использовании ресурсов, если обнаруживает таковое. Используя данную информацию, задействованные агенты ищут другие варианты для сделок. Для непрерывного улучшения использования ресурсов вводятся циклы проактивности Агентов Ресурсов.

Иногда агенты могут отказаться от созданного расписания и начать планирование с самого начала, для данной операции используется введенный ранее термин «созидательное разрушение».

Любое предложенное изменение в расписании принимается, только если оно приведет к улучшению ключевых показателей эффективности всей системы. Рассмотрим следующий пример: предположим, что водитель выполнил доставку автомобиля и остался на месте. При этом ему поручено новое задание, но другой водитель, который должен был забрать данного водителя, сильно опаздывает. Тогда первому водителю будет предложено своим ходом забирать другую машину неподалеку. В этом случае система внесет изменения в расписание, назначая опаздывающему водителю задачу забрать другую машину, чтобы исключить простой ресурсов.

Разработанная мультиагентная система-планировщик работает без остановок, постоянно находясь в готовности реагировать на изменения обстановки и стараться сделать расписание более эффективным.

## Соединение виртуального и реального миров

Данная система активно взаимодействует с заказчиками и водителями.

Потребители звонят в колл-центр или посещают сайт компании, чтобы сделать, изменить или отменить заказ на автомобиль, и соответствующая информация сразу поступает в систему.

Водители взаимодействуют с системой, используя GPS-навигаторы, мобильные телефоны или другие специализированные мобильные устройства.

Водители передают данные о своем местоположении, начале и завершении выполнения задания, а также подтверждают получение указаний для следующего задания.

В случае непредвиденных событий водители также могут вносить их со своего мобильного устройства.

## Архитектура системы

В основе предложенного решения лежит сеть мультиагентных планировщиков, каждый из которых относится к определенному району.

При этом в одном районе может находиться несколько офисов, и районные планировщики распределяют ресурсы, в первую очередь, по офисам на своей территории, после чего предпринимаются попытки оптимизировать междуофисное распределение машин по заказам.

Каждая система-планировщик назначает автомобили на заказы, дает указания водителям для доставки/возврата/мытья автомобилей, возврата других водителей или транспортировки водителей до места получения автомобиля.

Планировщики работают в режиме реального времени, своевременно внося изменения в расписание при появлении любых непредвиденных событий.

Важно отметить, что все районные системы-планировщики работают независимо и сами согласованно вступают во взаимодействие и координируют решения, проводят перераспределения автомобилей на границах районов и обмениваются человеческими ресурсами водителей при необходимости.

Оперативное хранилище данных содержит информацию об автомобилях, заказах, бронировании, моделях машин и офисах, связывая между собой автопарки, систему управления заказами и мультиагентные планировщики.

База данных мультиагентной системы-планировщика является реляционной и хранит рабочую информацию (заказы, графики использования автомобилей и работы водителей и т.д.) и справочные данные (автомобили, марки, модели, офисы, время поездок, текущие ставки и т.д.). Она интегрирована с внутренней шиной данных для обеспечения возможности чтения и записи данных других модулей и компонентов.

Автономный архив (работающий в режиме офлайн) представляет собой обычное хранилище файлов в папке на логическом диске, откуда они могут быть легко получены вручную любым диспетчером файлов. Рабочие данные из хранилища планировщика старше заданного промежутка времени (например, больше 2-х недель), регулярно автоматически архивируются, чтобы ограничить размер базы данных и обеспечить стабильную скорость работы операций чтения и записи.

Шина данных – это внутренний компонент, который обеспечивает возможность чтения и записи информации, помещенной в долговременное хранилище (база данных планировщика). Шина данных интегрирована со всеми компонентами: архиватором, поддержкой рабочего процесса, измерителем времени пути, предварительной обработкой данных и механизмом планирования.

Система интегрирована с мобильным приложением, которое дает возможность с помощью беспроводного соединения выходить на связь с водителями, когда они находятся в офисах или за их пределами. Система интегрирована также с компонентами поддержки рабочего процесса для выдачи указаний водителям и получения подтверждений выполнения заказов, обновлений расчетного времени прибытия, информации по невыполненным заданиям и т.д.

Компонент поддержки рабочего процесса используется механизмом планирования для выдачи указаний водителям. Данный компонент отправляет подтверждения и информацию о состоянии ресурсов обратно в подсистему адаптивного планирования.

Подсистема прокладки маршрутов предоставляет расчет времени для покрытия расстояния между двумя адресами для компонента измерения времени пути и при необходимости данная предоставляет наглядную картину маршрутов.

Компонент измерения времени пути предоставляет механизму планирования подсчет времени любой поездки и сохраняет информацию из подсистемы прокладки маршрутов для гарантии эффективности работы системы.

Компонент предварительной обработки данных экспортирует информацию из оперативного хранилища данных в базу данных планировщика для проверки целостности данных и их соответствие различным правилам и предлагает пользователю подтвердить важную информацию в случае изменений (например, недостающий или неверный почтовый индекс).

Системный администратор может изменить настройки механизма планирования и в определенных пределах скорректировать его логику.

## Пользовательский интерфейс

Система предоставляет полноценный «десктопный» интерфейс для ежедневной работы сотрудников офиса, предлагая доступ к заданиям, информации по работе с автомобилями, водителями и их графиками.

Кроме того, поддерживаются рабочие места менеджеров автопарка и системному администратору для обслуживания системы.

Приложение для клиента устанавливается и обновляется автоматически на ПК пользователя через сервис Java Web Start.

Экран с заданиями для работников офиса открывается автоматически по умолчанию, когда работник входит в систему.

Экран с водителями показывает список всех водителей и их график работы по дням текущей недели и общее количество часов работы.

Чтобы увидеть запланированные в данный момент задания для какого-либо водителя, пользователю надо выбрать водителя из списка.

Задания отображаются в хронологическом порядке.

Настройки позволяют системному администратору настраивать критерии, которые определяют логику планирования.

## Результаты

Первая версия программы была введена в работу на небольшой сети офисов компании по прокату автомобилей.

В автопарке фирмы находилось 250 автомобилей, с которыми работали 30 водителей. Компания принимала в среднем от 15 до 20 заказов на автомобили в день на каждый офис, и средняя частота непредвиденных событий составляла от 80 до 120 в час. Эти события включали: появление новых заказов и различные изменения с мобильных устройств водителей и пользователей.

Планировщику требовалось обычно от 15 миллисекунд до 130 секунд для обработки событий, каждое из которых могло приводить к перепланированию цепочки до 150-200 заданий. Показатель отмены (количество заданий, отмененных другим более важным заданием) составляло от 5 до 15 в зависимости от времени, доступного для проведения переговоров между агентами.

Число одновременно активных агентов было следующим: агенты заданий – 2 500, агенты автомобилей – 250, агенты водителей – 30.

Количество вариантов на каждое решение варьировалось от 5 до 50 в зависимости от времени дня, но было ограничено глубиной в 10 переговоров между агентами.

Важность планирования в реальном времени и отсроченного принятия решения подтверждается статистикой: для 40% непредвиденных событий требовалось внесение значительных изменений в расписание; 90% всех решений было принято за 20-30 минут до приведения в действие, в то время как всего лишь 1% – за 1 час до исполнения.

Проактивность агентов ресурсов помогала довольно быстро (в течение 2-3 минут) улучшать качество расписания, которое серьезно страдало от высокой турбулентности потока непредвиденных событий.

## Список литературы

1. Andeev S., Rzevski G., Shveikin P., Skobelev P., Yankov I. A Multi-Agent Scheduler for Rent-a-Car Companies Applications - Proceedings of International Conference of Multi-Agent and Holonic Systems (HoloMAS 2009) – Linz, Austria, September 2009. p. 305-314.
2. Yankov I., Skobelev P., Shibanov S., Shashkov B. Multi-agent approach for planning and resource allocation in dynamic heterogeneous networks // Dynamics of heterogeneous systems: conference proceedings / Penza, State University, 2009. Issue 1. pp. 22-37.

# ГЛАВА 8: Адаптивное планирование грузоперевозок

## Проблема

Планирование в отрасли грузоперевозок представляет собой крайне сложную проблему, решение которой требует учета разнообразных факторов предметной области [1]:

- специфику заказов клиентов, связанную с разными типами грузов (требуется холодильник и др.);
- различие грузовиков и их оснащение (емкость, подъемник, наличие прицепа, раскраска борта и т.п.);
- особенности транспортной сети (места погрузок и разгрузок, наличие переправ, время работы складов и магазинов и др.);
- возможность использования складов промежуточного хранения;
- требуется рассматривать большое количество маршрутов, которыми могут быть доставлены заказы;
- необходимо принимать в расчет предпочтения владельцев и менеджеров компаний, диспетчеров, логистов, операторов и водителей;
- необходимость динамического перепланирования маршрутов движения при появлении новых заказов, возникновении пробок, ДТП, ремонтов дорог;
- следовать бизнес-правилам компании, задающим предпочтения и ограничения, а также максимизировать различные критерии, влияющие на эффективность;
- требование консолидации грузов для обеспечения полноценной загрузки грузовиков;
- требование назначать грузы различного размера и веса на подходящие типы грузовых автомобилей с различными видами прицепов;
- построение смен водителей с учетом режима труда и отдыха и действующего законодательства;
- построение индивидуальных расписаний движения для каждого грузовика с учетом наличия виз при пересечении границы;
- обеспечивать возможности обратной перевозки тары из-под продуктов;
- возможности перецеплять тягачи и прицепы для непрерывного движения;
- своевременное проведение техобслуживания машин для выхода в рейсы;
- отрабатывать непредвиденные события, таких как появление новых или отмена принятых заказов, аварии, плохая погода, дорожные работы, неявка водителей или бригады грузчиков и т.д.;
- учет расписания транспорта вторичной логистики, включая курсирование переправ, железнодорожных перевозок и т.д.

Эти факторы существенно затрудняют постановку и решение рассматриваемой задачи, точнее, целого комплекса взаимосвязанных задач, повышая вычислительную сложность за счет следующих особенностей [2]:

- высокое разнообразие условий, объектов и процессов, взаимных зависимостей, предпочтений и ограничений, факторов;
- большая размерность решаемой задачи, выраженная числом заказов, транспортных средств, водителей и т.д.;
- наличие взаимосвязанных задач и взаимообусловленных задач, которые должны решаться совместным образом;
- огромное число вариантов решений каждой задачи, исключающее возможность комбинаторного перебора;

- наличие большого числа конфликтующих критериев, включая качество перевозки, стоимость, сроки и риски, загрузку машин и т.д.;
- наличие ограничений и предпочтений, задаваемых в разных формах: таблично, процедурно, алгоритмически;
- необходимость учитывать индивидуальные особенности каждого заказа, клиента, груза, грузовика, водителя и др.

При этом экспоненциальный рост времени решения задачи построения оптимальных расписаний, необходимость построения зависимых расписаний с множеством ограничений (магазины и склады, водители, переправы и т.д.) и растущая неопределенность, обусловленная изменениями динамики колебаний спроса и предложения, делают эту задачу практически неразрешимой для традиционных моделей, методов и алгоритмов, часто требующих в пакетном режиме 8-12 часов для построения начального расписания для реальной транспортной сети грузовых перевозок, которое лишь на 40% реализуемо [3].

При этом бизнес-процесс в рассматриваемых компаниях включает три основных стадии выполнения задач «Планирование – фиксация и подтверждение плана – исполнение» (Plan-Commit-Execute):

1. Планирование – на этой стадии грузовикам назначаются заказы и строятся маршруты перевозок. Горизонт планирования может быть от нескольких дней – до нескольких недель (например, в понедельник строится план на среду). На этом этапе заказы могут легко добавляться или удаляться, а маршруты грузовиков могут гибко меняться согласно происходящим событиям. На этой стадии часто в начальный момент добавляются виртуальные заказы и строится прогнозный «мастер-план», который базируется, в основном, на долгосрочных заказах и опыте предшествующих перевозок, в котором условные заказы постепенно замещаются приходящими реальными заказами.

2. Фиксация и подтверждение плана - в определенный момент времени планирование завершается и грузовики фиксируются на выполнение заказов с выпиской накладных на товары и других сопутствующих документов. Это событие запускает дальнейшие процессы взаимодействия с заказчиками, складами и магазинами, составителями смен и графиков работы водителей, сервисными центрами и т.д. В результате этих действий транспорт будет полностью подготовлен к поездке. На этом этапе могут приходить новые заказы, но при этом обычно обрабатываются лишь непредвиденные события, связанные с поломками грузовиков и т.д.

3. Исполнение заказов - водитель уточняет все детали перед началом поездки и отправляется в рейс, который может длиться 8-12 часов, с учетом переработки. Чтобы внести коррективы в планы на этом этапе во время самой транспортировки, требуется высокий профессионализм и опыт диспетчера, что, как правило, не реализуется, в то время как новый заказ иногда можно было бы подхватить прямо по маршруту движения и обеспечить дополнительную прибыль компании.

Сфера грузовых перевозок во многом является весьма консервативной и до сих пор еще не так много компаний на рынке, способных «на лету» в процессе выполнения заказов принимать новые заказы и менять маршруты движения, что также связано с особенностями и стандартами существующих бизнес-процессов, но переход к реальному времени уже сегодня является насущной необходимостью и определяет ближайшее будущее грузового транспорта [2].

Считается, что конкурентные преимущества будут у того, кто сможет первым своевременно учитывать все изменяющиеся условия и принимать решения о распределении ресурсов на



основе детального анализа текущей ситуации, а не только следуя строгим правилам бизнес-процессам, выработанным в прошлом веке.

## Решение

Для решения задачи была предложена разработка мультиагентной системы управления грузоперевозками в реальном времени (далее – Планировщик) [4-8].

Предлагаемая система должна решать задачи распределения грузовиков под заказы, построения планов движения грузовиков, оптимизации планов (если есть время), а также контроля исполнения планов и перепланирования грузовиков в случае появления непредвиденных событий и расхождения между планом и фактом.

В этих целях Планировщик в режиме реального времени постоянно перестраивает расписание для размещения и консолидации новых заказов в условиях непрерывно поступающих непредвиденных событий и находит более выгодные варианты распределения ресурсов для увеличения прибыли компании.

Предлагаемый подход впервые позволяет вести расчет прибыльности каждого заказа и груза, каждой поездки, каждого грузового автомобиля и каждого водителя в экономике реального времени и создавать лучшие в существующих условиях расписания, а не искать некое подходящее на все случаи жизни «совершенное» расписание.

Первая версия Планировщика i-Scheduler была создана для поддержки LTL (Less-than-Truck-Loads) логистики и консолидации малых грузов для их распределения на заранее проложенные поездки (Bus Schedule) в реальном времени [1-8].

Вторая версия Планировщика Smart Trucks была создана для управления междугородними перевозками и поддержки FLT логистики (Full-Truck-Loads) [9-15].

Третья версия Планировщика Smart Logistics применяется для управления FTL и LTL грузоперевозками, а также поддерживает построение начального мастер-плана поездок на основе истории заказов [16-21].

## База знаний

Формализованные знания о предметной области располагаются в онтологии, поддерживаемой специализированным редактором.

Классы объектов, которые заложены в онтологии: Клиент, Заказ, Автопарк, Указание по транспортировке, Груз, Грузовик, Рейс, Тягач, Рейс и т.д.

Эти объекты связаны отношениями: «Рейс состоит из Указаний по Транспортировке», «Грузовик забронирован под заказ» и других.

Предполагается, что с объектами можно выполнять операции-действия, которые меняют состояние или отношение объектов: Получить груз, Перевезти груз, Разгрузить машину, Присоединить тягач и т.д.

Такая структура онтологии позволяет в любое время ввести новые виды объектов, отношений и операций в планирование.

Фрагмент онтологии грузовых перевозок представлен на Рисунке 8.1.

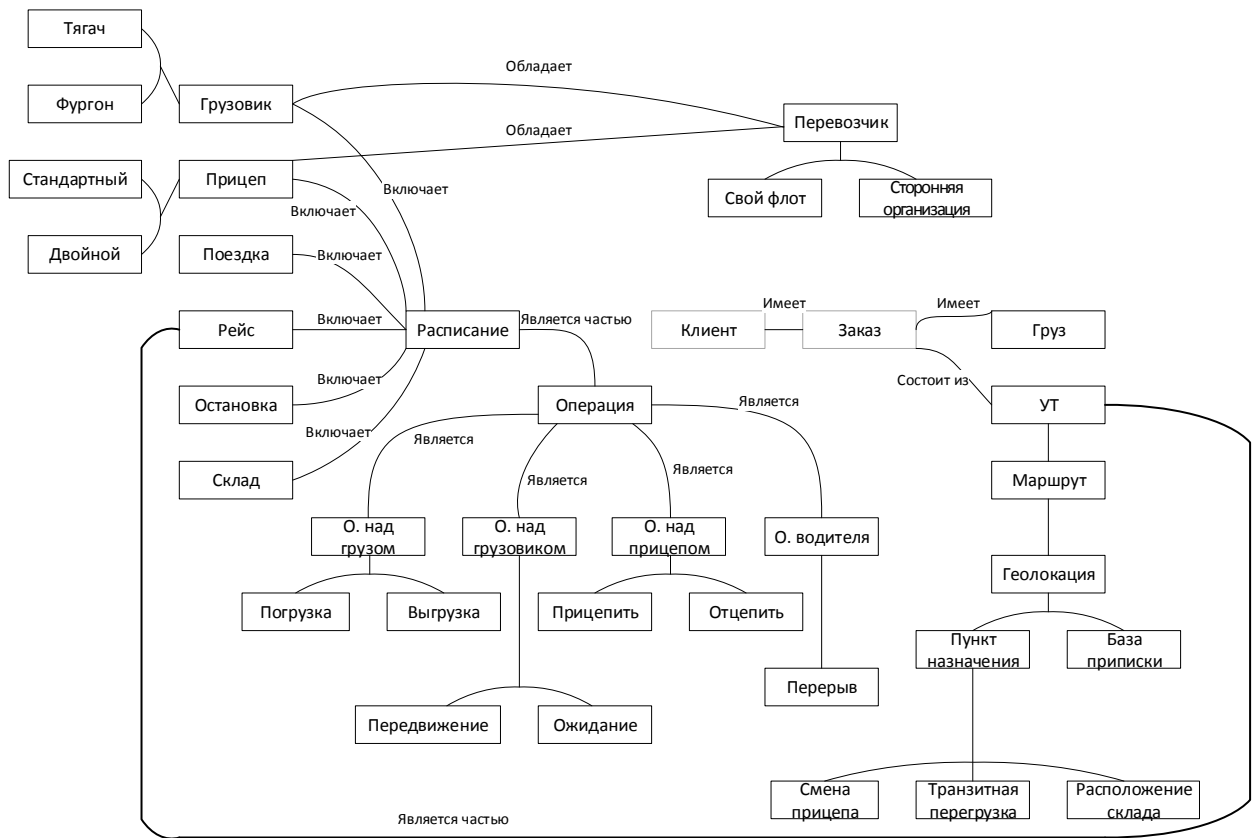


Рисунок 8.1. Стандартная онтология грузовых перевозок

На основе созданной онтологии становится возможной спецификация моделей ситуаций (сцен) в реальном мире для последующей работы агентов (Рисунок 8.2).

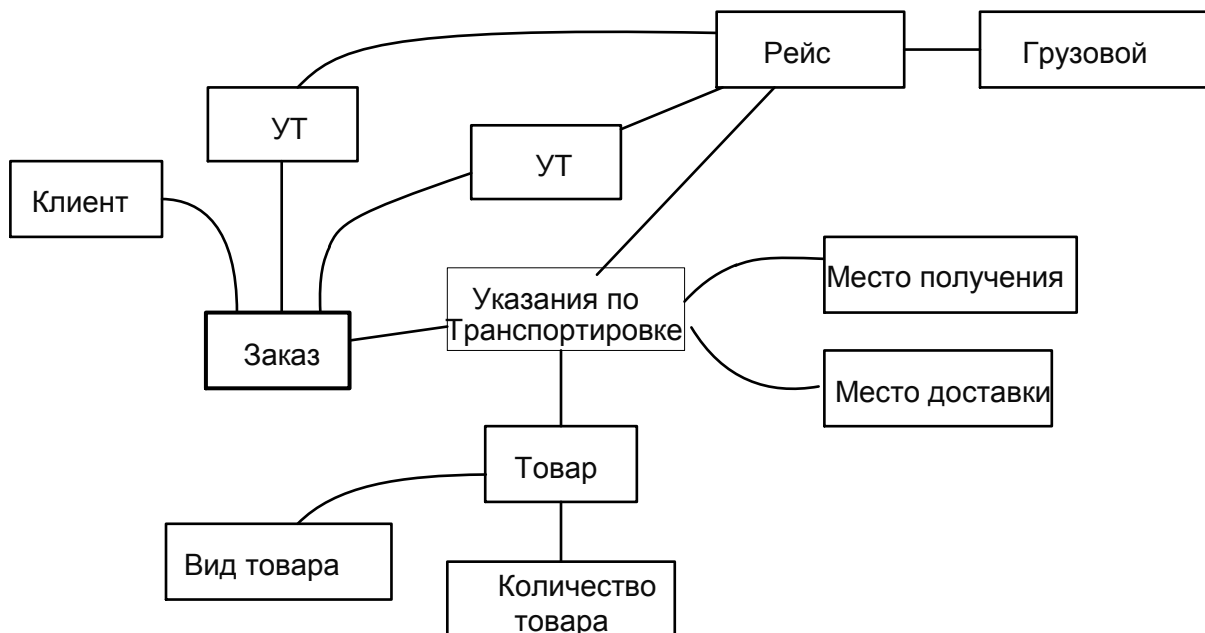


Рисунок 8.2. Пример сцены, задающей модель ситуации

Наличие сцены как связанной семантической сети на основе онтологии предметной области позволяет пользователю навигировать по ситуации.

Например, кликнув на объект «Клиент», можно сразу получить информацию по всем его заказам и грузовикам, а если кликнуть «Место погрузки», то можно увидеть все Рейсы, загружающие здесь товары.

Онтология позволяет отделить концептуальные знания предметной области от особенностей логики планирования, что упрощает процесс развития и доработки системы, а также дает возможность пользователям в определенных пределах модифицировать логику работы системы без привлечения программистов.

## Виртуальный мир

В планировщике существуют несколько ключевых типов агентов:

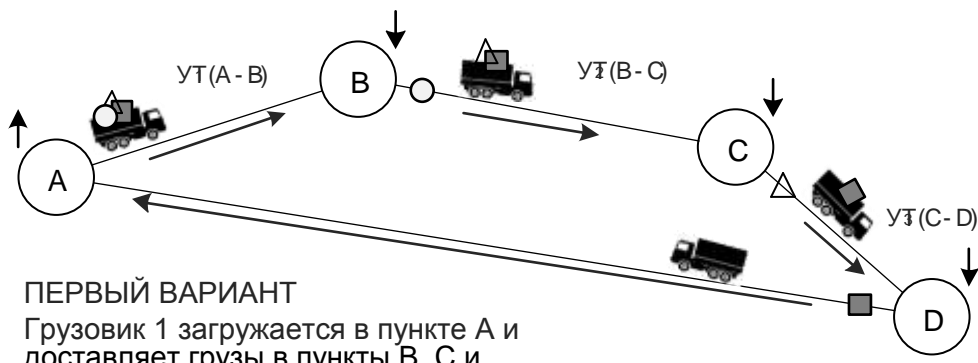
- Агент Заказчика – следит за необходимым уровнем предоставляемых услуг.
- Агент Заказа – разбивает заказ на указания по транспортировке и отслеживает показатели выполнения заказа, находит указания по транспортировке, назначения которых выполнены ненадлежащим образом и пытается улучшить ситуацию путем поиска наилучшего рейса.
  - Агент Указания по транспортировке (УТ) – ищет подходящие рейсы для перевозки конкретных грузов.
  - Агент Рейсов – занят поисками наиболее подходящих маршрутов по транспортировке, обеспечивает консолидацию товаров, ищет самые короткие маршруты.
  - Агент Транзитной Перегрузки – отвечает за расписание транзитной погрузки и распределяет Рейсы по времени.
  - Агент Группировки – группирует (консолидирует) похожие указания по транспортировке.
  - Агент Предприятия – минимизирует фиксированные затраты, уменьшая количество используемых грузовиков, переключает корпоративные стратегии, следит за расписанием и отсеивает «плохие» варианты рейсов.

В зависимости от ситуации, агент любого типа может выступать в качестве Агента Потребностей или Агента Возможностей (Ресурса).

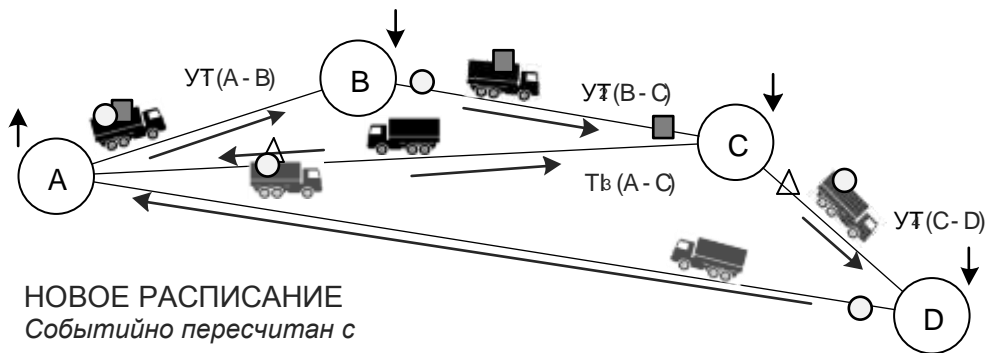
Планировщик позволяет агентам формировать группы (коалиции), например, объединяя указания по транспортировке на рейс или группируя все Рейсы, которые совместно составят Рабочую смену водителя (т.е. все рейсы, осуществляемые водителем в течение рабочего дня). Агенты могут присоединяться к группам и выходить из них, а отдельные группы могут быть перемещаться (например, Рейс целиком может быть назначен в другую Водительскую Смену).

Примеры сцен виртуального мира транспортной логистики представлены на Рисунке 8.3.

В первом примере всю развозку осуществляет один грузовик, но с приходом события нового заказа становится необходим дополнительный грузовик.



**ПЕРВЫЙ ВАРИАНТ**  
 Грузовик 1 загружается в пункте А и доставляет грузы в пункты В, С и



**НОВОЕ РАСПИСАНИЕ**  
 Событийно пересчитан с  
 УТ<sub>3</sub> (А – С) и УТ<sub>4</sub> (С – D)  
 Грузовик 2 назначен на новые УТ<sub>3</sub> и УТ<sub>4</sub>,  
 предыдущий рейс был изменен

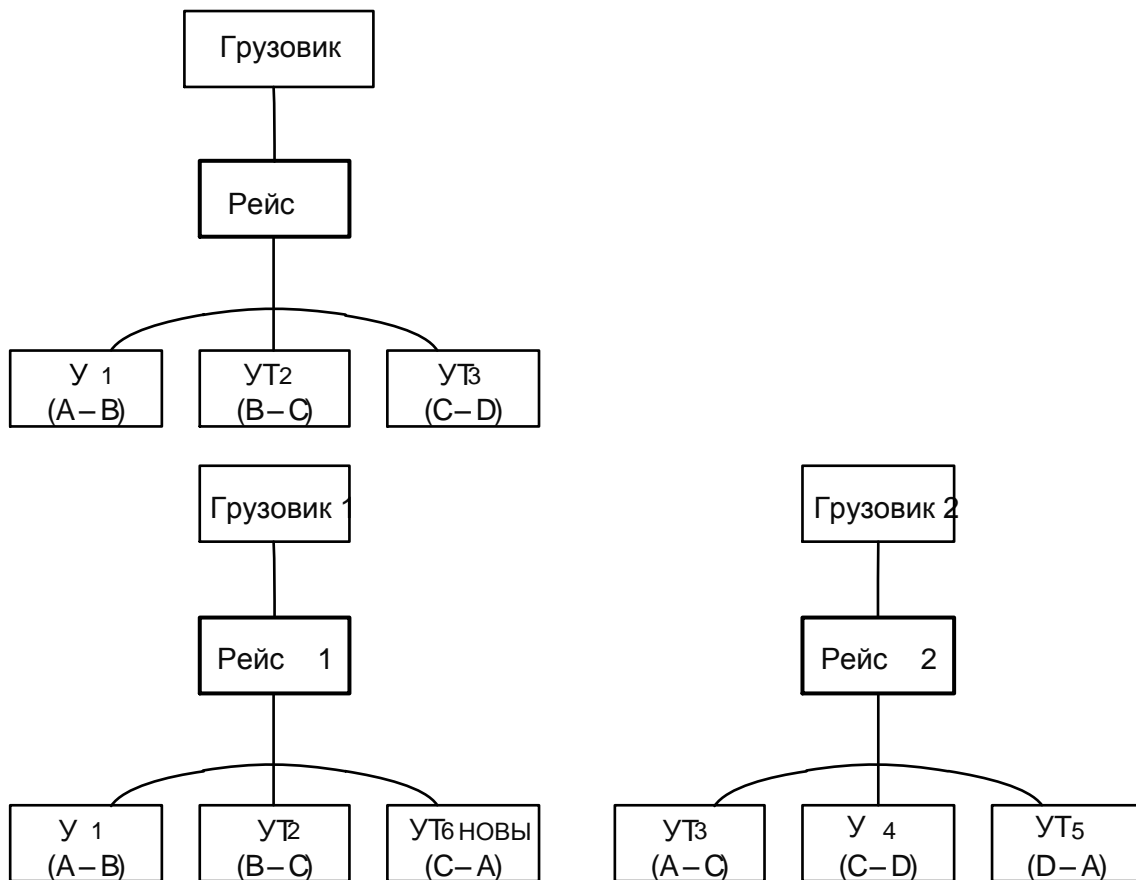


Рисунок 8.3. Примеры сцен виртуального мира транспортной логистики

Каждому агенту поручается задание найти вариант, наилучшим образом подходящий для актуальных в текущий момент критериев. При этом агенты обладают правом отказаться от ранее принятого варианта при появлении лучшей возможности.

В таком случае агент, вариант которого был принят ранее, а затем отклонен, начинает искать новые возможности, и этот процесс никогда не завершается.

Для этого агенты Виртуального мира используют видоизмененный протокол ведения переговоров Contract Net, согласно которому, агенты проходят следующие шаги:

- запросить предварительную (грубую) оценку на этапе предварительного поиска соответствий;
- запросить план, при возможном перераспределении без отмены заказа;
- запросить законченный план (с возможностью отказа);
- принять предложение;
- получить уведомление, что план принят/отклонен.

На каждой стадии агенты могут отключать отдельные ветви проведения переговоров или менять их приоритет, чтобы минимизировать вычисления.

Если один агент имеет 2 равнозначных варианта решения, но один с возможностью отказа другому агенту, а другой без нее, то он отдаст предпочтение варианту без отказа, т.к. это позволяет системе экономить время.

Протокол предполагает, что имеется несколько участников, например, один в роли подрядчика (контрактора) и второй – в роли координатора. Контрактор отвечает за обмен сообщениями между конкретной парой агентов, один из которых представляет потребность, а другой – возможность. В роль координатора входит поддержка переговоров с несколькими агентами одновременно для получения альтернативных предложений и выбора наилучших.

Агенты имеют множество целей, задаваемых через критерии (качество, цена, время, риски), которые обладают весовыми коэффициентами. Эти коэффициенты могут быть изменены индивидуально для каждого отдельного агента. В любое время пользователь может увеличить относительную важность уровня предоставляемых услуг или максимизировать критерий прибыльности. Например, если заказы от VIP-клиентов уже распределены и появляется новый заказ от нового ценного клиента с более жесткими условиями, это может привести к снижению качества услуг для уже распределенных заказов в допустимом интервале, что позволяет через коэффициенты менять стратегией реакции на события также по ситуации.

Первоначальная сцена создается оператором при помощи программы редактирования или путем импортирования из XML-файла. Сцена отображает все ресурсы, необходимые для перевозки (тягачи, прицепы, склады, места загрузки, места доставки), а также их состояние и расположение в сети транспортировки.

Как только появляется первый заказ, агенты разделяют его на указания по транспортировке и подбирают ресурсы, необходимые для каждой операции, описанной в Указаниях по Транспортировке. Начальная Сцена, меняясь, становится Текущей Сценой, которая обновляется после каждого события.

Построенное расписание выгружается из Текущей Сцены и может быть отображено в виде таблицы или диаграммы пользователю.

Новые события добавляются в текущее расписание путем импортирования из сторонних программ, XML-файлов или задаются вручную. Когда в планировщике появляются новые события, он приостанавливает прочие активности или завершает обработку поступившего ранее события и начинает работать с новым событием.

Агенты УТ начинают предварительный поиск вариантов с помощью начальной грубой оценки ситуации и проверки ограничений по доставке. Далее они начинают переговоры с Агентами Рейсов, сообщая им, сколько они готовы заплатить за выполнение доставки. Если УТ представляет интерес для Агента Рейса, то он старается удовлетворить данное УТ, осуществляя поиск свободного времени или рабочей смены. Если вариант найден, Агент Рейса делает итоговый чистовой подсчет и заново проверяет ограничения. Затем тот же агент высылает сообщение Агенту УТ с просьбой подтвердить назначение и информирует других Агентов УТ, которые являются частью того же заказа, о том, что новые указания по транспортировке назначены исполнителю и что они могут заново проводить расчет или пересчет своих стоимостей с учетом модели разделения расходов.

Если новые события не поступают, включается фаза проактивности, и агенты УТ, Рейса, Рабочего времени водителя и Тягача, неудовлетворенные выбранными вариантами, начинают искать себе более выгодные варианты. Важное преимущество нашего решения заключается в том, что проактивный поиск более выгодных вариантов происходит в системе при первой же возможности в автоматическом режиме, т.е. планировщик непрерывно работает над поиском лучшего возможного варианта для каждого заказа и ресурса, если только решение не «заморожено» пользователем. Агент любого типа может проявить проактивность, в первую очередь, те агенты, которые не удовлетворены своим текущим состоянием.

В результате, система никогда не останавливается и постоянно старается либо улучшить результаты, либо всегда готова к вводу и обработке новых событий.

## Интерфейс пользователя

Пользователь имеет графический интерфейс, показывающий начальную сцену мира, создаваемое расписание, очередь событий для планирования, карту с размещением грузовиков и подсветкой GPS позиций, а также показатели эффективности плана и факта.

Пользователь может постоянно видеть и проверять результаты работы, используя диаграмму Ганта или анализируя получаемые отчеты.

Существует также возможность составить расписание вручную, попросив при этом систему показывать выгодные альтернативные решения. В таком случае система может выделять отдельные части расписаний, которые необходимо улучшить, и предлагать варианты улучшения.

Пользователь может как утвердить результаты планирования, так и отклонить решения агентов и назначить грузовики на заказы вручную, что, возможно, вызовет цепную реакцию пересчета планов по другим грузам и покажет последствия решения.

В этом случае система «доиграет» решения за пользователем, но только если пользователь разрешит такую доработку расписания.

## Соединяя виртуальный и реальный миры

Система размещается на сервере, но имеет возможность взаимодействовать с пользователями через десктоп и веб-интерфейс, а также поддерживается двустороннее взаимодействие с водителями через мобильное устройство (терминал).

Новые события, происходящие в Реальном Мире, передаются в Виртуальный Мир (систему) из других систем или вводятся пользователями, а также водителями через мобильный терминал. События обрабатываются системой на сервере и результаты сохраняются в базе данных системы, а также передаются пользователям, включая и водителей, на их терминалы. Кроме того, система постоянно получает информацию о позициях грузовиков с GPS-навигаторов.

Сообщения из Виртуального Мира в Реальный Мир (указания для водителей и т.д.) высылаются в виде текстовых сообщений.

## Результаты

Первая версия Планировщика была создана в 2005-2008 гг. и использована в двух транспортных компаниях, имевших различные требования [3].

Требования первого заказчика заключались в создании расписаний транспортировки в режиме реального времени для 200 указаний по транспортировке и 50 грузовиков (36 машин из своего автопарка и 14 – сторонние перевозчики) в коммерческой транспортной сети крупного дистрибутора товаров в Великобритании. Данная сеть включала в себя 9 крупных распределительных центров, пункты транзитной перегрузки товаров для первичной и вторичной консолидации товаров и 3 совместно используемых склада. По требованиям заказчика в системе должны были быть дополнительно реализованы временные окна, отображающие доступность магазинов и складов для приема и обработке грузов, планирование обратной доставки пустой тары, поддержка консолидаций, учет грузоподъемности грузовиков и некоторые другие возможности.

Разработанный Планировщик в тестовых примерах создавал расписание на 200 крупных заказов примерно за 8 минут, планируя при этом около 116 рейсов общей протяженностью более 33 тыс. километров. Анализ качества решений показал, что предлагаемые расписания достигли уровня опытного диспетчера, при этом трудоемкость построения расписаний требовала бы около 4 часов работы таких диспетчеров.

При этом обработка события занимала от нескольких секунд – до пары минут, позволяя компании сделать шаг для перехода в режим реального времени.

Требования второго заказчика включали создание более масштабного расписания на 4000 заказов по транспортировке и около 200 грузовых автомобилей, работающих в коммерческой сети США. Данная сеть включала первичные и вторичные доставки между примерно 600 городами, 3 пунктами транзитной перегрузки товаров, 4 охраняемыми зонами для смены прицепов и т.д.

В этой транспортной сети также формировалось значительное количество очень небольших заказов, требующих консолидации.

Специальные требования заказчика включали специфическую динамическую маршрутизацию, транзитные перегрузки, контроль доступности локаций, перерывы водителей на отдых и некоторые другие.

В этих условиях для построения начального мастер-плана для 4000 заказов, Планировщику требовалось около 4 часов.

Анализ расписаний показал высокую эффективность консолидаций и перевозки как крупных, так и малых заказов.

Обработка одного события в адаптивном режиме при этом также занимала от нескольких секунд – до нескольких минут.

В результате пользователями отмечались следующие преимущества решения:

- индивидуальный подход к каждому заказу;
- существенное снижение трудоемкости построения сложных расписаний;
- интерактивный характер доработки расписаний в диалоге с диспетчером;
- возможность формализовать знания диспетчеров и снизить зависимость от человеческого фактора;
- автоматизация критической для бизнеса задачи управления ресурсами;
- высокая скорость адаптивной обработки событий.

В 2009-2014 гг. новое поколение разработанных мультиагентных систем управления грузоперевозками Smart Trucks было внедрено в России для компаний «Пролоджикс» (Москва), «Лорри» (Екатеринбург), Монополия (Санкт-Петербург) и в некоторых других.

В частности, экономический эффект от внедрения мультиагентной системы Smart Trucks в ОАО «Лорри» включает [22]:

- увеличение на 5% общего объема выполненных заказов (при том же объеме флота грузовиков и состава водителей);
- каждый километр, благодаря системе, дает дополнительно от 1 до 2 рублей;
- уменьшение холостого пробега каждого грузовика на 3–5%;
- уменьшение простоев грузовиков на 5–7%;
- сокращение пени и штрафов на 2–4%.

В настоящее время Smart Logistics дорабатывается совместно с партнерами в Финляндии для использования в Европейских странах.

## Список литературы

1. Himoff J., Rzevski G, Skobelev P. Magenta Technology: Multi-Agent Logistics i-Scheduler for Road Transportation – Proceedings of 5-th International Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems (AAMAS 2006). –Japan, May 2006.года. Самара. 2006. – С. 522-529.
2. Rzevski G., Himoff J., Skobelev P. Magenta Technology: A Family of Multi-Agent Intelligent Schedulers. Proceedings of Workshop on Software Agents in Information Systems and Industrial Applications (SAISIA). - Fraunhofer IITB, Germany, February 2006. - [http://www.researchgate.net/publication/237566182\\_MAGENTA\\_Technology\\_A\\_Family\\_of\\_Multi-Agent\\_Intelligent\\_Schedulers](http://www.researchgate.net/publication/237566182_MAGENTA_Technology_A_Family_of_Multi-Agent_Intelligent_Schedulers)
3. Skobelev P., Glashenko A., Grachev I., Inozemtsev S. MAGENTA Technology Case Studies of Magenta i-Scheduler for Road Transportation - Proceedings of 7-th International Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems AAMAS 2007 - US, Hawaii, May 2007. – P. 1390-1397.



4. Андреев В. В., Батищев С. В., Батищева Т. В., Глащенко А. В., Скобелев П.О. Метод динамического баланса интересов при планировании расписаний в задаче транспортной логистики // Труды VII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 27 июня - 01 июля 2005 года. Самара. 2005. – С. 388-396.
5. Андреев М. В., Глащенко А. В., Иноземцев С. В., Киселев И. П., Сафронов А. В., Скобелев П. О. Логика динамической балансировки трейд-оффов агентов в задачах построения связанных расписаний в транспортной логистике реального времени // Труды VIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 24 июня - 28 июня 2006 года. Самара. 2006. – С. 541-546.
6. Глащенко А. В., Иноземцев С. В., Киселев И. П., Скобелев П. О., Чевелев А. С. Развитие архитектуры мультиагентных систем для планирования расписаний в транспортной логистике // Труды VIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 24 июня - 28 июня 2006 года. Самара. 2006. – С.530-540.
7. Андреев В. В., Глащенко А. В., Иващенко А. В., Иноземцев С. В., Скобелев П. О., Швейкин П. К. Мультиагентные системы адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени // Труды IV международной конференции по проблемам управления. 26-30 января 2009 г. Москва, 2009. С. 1534 – 1542.
8. Andreev V., Glashchenko A., Ivashchenko A., Inozemtsev S., Rzevski G., Skobelev P. and Petr Shveykin Magenta Multi-agent Systems for Dynamic Scheduling // Proceeding of the First International Conference on Agents and Artificial Intelligence ICAART 2009 (Porto, Portugal 19-21 January, 2009) – P. 489 – 496.
9. Скобелев П. О. Мультиагентная система управления грузовыми перевозками в реальном времени. // Сборник тезисов Всероссийской конференции с международным участием «Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации». г.Москва, 25-27 октября 2011 г. С.112-114.
10. А.В.Иващенко, А.Н.Лада, И.В.Майоров, Е.В.Симонова, П.О.Скобелев, А.В.Царев Исследование моделей самоорганизации в мультиагентной системе управления междугородними грузовыми перевозками // Материалы 4-й мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2011, 3-8 октября 2011 г., с.Дивноморское, Геленджик, Россия. Т.1. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – с.233-235.
11. Иващенко А. В. Лада А., Майоров И., Скобелев П., Царев А. Анализ эффективности применения мультиагентной системы управления региональными перевозками в реальном времени // Материалы 4-й мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2011, 3-8 октября 2011 г., с.Дивноморское, Геленджик, Россия. Т.1. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. С. 353-356.
12. Ivaschenko A., Skobelev P., Tsarev A., Vaysblat A. Smart solutions multi-agent platform for dynamic transportation scheduling / 3rd International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART) ICAART 2011 (Rome, Italy), Volume 2, 2011. – pp. 372 – 375.
13. Вайсблат А. В., Диязитдинова А. Р., Иващенко А. В., Царев А. В. Организация интерактивного взаимодействия в мультиагентной системе управления транспортно-экспедиционной компанией. // Труды XII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 21-23 июня 2010г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. – С. 678-685.
14. Диязитдинова А. Р., Иващенко А. В., Мартышкин Д. М., Скобелев П. О., Сурнин О. Л., Царев А. В. Разработка мультиагентной платформы для планирования в сфере транспортной логистики // Труды XI Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, 2009. С. 608 – 623.
15. Diyazitdinova A., Ivashenko A, Skobelev P., Tsarev A., Martyshkin D., Syusin I. Multi-Agent Platform for Full Truck Load Scheduling // Interactive Systems and Technologies: The problems of

Human-Computer Interaction. Volume III. – Collection of scientific papers. – Ulyanovsk: UISTU, 2009. – pp 132 – 143.

16. П.О. Скобелев, А.Н. Лада, С.С. Кожевников, Д.С. Рыбак, И.А. Пустовой, А.В. Царев. Разработка интеллектуальной системы управления сборными грузовыми перевозками в реальном времени. – Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки». 2013. № 3(39). – С. 65–74.

17. Амелина Н., Лада А., Майоров И., Скобелев П., Царев А. Исследование моделей организации грузовых перевозок с применением мультиагентной системы для адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени. // Проблемы управления. 2011. №6. С. 31-37.

18. Oleg Granichin, Petr Skobelev, Alexander Lada, Igor Mayorov, Alexander Tsarev. Comparing adaptive and non-adaptive models of cargo transportation in multi-agent system for real time truck scheduling. – Proceedings of the 4th International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications (ECTA'2012), October 5-7, 2012, Barcelona, Spain. – SciTePress, 2012. – P. 282-285.

19. Лада А.Н., Ларюхин В.Б., Мартинкевич, А.В., Морозова Н.С., Очков Д.С., Пейсахович Д.Г., Рыбак Д.С., Скобелев П.О., Сочинский А.А., Царев А.В. Программа «Мультиагентная система управления грузоперевозками в реальном времени Smart Trucks». – Рег. номер 2012611092 (26.01.2012). Электронный бюллетень – Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем RU ОБПБТ № 2(79) 20.06.2012. – С. 264.

20. F. I. Gogoulos, D. I. Kaklamani, I. S. Venieris, A.-C. Anadiotis, U. Inden, S. Naimark, P. Skobelev and A. Tsarev. An Intelligent Tracking Operations Management System // Proceedings of the 1st IFAC Workshop on Advances in Control and Automation Theory for Transportation Applications (ACATTA 2013), September 16-17, 2013, Istanbul, Turkey. 2013. – P. 49-54.

21. Oleg Granichin, Petr Skobelev, Alexander Lada, Igor Mayorov, Alexander Tsarev. Cargo transportation models analysis using multi-agent adaptive real-time truck scheduling system. – Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART'2013), February 15-18, 2013, Barcelona, Spain. – SciTePress, Portugal, 2013, Vol. 2. – pp. 244-249.

22. Олег Быстров (ОАО «Лорри»): Нужна реальная оптимизация: ничего другого не остается - <http://www.iemag.ru/interview/detail.php?ID=29092>.

# ГЛАВА 9: Адаптивный анализ «Больших данных»

## Проблема

Первой сложной задачей, которую мы начали решать в этой области, была задача обработки в реальном времени больших объемов данных из магазинов беспошлинной торговли (Duty Free) крупного европейского аэропорта.

Целью такой обработки было построение кластеров данных – групп записей о покупателях с общими для них характеристиками, например, в простейший кластер можно объединить записи всех клиентов магазинов, летящих одним рейсом, купивших одновременно определенные напитки и продукты или одежду и парфюмерию. Знание о кластерах данных дает видение некоторого «образа» клиента, который далее может быть формализован в виде логических правил вида «Если ... - То ...» (например, если клиенты данного типа покупают продукт А, то покупают и продукт Б) и могут быть использованы для оптимизации раскладки товаров на полках, выстраивания правильных отношений с потребителями, прогнозирования сбыта, выработки предложений по скидкам и т.д.

Однако, очень быстро выяснилось, что основной проблемой многих современных методов и средств анализа данных (Data Mining) является тот факт, что существующие системы не могут анализировать непрерывно изменяющиеся данные.

В то же время, задач, требующих динамической кластеризации оказалось довольно много, большим полем применения для такого рода задач может служить любой Интернет-портал с множеством различных посетителей, которые обычно оставляют о себе очень малое количество полезной информации. Чтобы построить логически обоснованный индивидуальный образ поведения каждого потребителя, необходимо, чтобы анализ данных происходил динамически, т.е. обработка данных должна проводиться в темпе поступления данных, чтобы успеть выработать ценные предложения для посетителя до момента его ухода с портала.

Существующие способы обнаружения образов и анализа данных не справляются с этими требованиями или крайне упрощают процесс анализа.

Кроме того, в существующих подходах от пользователя, как правило, до начала анализа данных требуется выдвинуть некоторые гипотезы, что в условиях растущей неопределенности оказывается далеко не всегда возможно на практике.

## Решение

На наш взгляд, распознавание образов, построение кластеров и выявление любых других закономерностей – это, по существу, процесс адаптивного соотнесения, группировки и распределения данных, подобный распределению заказов по ресурсам в логистике [1].

В этой связи для решения задачи был разработан новый метод адаптивной кластеризации больших объемов данных на основе использования онтологий и мультиагентных технологий [2-5].

В качестве основных агентов самоорганизации было предложено ввести агентов записей и кластеров, которые должны активно конкурировать и сотрудничать друг с другом на виртуальном рынке системы. Для записей главная цель может состоять в том, чтобы войти как можно в более мощные (представительные) кластеры, которые находятся на самом вершине рейтинга кластеров, чтобы их интересы учитывались в первую очередь. Для кластеров же важно сформировать как можно более узкий круг записей (при максимальном количестве

записей в кластере), чтобы их плотность была как можно выше, если основной ценностью кластера дана плотность записей.

Для этого агенты записей и кластеров должны постоянно анализировать свое состояние и принимать решения по образованию новых кластеров, повышающих ценность записей, в частности, по входу записи в кластер или выходу из него, об образовании кластера несколькими записями, наоборот, по выходу записи из кластера. При этом кластер, в свою очередь, может рассматриваться как запись для кластеров более высокого уровня. Если в качестве ценности рассматривается плотность кластера, то запись, пришедшая в центр области кластера, очевидно, легко войдет в кластер, повышая его плотность. Запись, которая находится за пределами кластера, но рядом с его границами, для входа в кластер должна вызвать расширение границ этого кластера, с возможным падением его плотности. Будет ли это выгодно записи и будет ли это выгодно кластеру? Нужно посмотреть как «глазами» записи, так и кластера, и принять решение о расширении кластера, если решение будет выгодно обеим сторонам. Если же кластер не захочет расширяться, запись может обратиться к ближайшим записям данного кластера, и, возможно, попробует «отбить» их у кластера, если им окажется выгоднее состоять в новом кластере, плотность которого может оказаться выше.

Заказчику было бы важно видеть, какие мощные кластеры на текущий момент сформировались в системе, чтобы ясно и четко понимать лежащие под ними группы образов покупателей, а также понимать динамику изменений кластеров, часть из которых может активно набирать вес, а часть – деградировать и распадаться или быть относительно стабильной, колебаться в определенных размерах и т.п.

Как и в рассмотренных выше примерах по логистике, для кластеров и записей вводятся виртуальные деньги, которые могут использоваться для оплаты присоединения к кластеру (кластер накапливает деньги для своего усиления, расширения границ и приема новых членов), при выходе из него или при создании нового кластера, увеличении или сокращении размеров кластеров и т.д. В этом случае более «богатые» записи и кластеры могут одновременно состоять в большем числе кластеров более высокого уровня и иметь больше возможностей, например, для расширения границ кластеров.

В этом подходе от пользователя не требуется делать никаких начальных догадок, но есть много возможностей управлять процессами кластеризации.

Разработанный метод может служить основой для развития данного подхода в другие сферы Data Mining, включая обработку изображений, распознавание образов и т.п.

## Виртуальный мир кластеризации

Предположим, что мультиагентной системе дано задание распределить записи по кластерам, и эти записи поступают в систему небольшими партиями.

Время поступления записей непредсказуемо, а их характерные черты неизвестны.

Предложенный метод динамической кластеризации массивов данных работает следующим образом:

- Как только новая запись поступает в систему, ей назначается агент.

- Новый Агент Записи рассматривает доступные кластеры, выбирает наиболее предпочтительные (это определяется правилами оценки кластеров), и высылает соответствующим Агентам Кластеров заявки на присоединение.

- Агенты Кластеров, получившие заявки на присоединение, оценивают их, руководствуясь правилами оценки записей. Агенты Кластеров, считающие, что новые записи увеличат уровень ценности их кластеров, отсылают Агентам этих Записей предложения присоединения.

- Агент Записи принимает наиболее подходящее предложение и присоединяется к кластеру, который может расширять ранее установленные границы и соответственно инициировать процессы переговоров с новыми записями, которые оказались в его зоне охвата.

- Если нет доступных подходящих кластеров, Агент Записи пытается сформировать новый кластер, объединяющий другие записи, принадлежащие другим кластерам и/или ни к чему не присоединившиеся, высылая предложение о формировании кластера Агентам Записей.

- Агенты Записей рассматривают предложение сформировать новые кластеры. Они принимают его, только если оно увеличивает общую ценность системы и позволяет записям войти в ценные кластеры, которые повышают их представительность. Принимая предложение, агенты создают новые условия для реорганизации всей системы – ведь ранее установленные отношения между освобожденными записями и их кластерами меняются или разрушаются, и между записями устанавливаются новые отношения.

- Данный процесс самоорганизации увеличивает общую ценность системы.

- Агенты, представляющие только что созданные кластеры, и/или кластеры, характеристики (значение, границы, количество записей) которых изменились во время самоорганизации, запускают новый круг переговоров с агентами выбранных единиц информации, повторяя описанный выше процесс - что можно рассматривать как начало цепной реакции изменения общей структуры кластеров.

- Процесс кластеризации продолжается до тех пор, пока все записи не будут привязаны к кластерам, и больше никакое изменение состава кластеров не может увеличить ценность системы, или до тех пор, пока не закончится время, выделенное для кластеризации.

В результате процесса кластеризации записи создают кластеры (структуры), и эти структуры, в свою очередь, участвуют в формировании более сложных структур. Процесс останавливается, когда вся предметная область кластеризована. Дальнейшее появление новых записей вносит лишь адаптивные изменения в структуру, но при определенных условиях может инициировать и процесс полной перестройки всей структуры.

### Пример

Пусть имеется 4 записи, которые по одной поступают в систему (рисунок 9.1): Запись 1 (координаты - 2; 4), Запись 2 (3; 3), Запись 3 (6; 3) и Запись 4 (7; 3).

Правила оценки кластеров базируются на плотности записей, а правило ведения переговоров звучит следующим образом: «сначала рассматривается ближайшая запись или кластер».

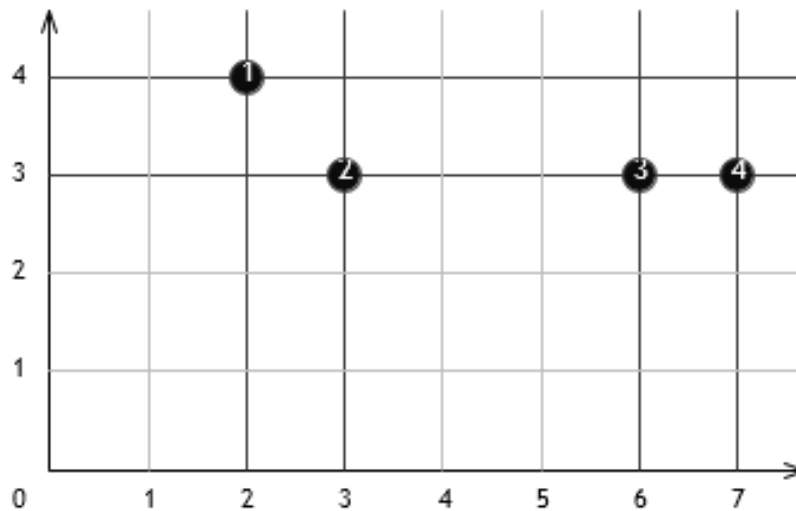


Рисунок 9.1. Записи, доступные для кластеризации в начальный момент времени

Тогда этапы кластеризации выглядят следующим образом:

а) Запись 1 поступает в систему.

б) Запись 2 поступает в систему.

Вместе с Записью 1 она формирует новый Кластер 5 (Рисунок 9.2).

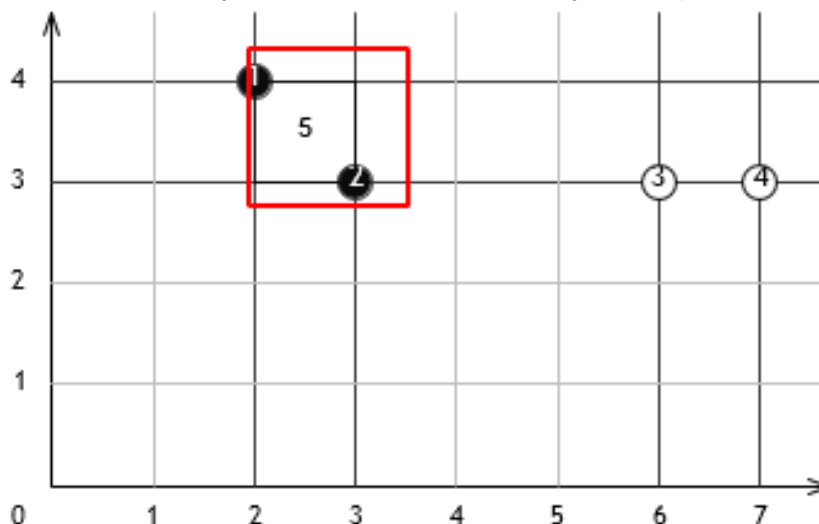


Рисунок 9.2. Записи 1 и 2 формируют кластер 5

в) Запись 3 поступает в систему. Она высылает заявку на присоединение к Кластеру 5, но та отклоняется, т.к. присоединение данной единицы информации к выбранному кластеру понизит его плотность. Далее Запись 3 предлагает Кластеру 5 создать новый кластер, который будет включать Запись 3 и Кластер 5. Это предложение принимается, и формируется Кластер 6 (рисунок 9.3).

г) Запись 4 поступает в систему и предлагает Записи 3 выйти из Кластера 6 и вместе с Записью 4 сформировать новый кластер. Запись 3 принимает предложение, т.к. новый кластер будет обладать большей плотностью, чем Кластер 6. Кластер 6 удаляется, а из записей 3 и 4 создается Кластер 7 (рисунок 9.4).

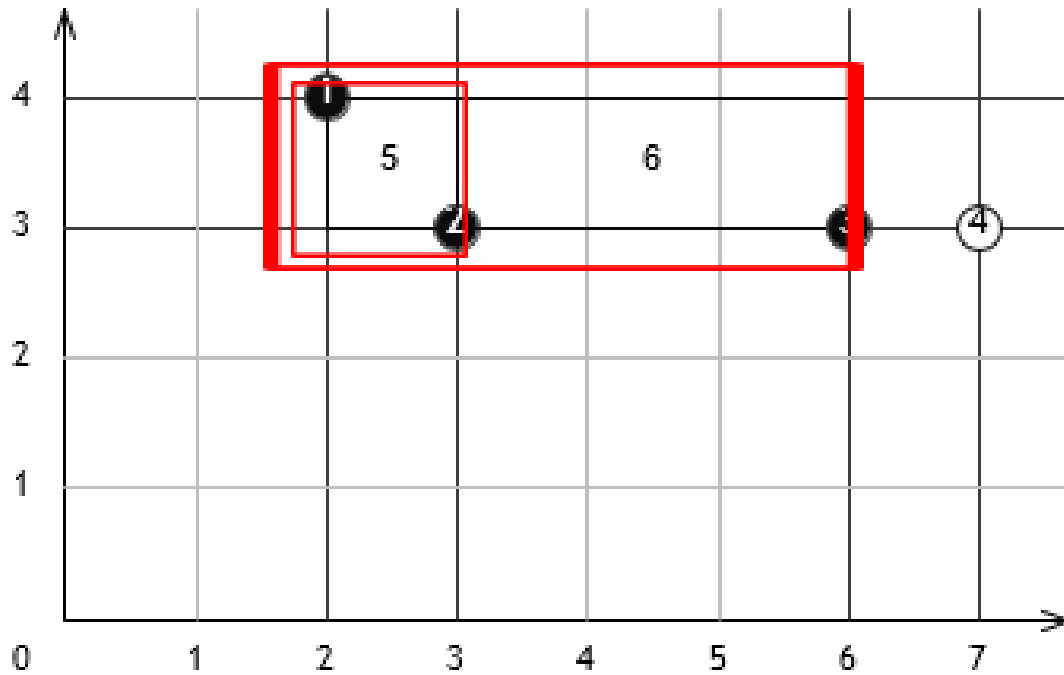


Рисунок 9.3. Запись 3 и кластер 5 создают кластер 6

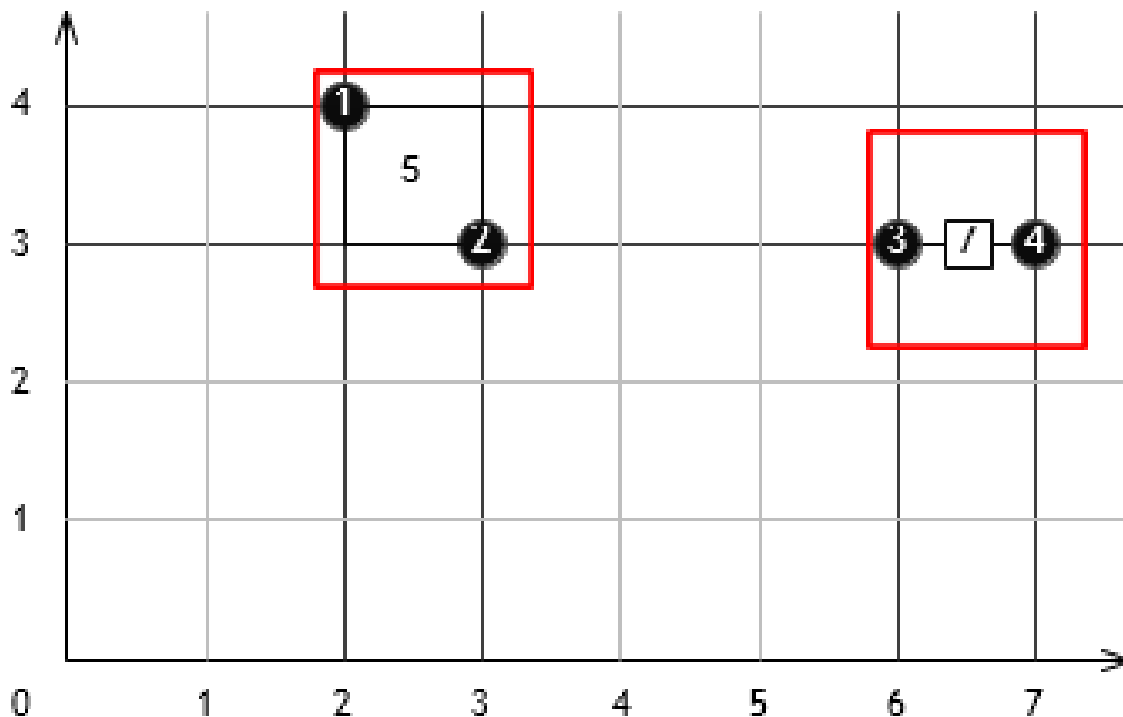


Рисунок 9.4. Кластер 6 удаляется, создается кластер 7

д) Далее Кластер 7 предлагает Кластеру 5 совместно создать новый кластер. Они формируют Кластер 8 (рисунок 9.5).

### Микроэкономика кластеризации

Представляющие записи и кластеры агенты ведут переговоры о присоединении к кластерам в соответствии с одной из доступных моделей, описанных ниже.

## Модель Клуба

Агенты Записей (единиц информации) вносят плату за присоединение к кластерам. Величина взноса является фиксированной и регламентируется общими правилами.

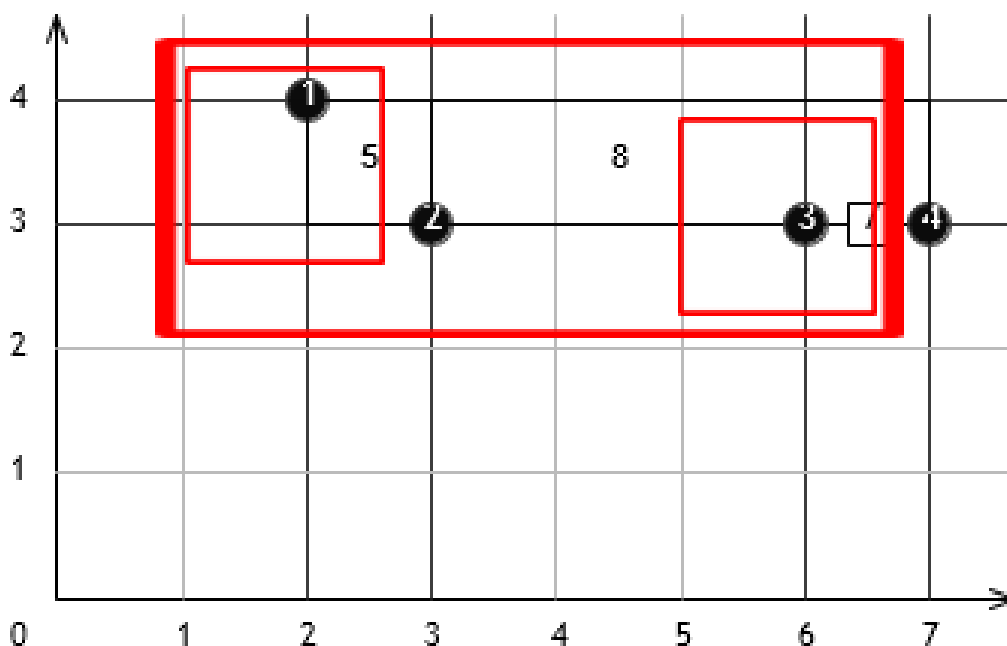


Рисунок 9.5. Кластеры 5 и 7 формируют кластер 8

## Модель Акционеров

Агенты Записей приобретают акции в кластерах. Стоимость акций зависит от количества записей, которые принадлежат кластеру, и их уровня ценности. С течением времени стоимость может варьироваться. Записи обладают возможностью увеличить свои уровни ценности путем присоединения к кластеру или выхода из него в необходимый момент. Они также могут терять ценность, если принимают неверное решение о присоединении к кластеру. Данная модель увеличивает расслоение кластеров с точки зрения их практической значимости для пользователей.

## Модель пошлыны

Записи платят налог-пошлыну во время нахождения в кластере. Данная модель способствует изменениям, приводящим к эволюции системы, т.к. записи вынуждены выходить из кластеров, когда у них заканчиваются виртуальные деньги. После их выхода из кластера появляются свободные места для недавно поступивших записей данных. Из-за различий в уровнях ценности работает механизм отбора. Эта модель способствует тому, что данные, так же, как и кластеры, в момент принятия решения рассматривают долгосрочную перспективу. Например, кластер, который не очень привлекает новые записи, может принять решение снизить размер пошлыны, чтобы к нему присоединились новые записи, таким образом продлевая себе существование в системе.

## Зависимость кластеризации от модели ведения переговоров

Кластеризация данных и ее результат зависят от выбранной модели вступления в кластер. Некоторые свойства кластеров зависят от критериев кластеризации: а) размер кластеров – большое количество маленьких кластеров или небольшое количество больших; б) равенство (все записи обладают одинаковой значимостью) против элитарности (некоторым записям отдается приоритет); и в) скорость кластеризации.



Рассмотрим пример (таблица 9.1).

Таблица 9.1. Записи, доступные для кластеризации

Имя покупателя	Купленный товар	Стоимость покупки в д.е.
Сергей	Картофель	500
Евгений	Помидоры	13
Федор	Картофель	10
Петр	Картофель	700
Дмитрий	Огурцы	20

Если использовать Модель Клубов, установить плату за вход в размере 3 денежные единицы (д.е.) и дать всем записям равное количество ресурсов, допустим, 10 д.е., то система создаст 2 следующих кластера (таблица 9.2).

Таблица 9.2. Два кластера, получившиеся в результате использования Модели Клубов

Название кластера	Элементы кластера	Плата за вход	Уровень энергии кластера (д.е.)
А Картофель	Сергей Федор Петр	3	9
В Овощи	Сергей Евгений Федор Петр Дмитрий	3	15

Теперь рассмотрим Модель Акционеров. Предположим, каждая единица информации обладает количеством д.е., равным стоимости покупки. Количество д.е. для присоединения к кластеру рассчитывается следующим образом.

Первая запись (Сергей) может создать кластер А, получивший название Картофель, за 10% общего количества ресурсов (50 д.е.). Далее, когда в систему поступает запись Петр, она может решить отдавать то же количество единиц энергии (50 д.е.) или больше, допустим, 10% от количества имеющихся у нее ресурсов (70 д.е.). В последнем случае она получит большее количество акций (которые позже можно будет продать, когда кластер станет богаче, и данная единица информации решит покинуть этот кластер и присоединиться к другому).

Таблица 9.3. 2 кластера, получившиеся в результате использования Модели Акционеров

Название кластера	Элементы кластера	Стоимость присоединения	Уровень энергии кластера (д.е.)
А Картофель	Сергей Петр	60	120
В Овощи	Евгений Федор Дмитрий	2	6

Средняя стоимость присоединения к кластеру составляет:  $(50+70)/2 = 60$  д.е..

Более богатым кластерам невыгодно быть держателями акций кластеров с маленькой платой за вход, т.к. эти кластеры бедные.

Здесь прослеживается значительная разница в том, как создаются кластеры. Модель Акционеров четко разделяет богатые записи от бедных.

В чем же разница для клиента - пользователя системы? Первая модель больше подходит, когда пользователь хочет знать, какой потребитель приобретает товар, и какой вид товара он покупает. Вторая модель показывает, кто покупает определенные товары в больших количествах. Обе модели могут помочь клиенту запустить 2 разные целенаправленные рекламные кампании.

В итоге получается, что Модель Клубов способствует равенству и создает большое количество кластеров на ранних стадиях (плата за вход низкая и фиксированная, поэтому новый кластер создать легче). Уже находясь в составе кластера, записи неохотно переходят в другой кластер (это связано с тем, что уровень энергии недавно поступивших записей не является достаточным для реструктуризации кластеров).

Модель Акционеров способствует расслоению и элитарности. Она создает четкое разделение богатых и бедных записей, формирует небольшое количество кластеров, дает больше возможностей записям для перехода в другие кластеры даже на поздних стадиях (в связи с тем, что новые богатые записи могут запустить реструктуризацию кластеров, вытесняя из них более бедные записи). Эта модель устанавливает более высокую скорость кластеризации (так как количество опций для каждой записи значительно сокращается – высокая плата за вход не дает бедным записям присоединиться к богатым кластерам).

Модель сбора пошлины вводит дополнительный фактор в процесс кластеризации. Если записям приходится платить за нахождение в системе, то структура кластеров со временем меняется, т.к. оставшимся без ресурсов записям приходится покинуть систему. Данная модель может применяться параллельно с одной из двух других моделей, чтобы стимулировать эволюцию кластеров.

## Представление кластеров

Входные записи всегда представляют собой таблицы данных, где каждая строка – запись, а столбцы содержат значения полей.

Структура кластеров более сложная – как правило, иерархическая или сетевая, поскольку одна запись может входить в несколько кластеров.

Зачастую очень удобно представлять кластеры в виде правил вида «ЕСЛИ ...- ТО ...»:

*ЕСЛИ (условие A1) и (условие A2) и .... (условие An), ТО (условие B1) и (условие B2) и ... (условие Bm).*

Здесь буквами А представлены условия, содержащие поля, которые мы не контролируем (независимые поля), а буквами В – условия, содержащие поля, значения которых можно изменять.

Приведем пример такого правила: «Если условия заказа включают транспортировку груза в 5 кг, тогда этот заказ должен быть назначен на грузовой автомобиль GMC компании Trans Carrier».

Чтобы составить правило из описания кластера как сегмента многомерного пространства, все оси пространства должны быть разбиты на две группы: первая должна содержать поля, которые мы можем изменять, вторая должна состоять из полей, которые не могут быть изменены. Далее необходимо определить зависимости полей первой группы от полей второй группы. Кластеры, созданные на осях одной группы, не принимаются в расчет. При кластеризации могут опускаться значения некоторых осей, тогда кластер определяется на под-измерении всего пространства.

Отметим, что правило, полученное описанным выше способом, всегда представляет кластер, и поэтому, если процедура кластеризации определила все кластеры, она определила и все правила. Но обратное утверждение не является верным. Кластер не всегда может быть представлен правилом, примером может послужить случай, при котором у кластера все элементы принадлежат к одной группе (все зависимые или все независимые).

При оценке правил используются 3 критерия: 1) Репрезентативность; 2) Уровень достоверности; 3) Завершенность.

*Репрезентативность* показывает, сколько элементов кластера включено в правило. Данный параметр не зависит от паттернов.

*Уровень достоверности* показывает, сколько элементов кластера, входящих в левую часть правила (которая следует после слова «ЕСЛИ»), не отвечают условиям правой части правила (которая следует после слова «ТО»). Этот параметр зависит от паттерна, присущего кластеру. Например, паттерн «среди беременных все являются женщинами» обладает уровнем достоверности в 100%, в то время как обратное правило имеет низкий уровень достоверности, т.к. «не все женщины беременны».

*Завершенность* показывает, сколько элементов кластера, отвечающих условиям правой части правила, не отвечают условиям левой части правила. Например, правило «если Вы – человек, то Вы смертны» имеет высокий уровень репрезентативности, но низкий уровень завершенности (так как не все смертные существа – люди).

Чем выше значение репрезентативности и уровня достоверности, тем более ценным является выявленная взаимозависимость элементов кластера.

## Результаты

### Анализ данных о продаже в магазинах

Одно из первых открытий, которое было сделано нашей системой, состояло в том, что все пассажиры, летящие из Хитроу рейсом Лондон-Амстердам в пятницу вечером, покупали парфюмерию.

Этот факт можно рассматривать как нелепое совпадение, но можно было бы попробовать начать продавать больше парфюмерии в это время и, возможно, утроить выручку магазина парфюмерии с 1 кв. метра.

Решение, является ли выявленный факт маркетинговым открытием или просто случайным фактом, не требующим принятия решений, безусловно, остается за менеджером по продаже.

## Планирование перевозок

Логистической компании требовалось автоматически создавать расписание.

Однако, при этом надо было лучше понять мастер-план, базирующийся на истории уже выполненных заказов.

Заказчик предоставил пакет типовых данных из 920 составленных вручную заказов на транспортировку.

Качество расписания должно находиться на том же уровне, что и расписание, написанное опытным логистом.

Однако, диспетчеры затруднялись указать метрики для отличия качества расписаний, поэтому начальная оценка была проведена системой.

В этих целях сначала надо было выявить скрытые правила в предоставленном пакете данных, которые отражали бы решения опытных логистов.

Мультиагентная система для кластеризации обнаружила 218 правил, причем более половины из них обладали уровнем достоверности в 100%.

Найденные системой правила были отправлены эксперту, который подтвердил большую часть из них и согласился с тем, что выявление такого рода зависимостей – главный вопрос данной предметной области. Более того, эксперт признал, что 8% правил не были известны до того, как их обнаружила система, и добавил, что данные правила обладают очень высоким уровнем достоверности.

Далее выявленные правила были загружены в базу знаний Планировщика грузоперевозок с целью сравнения (а) расписания, созданного Планировщиком без использования выявленных правил, (б) расписания, созданного Планировщиком с использованием загруженных правил и (в) расписания, написанного опытным логистом вручную.

Пробные испытания были проведены на наборе данных, отличающемся от того, на котором производилось выявление начальных скрытых знаний.

Каждое испытание было ограничено длительностью расписания в 7 дней.

Загрузка найденных правил на большом наборе данных значительно увеличила скорость планирования, до 3 часов (до этого было потрачено 5 часов). Но что важнее, расписание, созданное с помощью выявленных правил, было гораздо более похоже на то, которое подготовил опытный логист, в отличие от того, которое было создано ранее без использования правил.

Тем самым было показано, что загрузка выявленных правил в систему планирования повысила качество полученного расписания. Это было отражено в следующей статистике: а) необходимая доработка расписаний, производимая вручную, снизилась на 32%; б) качество

рейсов повысилось на 17%; в) количество незаполненных позиций в рейсах сократилось на 11 %; г) пробег авто сократился на 16%; д) использование автопарка сократилось на 8%; д) расчетное время для адаптации расписаний сократилось с 1-2 месяцев до 10-15 дней.

## Распознавание образов для страхования

У нашего клиента, одной из 5 самых крупных страховых компаний в Великобритании, появилась следующая задача.

В связи с тем, что взносы при страховании автомобилей зависят от большого количества параметров (включая пол и возраст клиента, его образование, годовой доход, класс машины и список происшествий), за 20 лет работы юристы компании создали более 25 000 договоров страхования автомобилей.

Задание, которое дали нашей команде, заключалось в том, чтобы проанализировать эти документы, классифицировать их в соответствии с их семантической схожестью и разработать типовые договора для каждой группы документов.

Ожидалось, что образы договоров будут включать самые часто применяемые пункты из составных частей документов, которые будут использоваться в будущем как основания для новых договоров. Частью задания было также провести анализ и классифицировать имеющиеся договоры конкурирующих страховых компаний, а также учитывать полученные результаты при создании новых договоров. Первоначальный подсчет показал, что можно выделить примерно 100 классов документов, и весь процесс займет приблизительно 16 лет работы высококвалифицированного юриста.

Нашей задачей стало постараться автоматизировать данный процесс, тем самым сохраняя время и деньги страховой компании.

Решение этой проблемы, разработанное нашей командой [20], было основано на использовании описанного выше мультиагентного метода кластеризации, интегрированного с обработкой текста, о которой пойдет речь в следующей главе.

Сначала использовалась система семантической обработки текста для представления смысла документа в виде семантической сети, затем применялся метод мультиагентной кластеризации для классификации документов, в завершение использовался эвристический метод, разработанный для распознавания образов, основанных на группах семантически сходных документов.

Задача была решена в срок, позволив заказчику создать базу знаний документов и существенно повысив эффективность процесса разработки договоров.

При этом заказчик не смог найти ни одного математического метода или средства, который бы решал данную задачу.

## Прогнозирование туристических маршрутов

У агента по туризму была накоплена статистика по своим клиентам, которая содержала личную информацию, архив путешествий (перечень посещенных каждым клиентом стран) и список стран, которые клиенты собираются посетить в своих следующих поездках).

Последний пункт обычно отсутствовал, т.к. не все клиенты делились своими планами при посещении сайта туристического агента. Задача заключалась в оказании помощи

туристическому агенту в прогнозировании будущих направлений маршрутов для своих уже существующих или новых клиентов путем выявления образов из предоставленного пакета данных.

Из имеющейся информации оказалось достаточно легко вычленить правила, которые описывали прогнозируемое поведение клиентов в будущем.

Например: ЕСЛИ возраст = «18-30», а предыдущее путешествие = «Франция», ТО следующее путешествие = «Нидерланды».

Полученный образ подсказывает компании, что от такой группы туристов ожидается бронирование следующих поездок в Нидерланды.

Не менее постоянный образ поездок наблюдался в связи с поездками семей со средним доходом в Египет и т.д.

## Выявление ошибок/мошенничества

Выявление ошибок/мошенничества – процесс определения нарушений или необычных действий в типовом наборе данных.

Другими словами, в таких случаях следовало искать модели ситуаций, которые выбиваются из общей тенденции (ab-normalities).

На самом деле, в любых данных, всегда следует рассматривать необычные случаи, т.к. они могут представлять собой или намеренный обман, или ошибку при вводе данных.

Например, если обычно с большинства транспортных средств в автопарке берут от \$10 до \$25 за парковку, в то время как с 2 грузовых автомобилей поступает запрос на \$200, существует как минимум 2 объяснения этой ситуации.

Либо водитель случайно напечатал еще один ноль, либо это намеренное сокрытие расходов, или же это ошибочная плата за парковку, с которой надо разбираться уже не водителю, а менеджеру гаража.

Наша мультиагентная система помогала выявить все случаи, которые требовали внимания руководства.

Во всех указанных выше примерах работала одна и та же по своему устройству система, адаптируемая к особенностям бизнес-процессов компании заказчика [6-7].

Результаты этой работы показывают, что мультиагентный подход к кластеризации имеет самые большие перспективы для реализации в самых разных областях.

## Список литературы

1. UK Patent Application No. 101516 – Managing a Virtual Environment – authors: G. Rzevski, P. Skobelev.
2. UK Patent Application No. 304995 – Data Mining – authors G. Rzevski, I. Minakov, P. Skobelev.
3. Вольман С. И., Карягин Д. В, Минаков И. А., Скобелев П. О. Разработка системы нахождения бизнес правил с использованием кластеризации на примере данных

логистических компаний // Труды VII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 22 июня-28 июня 2005 года. Самара, 2005. – С.409-413.

4. Виттих В. А., Майоров И. В., Скобелев П. О., Сурнин О. Л. Интеллектуальный анализ данных с помощью кластеризации // Труды VIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 24 июня- 28 июня 2006 года. Самара. 2006. – С.460-466.

5. Минаков И. А., Скобелев П. О. Набор инструментальных средств для интеллектуализации Интернет-порталов и социальных сетей // Труды IX Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 22 - 28 июня 2007 года, Самара. 2007. – С. 528-534.

6. Minakov I., Rzevski G., Skobelev Petr, Volman S. Creating Template Contract Documents Using Multi-Agent Text Understanding and Clustering in Car Insurance Domain. - HoloMAS 2007. Volume 4659 LNAI, 2007, Pages 361-370.

7. Rzevski G., Skobelev P., Minakov I., Volman S. Dynamic Pattern Recognition Using Multi-Agent Technology. - Proceedings of World Science and Engineering Academy and Society Conference (WSEAS 2007) - Dallas, Texas, USA, March 2007.

# Глава 10: Адаптивное понимание семантики текста на естественном языке

## Проблема

Глобальной сетью Интернет, как уже отмечалось в первой главе, в настоящее время пользуются около 3 миллиардов человек, что составляет более 40% от общего числа людей на планете, которые могут оперативно связываться друг с другом, обмениваться деловыми предложениями и просто слухами, делиться фотографиями, продавать и покупать вещи, оказывать услуги, просить друг друга о помощи и т.д.

Всемирная паутина была изобретена Тимом Бернерсом-Ли в 1989 году и стала одним из самых значительных изобретений за всю историю человечества.

Для пользователей сегодня всемирная паутина представляет собой *сеть документов*, которые хранятся на объединенных между собой серверах. В 2008 году в сети Интернет содержалось, по меньшей мере, 63 миллиарда веб-страниц. Корпорация Google недавно заявила, что их поисковая система определяет один триллион уникальных адресов Интернет страниц. Важное значение всемирной паутины заключается в том, что она позволяет напрямую связывать разные типы документов, включая текст, фото и видео, независимо от их местоположения.

Однако, грядущий новый этап в развитии Интернет уже подспудно осуществляется в настоящее время, причем идет полным ходом. Идея нового семантического Интернет состоит в том, чтобы построить *сеть содержимого страниц документов*, хранящихся в Интернете сегодня, в последнее время все чаще называемую *Семантической сетью*, что дало бы возможность программам компьютеров верно интерпретировать смысл как данных, так и текста, а далее осмысленно отвечать на запросы от людей и компьютеров.

По определению, *семантика* – это изучение смысла в коммуникациях, данное слово происходит от греческого *semantikos* - "значительный" или *semaino* - "обозначать, указывать" и *sema* - "символ, знак, отличительный признак". В лингвистике это изучение интерпретации знаков, используемых индивидами или сообществами в конкретных обстоятельствах и контекстах.

Тим Бернерс-Ли так описал свое видение семантической сети: "У меня есть мечта о всемирной паутине, в которой компьютеры будут способны анализировать все данные - содержимое, ссылки и информационный обмен между людьми и компьютерами. "Семантическая сеть", которая бы позволила это осуществить, еще только должна появиться, но когда это произойдет, ежедневные механизмы торговли, бюрократия и вся наша повседневная жизнь будут проходить через компьютеры, общающимися с другими компьютерами. "Интеллектуальные агенты", появление которых люди предвидели в течение нескольких веков, наконец-то, материализуются» [1].

Возможные применения семантической обработки текстов и других данных очень многочисленны и включают в себя следующие:

- письменное общение между людьми и компьютерами;
- письменное общение между компьютерами;
- переводы с иностранных языков;
- семантические поисковые системы;
- смысловая аннотация текстов;
- классификация документов;
- семантическое управление документооборотом.



Несмотря на значительные усилия в научно-исследовательских работах в таких областях, как компьютерная лингвистика, искусственный интеллект и нейронные сети, проблема понимания текста с помощью компьютеров до сих пор не решена.

Причина может скрываться в том, что предложенные в настоящее время решения этой проблемы слишком просты и линейны, чтобы отвечать сложности проблемы.

## Решение

После целого ряда проектов по логистике, связанных с построением сложных самоорганизующихся расписаний, нами было высказано парадоксальное предположение, что проблема понимания текста может быть решена подобным же образом, путем самоорганизации смыслов слов предложения, и далее, любых других фрагментов текста.

Такой подход к семантической обработке текстов можно представить как адаптивный процесс перераспределения форм слов к их значениям, в ходе которого при поступлении новых предложений изменяются связи между словами в предложении [2-3].

Так, если открыть известный на весь мир Оксфордский словарь английского языка для слова *Table*, то в нем можно найти около 17 различных смыслов этого слова: от обеденного стола - до диаграммы в Экселе. Очевидно, что смысл предложения будет определяться контекстом: налить кофе в диаграмму вряд ли представится разумным. Или, предположим мы рассмотрим фразу «У окна сидела девушка, в руках которой была коса». Эта коса - вид женской прически или сельскохозяйственное орудие? Но в любом случае, вряд ли это была песчаная коса, ведь девушка не может держать в руках песчаную косу. Иными словами, можно представить процесс понимания смысла предложения как процесс параллельного и асинхронного связывания значений слов, в ходе которого даже внутри одного предложения связи между словами могут меняться.

Такой процесс соотнесения значений слов очень напоминает самоорганизацию расписаний на основе рассмотренных ранее ПВ-сетей, где сложность обусловлена количеством альтернативных значений смыслов слов, которые могут иметь слова в зависимости от контекста, что особенно остро проявляется для многозначных предложений, которые постепенно уточняются как в детективе или в хорошем романе, когда история главного героя становится ясной читателю на последней странице.

По аналогии с мультиагентной логистикой, в нашем решении программный агент присваивается каждому слову рассматриваемого текста и каждому значению, которые ведут непрерывный матчинг между собой и устанавливают и пересматривают связи.

При этом агенты имеют доступ к базе знаний, играющей роль толкового словаря, о возможных значениях слов, и вступают в переговоры друг с другом до тех пор, пока не будет достигнут консенсус по смыслу каждого слова и каждого предложения.

В ходе работы системы предложенный метод может одновременно выполнять начальный морфологический, синтаксический, семантический и прагматический анализ текста.

В некоторых случаях метод может обнаружить несколько противоречивых значений предложения, тогда конфликт должен разрешаться путем инициированной агентами консультации с пользователем и последующей корректировки базы знаний.

В результате разработок, нами была создана мультиагентная система адаптивного понимания текста, которая нашла свое первое применение для семантической обработки тезисов медицинских статей в области молекулярной генетики.

## Виртуальный мир

Рассмотрим более подробно предложенный метод адаптивного понимания текстов.

Сцена (семантический дескриптор) представляет собой семантическую сеть слов предложения подобно тому, как ранее мы представляли расписание в логистике.

При этом любое изменение связи между двумя агентами, представляющими значение и слово, рассматривается как шаг в процессе самоорганизации.

В этой связи, когда речь идет о понимании текста, любое обновление онтологии предметной области может рассматриваться как шаг в процессе эволюции системы.

Предложенный метод семантической обработки, основанный на работе агентов, состоит из следующих четырех этапов:

1. Морфологический анализ;
2. Синтаксический анализ;
3. Семантический анализ;
4. Прагматический анализ.

Текст поступает на вход системы предложениями, которые по очереди или параллельно обрабатываются системой, слово за словом или также параллельно, при параллельной обработке связи между словами и значениями, уточняются по ходу работы системы.

### Морфологический анализ

1. Агент присваивается каждому слову в предложении.
2. Агенты слов получают соответствующие знания по морфологии из онтологии.
3. Агенты слов выполняют морфологический анализ предложения и определяют характеристики каждого слова, такие как род, число, падеж, время и т.д.
4. Если в ходе морфологического анализа выявляется случай полисемии (многозначности), т.е. слово может играть несколько ролей в предложении (существительное, прилагательное или глагол), ему присваивается несколько агентов, каждый из которых представляет одну из возможных ролей данного слова и может действовать как альтернатива.

### Синтаксический анализ

5. Агенты слов получают соответствующие знания по синтаксису из онтологии.
6. Агенты слов выполняют синтаксический анализ, чтобы определить синтаксическую структуру предложения. Например, подлежащее ищет сказуемое того же рода и числа, а сказуемое ищет подходящее подлежащее и дополнение. Конфликты разрешаются путем переговоров. Грамматически верное предложение описывается посредством синтаксического дескриптора.
7. Если результаты синтаксического анализа неоднозначны, то есть, возможны несколько вариантов синтаксической структуры предложения, каждый из этих вариантов описывается отдельным синтаксическим дескриптором.

### Семантический анализ

8. Агенты слов получают соответствующие знания по семантике из онтологии.
9. Каждая грамматически верная версия предложения подвергается семантическому анализу. Этот анализ направлен на установление семантических связей слов в каждом предложении. Агенты слов получают из онтологии информацию о возможных значениях слов и пытаются исключить неподходящие варианты путем консультаций друг с другом.
10. После того как агенты приходят к единому мнению о грамматически и семантически верном предложении, они создают семантический дескриптор данного предложения, представляющий собой сеть понятий и отношений, содержащихся в предложении.
11. Если решение, которое удовлетворяло бы всех агентов, не может быть найдено, агенты отправляют пользователю сообщение, объясняя противоречия, с которыми они столкнулись, и предлагая возможные выходы из сложившейся ситуации.
12. Каждое новое грамматически и семантически верное предложение, прошедшее через указанные шаги, проверяется на семантическую совместимость с семантическими

дескрипторами предыдущих предложений. В ходе этого процесса агенты могут принять решение об изменении ранее согласованных семантических интерпретаций слов или фраз, выражаемых связями между ними (самоорганизация).

13. Когда все предложения обработаны, создается окончательный семантический дескриптор всего документа, представляющий собой семантическую интерпретацию текста в формате, пригодном для обработки компьютером.

### Прагматический анализ

14. Агенты слов получают соответствующие знания по прагматике из онтологии. Этот этап тесно связан с предметной областью применения системы.

15. Агенты слов принимают решения о необходимости выполнения дополнительных процессов, учитывая свои прикладные задачи. Например, в случае применения системы для бронирования номеров в гостинице, разобранное семантическое представление используется для заказа номера в гостиничной системе.

Как следует из описания метода, ключевую роль в процессе распознавания смысла предложений играет база знаний на основе онтологий.

### База знаний

В разработанной системе база знаний изначально была отделена от программного кода системы, чтобы обеспечить возможность легкого перехода на новые сферы приложений.

Основные объекты онтологии включали понятия «Ген», «Организм», «Эксперимент», «Последовательность» и т.д.

Примеры отношений: Организм содержит Ген, Ген участвует в Эксперименте и т.п.

Базовая онтология для предметной области молекулярной биологии рассматриваемой компании включала всего около 150 понятий и отношений.

Начальная онтология помогла запустить процесс поэтапного расширения знаний о предметной области.

База знаний системы строилась на одной из первых версий конструктора онтологий [4].

### Пример: анализ статей по молекулярной биологии

Когда многочисленные попытки расшифровать геном человека в конце прошлого века достигли своего пика, прогресс в исследованиях был стремительным и конкуренция среди ученых была очень жесткой.

Нашим заказчиком на первую систему стала инновационная компания в США в области молекулярной биологии, работавшая над передовым проектом индивидуальных лекарств, где требовалось выращивать различные организмы, проверяя влияние разных лекарств и условий на гены и хромосомы этих организмов [5].

При этом выращивание таких организмов требует времени и расходов, поэтому в компании было создано специальное подразделение, которое занималось чтением авторефератов статей по молекулярной биологии во всемирно известной платной базе медицинских статей Medline, публикующей более 1 млн. новых статей каждый год.

При этом отобранные рефераты, близкие требуемым экспериментам, использовались для покупки полных версий данных статей, чтобы сэкономить время и деньги на реальных экспериментах.

Работа разработанного метода и созданной системы для выбора наиболее важных и актуальных тезисов проиллюстрирована ниже серией рисунков.

Рисунок 10.1 показывает опубликованные тезисы научной работы, которые должны быть преобразованы в формат, доступный для распознавания компьютером.

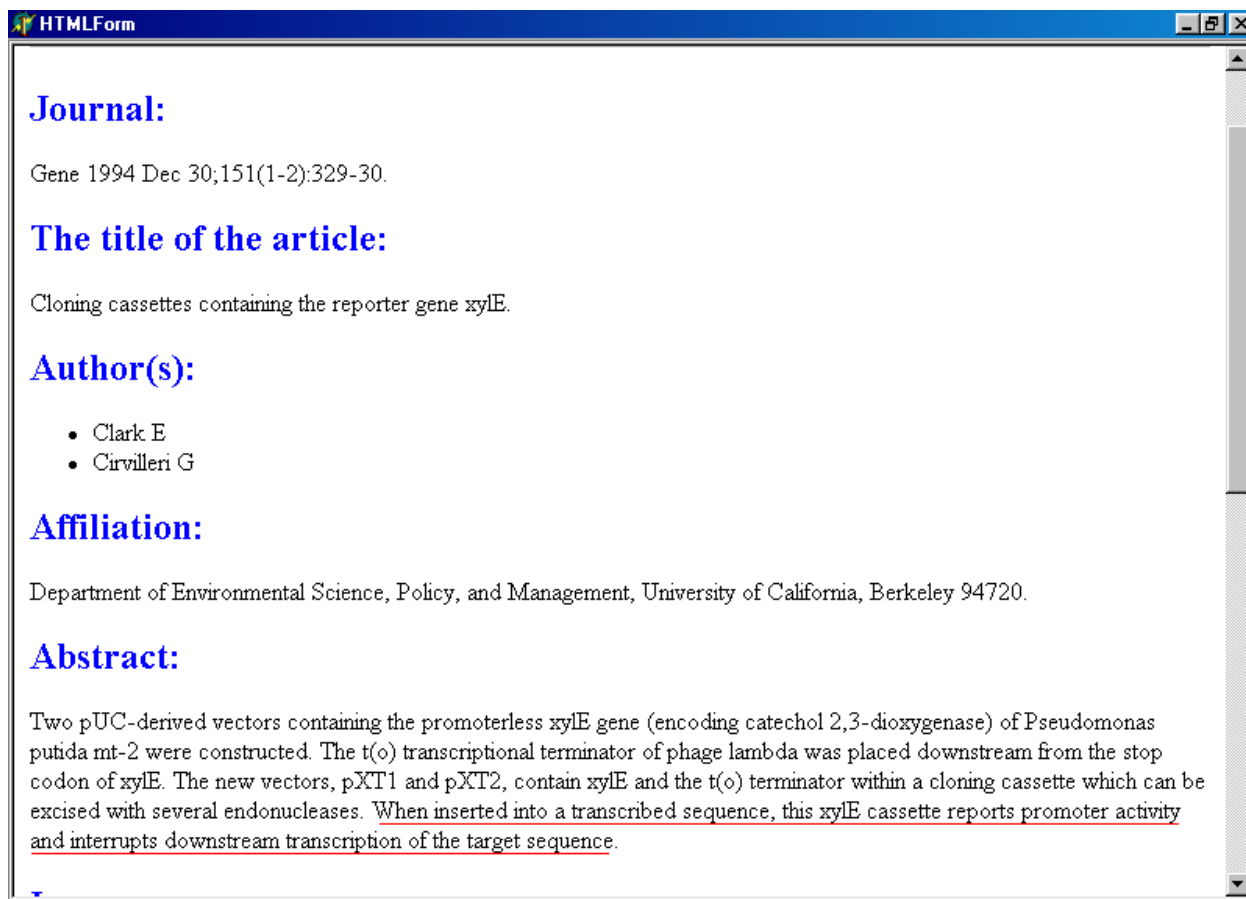


Рисунок 10.1. Автореферат статьи, выбранные для семантической обработки

Построенный в ходе работы системы семантический дескриптор данной научной статьи показан на рисунке 10.2.

Следует обратить внимание, что предложение было полностью понято системой - отношения между геном и его локусом (местоположением), а также его свойства были идентифицированы верно. Их значения приведены в нижней части экрана (в биологии «локус» означает специфическое место конкретного гена или хромосомы; согласно онтологии, «клонированная кассета» является синонимом семантического концепта «локус»).

Рисунок 10.3 показывает, как предварительный семантический дескриптор всего текста подвергается изменениям во время семантического анализа, отражая самоорганизацию смыслов. Синие стрелки показывают связи, которые были добавлены к семантическому дескриптору при анализе последнего предложения текста (подчеркнутое предложение на рисунке 10.1). В результате анализа последнего предложения, система обнаружила несколько новых концептов и новых отношений между существующими узлами дескриптора, в том числе, новое отношение «иметь» между геном и локусом. Более того, ген также получил новое отношение «вставлять», а отношение «иметь» было установлено между локусом и новым узлом «оперон». В биологии «опероном» называется регулируемая единица транскрипции, состоящая из ряда структурных генов, транскрибируемых вместе. Эта единица содержит, по крайней мере, два различных участка: оператор и промотор, поэтому, в соответствии с онтологией и текстом тезисов, семантический дескриптор включает в себя понятие «оперон».

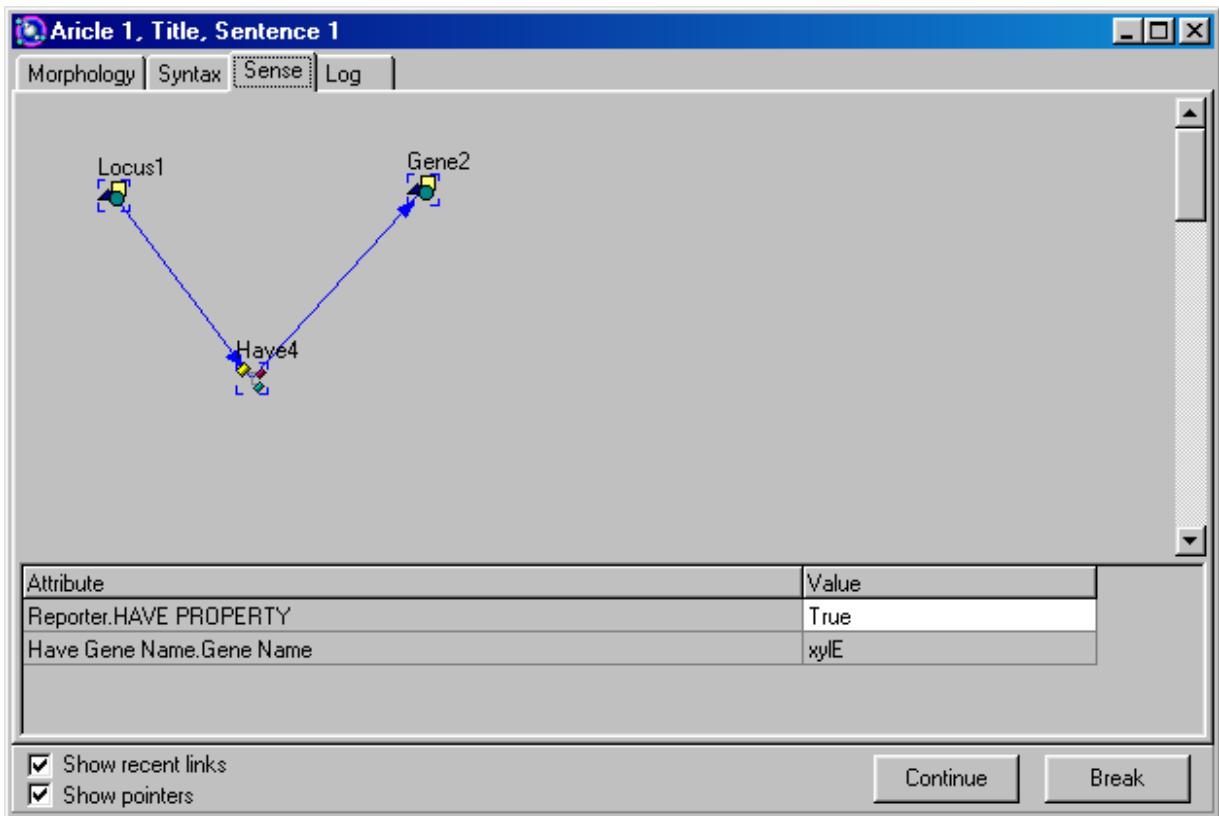


Рисунок 10.2. Семантические дескрипторы статьи

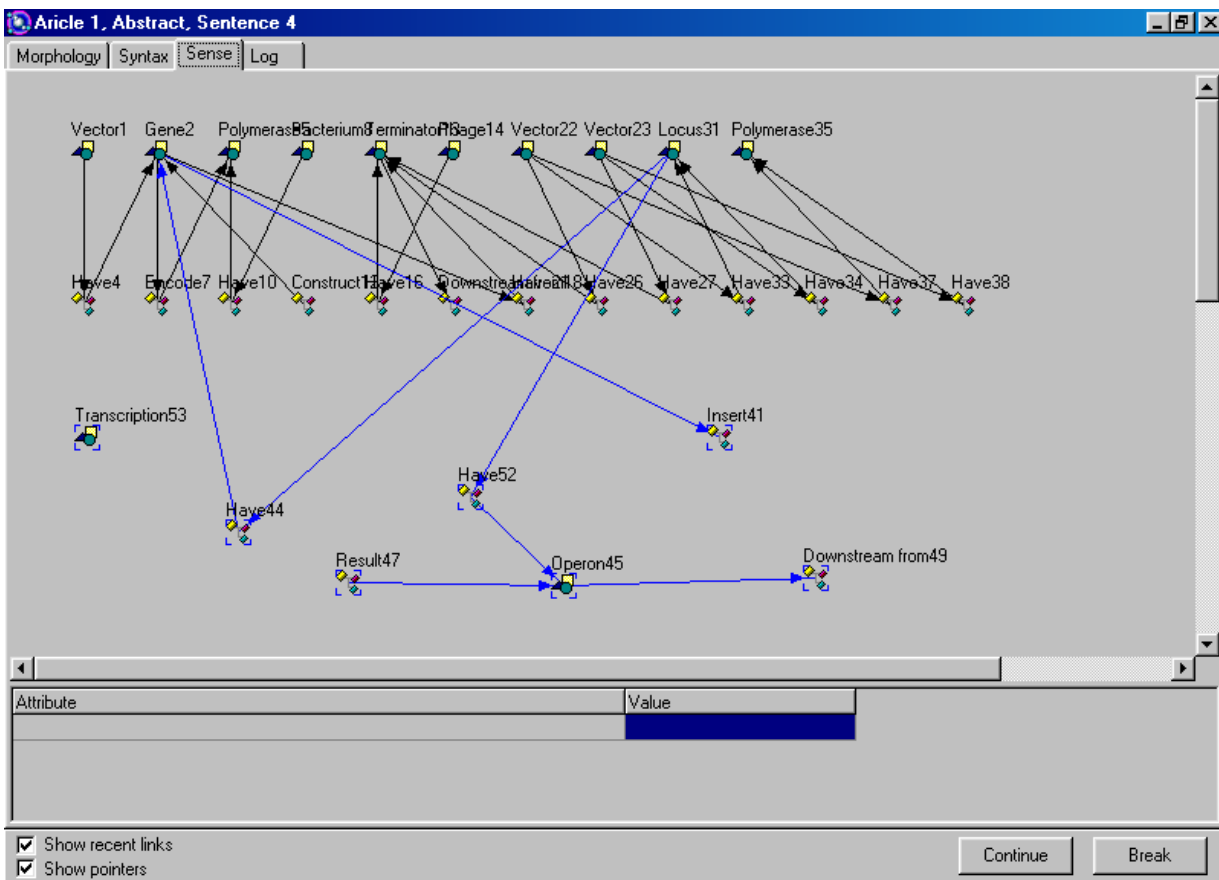


Рисунок 10.3. Пополнение семантического дескриптора статьи

Окончательный семантический дескриптор всего текста реферата приведен на рисунке 10.4.

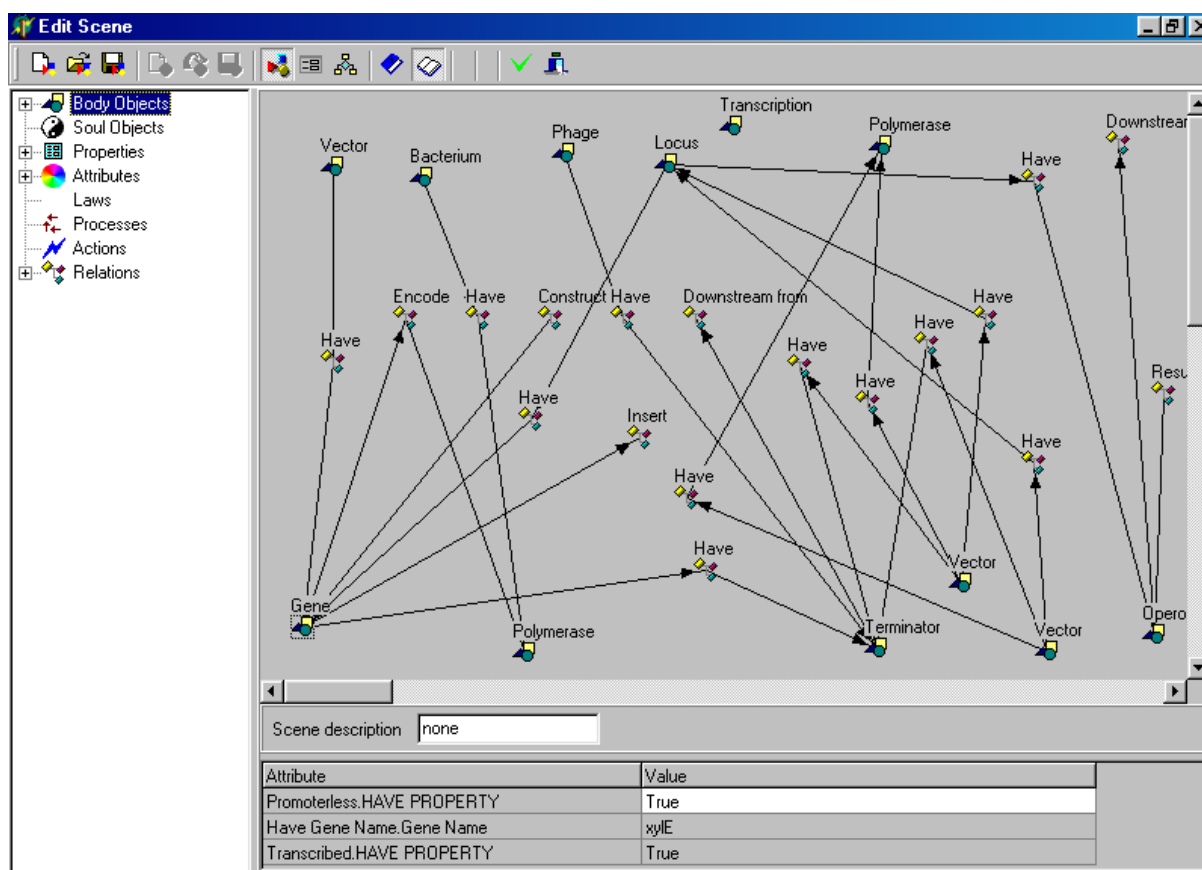


Рис. 10.4. Итоговый семантический дескриптор тезисов

Для выявления наиболее интересующих его статей пользователь должен создать семантический дескриптор запроса, описывающий, например, смысловую модель интересующего его эксперимента, в которой определенный ген подвергается некоторым изменениям и т.д.

На рисунке 10.5 изображен семантический дескриптор запроса для поиска тезисов, в которых организм через отношение "иметь" связан с определенной последовательностью генов.

## Результаты

Первая версия системы была разработана на основе рассмотренной выше платформы в течение 3 месяцев, при этом всего лишь за три дня была построена первая онтология молекулярной биологии, содержащая 150 базовых понятий и отношений.

Эксперименты с разработанной системой показали, что даже в случае определения около 25% слов в исходном тексте, степень правильного попадания составляла примерно 80%, что подтверждалось на специально подготовленных выборках из более 1000 ранее разобранных экспертами авторефератов.

В дальнейшем система применялась для распознавания сообщений факсов, создания новой поисковой системы, анализа текстов контрактов страховых компаний, поддержки рекламных компаний в Интернете и некоторых других приложений, причем в комбинации с кластеризацией дескрипторов [6-11].

На основе этих разработок с привлечением инвестиционных фондов была создана специализированная компания Maxifier (США) для оптимизации рекламных кампаний в сети Интернет, в настоящее время приобретенная крупной международной рекламной корпорацией Сxense [12].

Результаты разработок показывают высокий потенциал предлагаемого подхода для развития семантического Интернета.

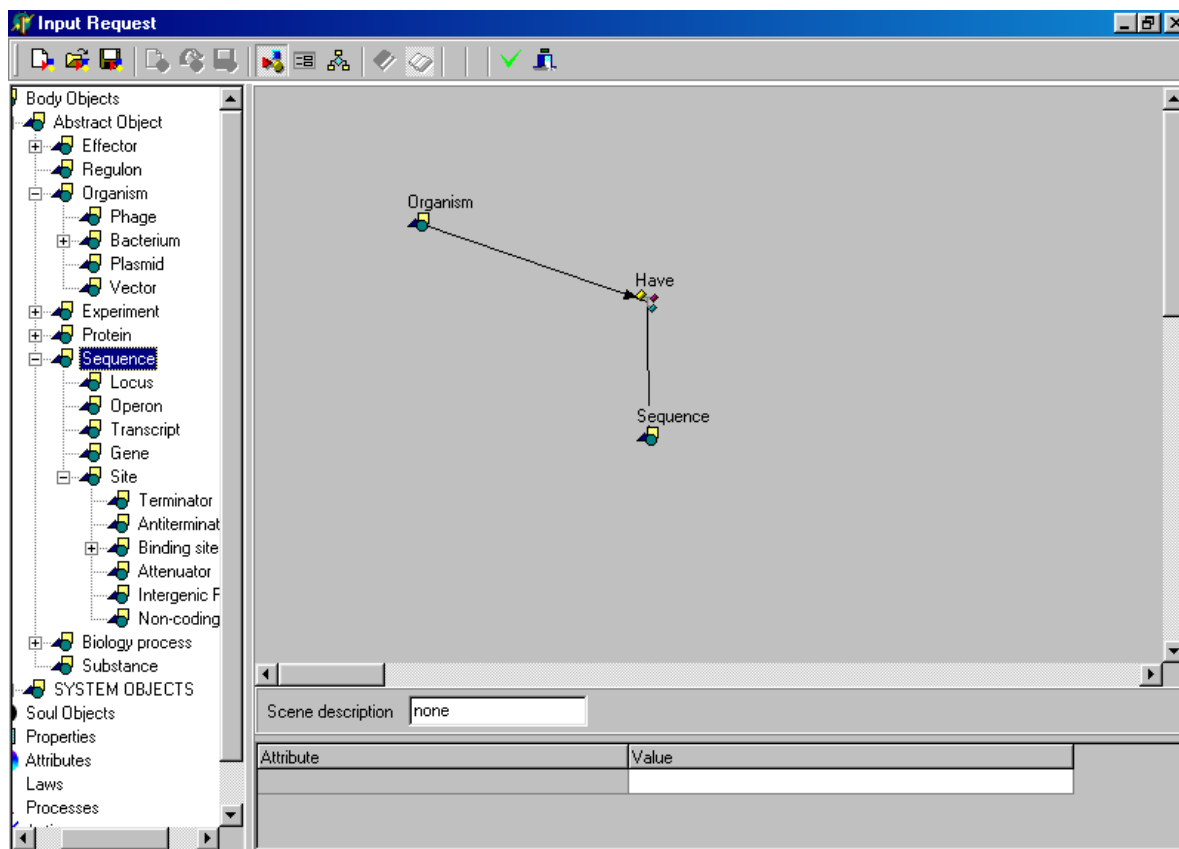


Рисунок 10.5. Запрос на поиск тезисов с конкретным содержанием

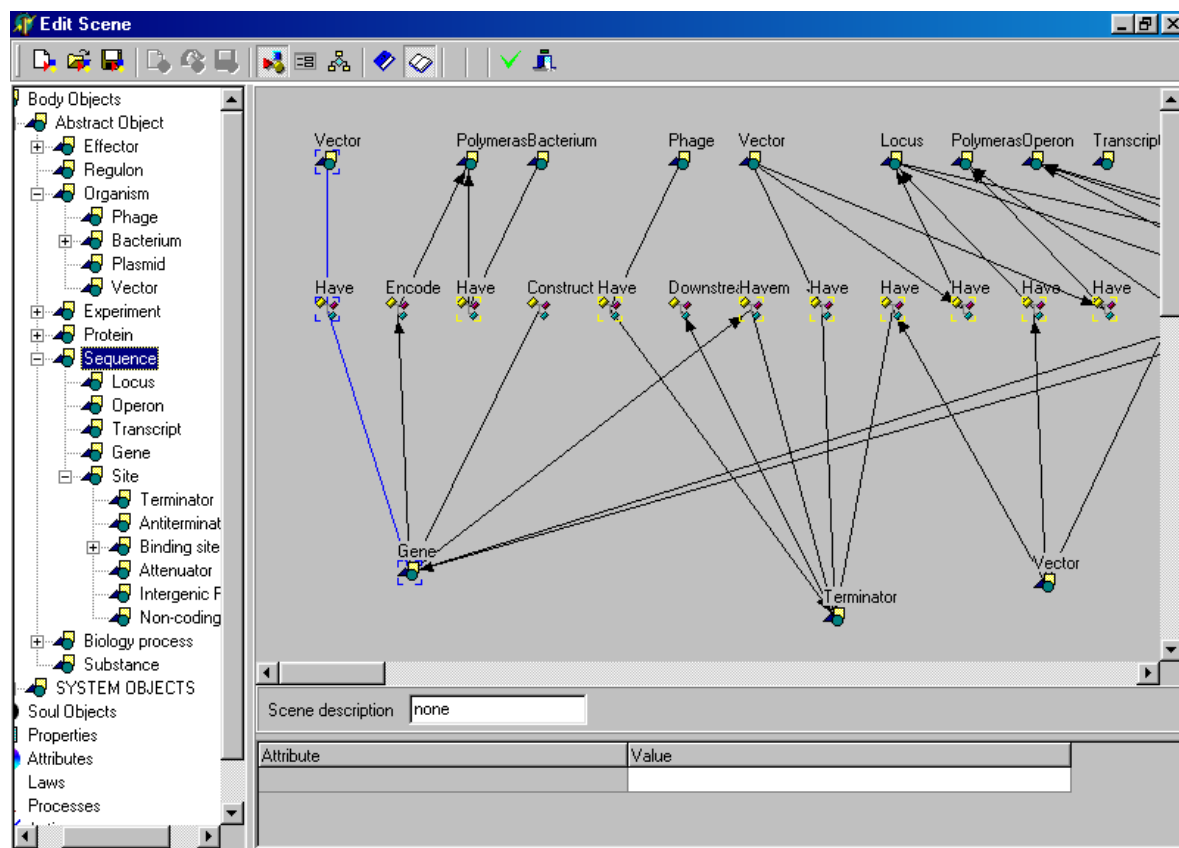


Рисунок 10.6. Сравнение семантических дескрипторов тезисов: подсвечена разница

## Список литературы

1. Tim Berners-Lee, Mark Fischetti, Weaving the Web : The Original Design and Ultimate Destiny of the World Wide Web by its Inventor, Harper San Francisco, 1999
2. Андреев В.В., Ивкушкин К.В., Карягин Д.В., Минаков И.А., Ржевский Г.А., Скобелев П.О., Томин М.С. Разработка мультиагентной системы понимания текста // Труды III Межд. конференции по проблемам управления и моделирования сложных систем, Самара, 4-9 сентября 2001. – Самара: СНЦ РАН, 2001. – С. 489-495.
3. UK Patent Application No. 305634 – Automated Text Analysis – authors: G. Rzevski, I. Minakov, P. Skobelev. GB2412451 (A) — 2005-09-28. WO2005093601 (A2) — 2005-10-06.
4. Андреев В.В., Ивкушкин К.В., Минаков И.А., Ржевский Г.А., Скобелев П.О. Конструктор онтологий мультиагентных систем. // Труды 3-ей Международной конференции по проблемам управления и моделирования сложных систем, Самара, 4-9 сентября 2001. – Самара: СНЦ РАН, 2001. – С. 480-488.
5. Андреев В., Гельфанд М., Ивкушкин К., Казаков А., Новичков П., Томин М., Вольман С., Минаков И., Скобелев П. Мультиагентная система для интеллектуального поиска информации в области современных биотехнологий // Труды IV Международной конференции по проблемам управления и моделирования сложных систем, Самара, 17-24 июня 2002. – Самара: СНЦ РАН, 2002. – С. 338-345.
6. Андреев В., Вольман С., Ивкушкин К., Карягин Д., Минаков И., Пименов А., Скобелев П., Томин М. Разработка мультиагентной системы интеллектуальной обработки и классификации документов. // Труды V Международной конференции по проблемам управления и моделирования в сложных системах, (Самара, 17-21 июня 2003). – Самара: СНЦ РАН. – С. 317-324.
7. 351. Минаков И. А., Скобелев П. О., Томин М. С. Мультиагентная система интеллектуальной обработки факсов, используемых для обмена бизнес-данными. // Труды VIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 24 июня- 28 июня 2006 года. Самара. 2006. – С. 510-515.
8. 364. Kanteev M., Minakov I., Rzevski G., Skobelev P. Multi-Agent Meta-Search Engine Based on Domain Ontology. - International Workshop “Autonomous Intelligent Systems: Agent and Data Mining” (AIS-ADM 2007) - St. Petersburg, Russia, June 3-5, 2007. Volume 4476 LNAI, 2007, P. 269-274.
9. 366. Minakov I., Rzevski G., Skobelev Petr, Volman S. Creating Template Contract Documents Using Multi-Agent Text Understanding and Clustering in Car Insurance Domain. - HoloMAS 2007. Volume 4659 LNAI, 2007, P. 361-370.
10. Вольман С. И., Кантеев М. К., Минаков И. А., Скобелев П. О. Разработка системы проактивных предложений релевантного клиента в режиме реального времени на основе анализа действий пользователя Интернет-порталов // Труды IX Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 22 - 28 июня 2007 года. Самара. 2007. – С.543-548.
11. Rzevski G., Skobelev P., Minakov I., Volman S. Dynamic Pattern Recognition Using Multi-Agent Technology. - Proceedings of World Science and Engineering Academy and Society Conference (WSEAS 2007) - Dallas, Texas, USA, March 2007.
12. Сайт компании MAXIFIER. - <http://www.maxifier.com/>



# ГЛАВА 11: Адаптивное проектирование сложных изделий

## Проблема

Процесс совместного проектирования командами инженеров-конструкторов такого технического изделия как крыло крупного пассажирского самолета – пример очень сложной задачи, в которой согласовываются сотни и тысячи параметров.

В ходе проектирования и расчетов, конструирования и изготовления такого изделия регулярно возникает потребность внесения изменений в его конструкцию.

Проблема заключается в том, что в силу многочисленных зависимостей модификация размеров или расположения даже одного небольшого элемента крыла может привести к череде изменений в соседних с ним элементах, необходимых для обеспечения их совместимости и соответствия заданным характеристикам.

Текущий подход, с которым мы столкнулись на ведущем предприятии авиационной промышленности в Великобритании, предполагал выявление таких конфликтов при проектировании путём ежемесячного пакетного тестирования коллизий на сети высокопроизводительных вычислительных машин. Проверка каждого возможного конфликта для всего крыла занимала около двух недель.

Причина такой высокой трудоемкости заключалась в том, что проверка даже геометрических конфликтов осуществлялась вне зависимости от того, насколько взаимосвязаны элементы, что и приводило к необходимости обработки избыточно большого объема данных.

Задача еще больше усложняется, если анализ конфликтов включает в себя анализ электрических, магнитных, прочностных, тепловых и других свойств материалов.

## Решение

Как и в случаях с логистикой, нами было предложено выполнять анализ конфликтов, возникающих при изменении проектировщиком размещения или размеров элемента конструкции крыла летательного аппарата, не в пакетном режиме, а в режиме реального времени.

При этом собственно проверку конфликтов можно осуществлять на основе концептуальной модели изделия, базирующейся на его онтологии, которая позволяет задавать сетевую структуру изделия, выполнять функцию интеграции разнородных знаний и показывать особенности размещения элементов, необходимые для выполнения проверки и принятия решений.

Это будет означать, что как только инженер принял решение, по концептуальной модели изделия сразу будут найдены соседние элементы, на которые это решение могло повлиять, и тотчас же будут выполнены все необходимые проверки, без какого-либо откладывания этой операции на долгие сроки.

От ближайших элементов можно будет получить информацию о том, какие еще элементы могут быть потенциально затронуты таким изменением, применяя ту же технологию «волны» пересчетов.

Мы решили проблему, за короткий срок разработав пилотную версию такой мультиагентной системы, способной быстро определять связанные элементы конструкции, прилегающие к измененному элементу.

Агенты всех элементов имели возможность делать быстрые «прикидочные» пересчеты и обмениваться результатами, чтобы подсказывать инженерам, в каком направлении следует провести более детальные проверки после любого изменения конструкции.

Созданный прототип был проверен на реальных данных и показал возможность революционного сокращения сроков проектирования.

## База знаний

Онтология крыла включала классы конструктивных элементов крыла, которые были представлены узлами, а их пространственные, функциональные и другие отношения, включая «соседство» по геометрии - связями.

На основе онтологии была построена концептуальная модель конкретного изделия, показывавшая не просто структуру и связи объектов крыла, но и их взаимное геометрическое расположение, типы взаимодействий и т.д.

Фрагмент конструкции крыла на основе онтологии представлен на рисунке 11.1, где выделены только отношения «целое-часть» и «быть рядом».

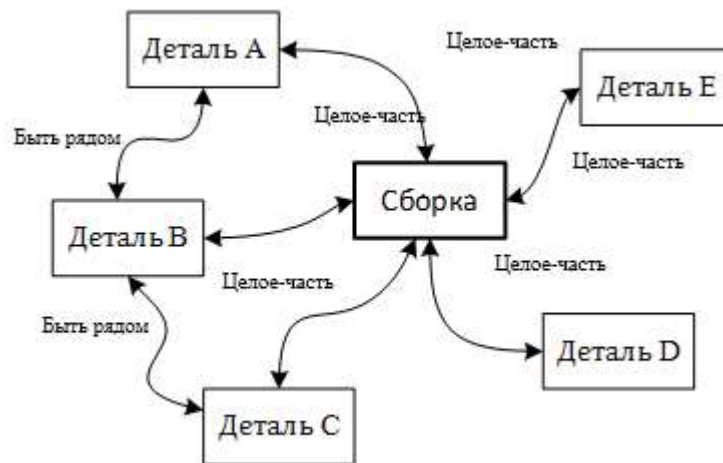


Рисунок 11.1. Фрагмент концептуальной модели крыла воздушного судна

Базовые знания для создания онтологии и модели были взяты из САПР системы предприятия, на основе которой были выделены отношения «рядом» и некоторые другие.

Работа с инженерными пакетами неожиданно показала, что в существующих пакетах крайне мало семантической информации для принятия решений.

В особенности если требуется интегрировать знания об изделии, включая данные по результатам проектирования изделия, расчетов, эксплуатации и т.д.

Эта работа также показала высокую актуальность междисциплинарных баз знаний по физическим эффектам.

## Виртуальный мир

Виртуальный мир разработанной мультиагентной системы включал агентов элементов изделия и агентов инженеров.

Каждый затронутый изменением элемент конструкции активировал своего агента, который сразу же обращался к концептуальной модели изделия, формируемой в сцене.

По концептуальной модели агент измененного элемента мог найти себя и увидеть связи с окружающими элементами.

Агент пересчитывал свои параметры и мог увидеть изменения «до» и «после», а также сообщить о результатах пересчета соседним элементам, параметры конструкции которых входили в конфликт с указанным элементом.

По итогу такого анализа агент измененного элемента решал, кого из агентов-соседей следует «будить» и информировать об изменениях.

Волна таких пересчетов оперативно прокатывалась по сцене во всех направлениях, при этом агенты осуществляли свои оценки параллельно и асинхронно, что позволяло очень быстро получать первые результаты.

Если конструктивное изменение не затрагивало прилегающий элемент, то волна в соответствующем направлении крыла сразу же затухала.

Разработанная система срабатывает при любом изменении в конструкции.

Пусть для примера был изменен размер детали С на рисунке 11.1:

- Система создает либо активирует Агента детали С (например, модуль шасси самолета).
- Агент детали С изучает текущую модель изделия (сцену) как сеть компонентов крыла - и находит близко соседний элемент В (например, важный электрический кабель), который может быть задет изменениями.
- Агент детали С создает или активирует агента детали В и информирует его об изменениях размеров С и его новых очертаниях.
- Агент детали В сравнивает старые и новые размеры и положение детали С, а также, в зависимости от типа их связи, её новые очертания.
- Если изменения, начавшие процесс, не затрагивают деталь В и не создают новых рисков, череда изменений на этом заканчивается.
- Если изменения затрагивают деталь В, её агент выявляет суть конфликта и либо запрашивает у агента пользователя подтверждение изменений, либо самостоятельно изменяет размеры детали В соответственно новым условиям.
- Процедура повторяется для детали А и остальных элементов сцены крыла.

Представленное в онтологии описание отношений между элементами крыла вида «соседний с» и «прилегает к» позволяет проверять только те элементы конструкции изделия, которые могут быть затронуты изменениями.

Изложенный процесс описывает автономную самоадаптацию конструкции крыла» или, другими словами, самоорганизацию конструкции крыла, которая в пределах охватывает всю модель конструкции, подобно разбегающейся волне, запускаемой при внесении инженером или в будущем роботом-проектировщиком любого конструктивного изменения.

Данный принцип в настоящее время применяется для согласованного проектирования моделей микроспутников [1].

## Результаты

Наш прототип доказал возможность значительного снижения затрат на обработку данных по сравнению с имеющимися средствами анализа конфликтов в конструкции сложных изделий.

Разработанная версия системы позволяла провести полный анализ конфликта за несколько минут работы на ноутбуке, тогда как ранее та же задача требовала двух недель работы большого числа мощных вычислительных ресурсов.

Перспективы развития системы связываются с возможностью оценивать электрические, магнитные, прочностные и другие характеристики конструкции крыла.

Полученные очевидные экономические преимущества в управлении изменениями в конструкции основываются на фундаментально новом принципе построения системы, а именно на создании «самоорганизующихся конструкций», которые в будущем позволят начать разрабатывать роботов-конструкторов и сделать труд инженеров куда более творческим и продуктивным.

На наш взгляд, разработанный подход открывает принципиально новые возможности для создания нового интеллектуального поколения систем параллельного проектирования (Concurrent Engineering), постепенно идущего на смену нисходящему и восходящему проектированию [2-4].

Адаптивное управление конструктивными изменениями, разработанное для крыла воздушного судна может быть также применено к проектированию других инженерных систем: автомобилей, спутников и других.

Уже в ближайшем будущем мы наверняка увидим самоорганизующиеся автомобили, способные менять свою конфигурацию и «на лету» приспосабливаться к изменению дорожных условий, особенностям водителя и условиям эксплуатации.

Это направление также должно быть положено в основу промышленного Интернета умных вещей и многих новых приложений.

## Список литературы

1. О.И. Лахин, Е.В. Симонова, П.О. Скобелев. Подход к разработке прототипа интеллектуальной системы поддержки принятия согласованных решений при проектировании малоразмерных космических аппаратов на основе мультиагентных технологий // Информационно-управляющие системы. – 2015. №2(75). – С. 43-48.
2. Баклашов В.И., Комаров В.А., Лахин О.И., Полончук Е.В., Скобелев П.О., Шпилевой В.Ф. Новая концепция создания интеллектуальных систем управления жизненным циклом на принципах сетецентрического управления, онтологий и мультиагентных технологий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 16, №1(5), 2014. – С. 1296-1298.
3. Баклашов В.И., Комаров В.А., Лахин О.И., Полончук Е.В., Скобелев П.О., Шпилевой В.Ф. Новая концепция создания интеллектуальных систем управления жизненным циклом на принципах сетецентрического управления, онтологий и мультиагентных технологий // Сборник докладов IV международной научно-практической конференции «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития», Ульяновск, 16-17 октября 2014 г. – Ульяновск: УлГУ, 2014. – С. 23-27.
4. P. O. Skobelev, O. I. Lakhin, A.S. Polnikov, E. V. Simonova. Approach to the solution of aerospace product lifecycle management problem based on network-centric principles // V. Marik, J.I. Martinez, P. Skobelev (Eds.): Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2015), September 2-4, 2015, Valencia, Spain. .

# Глава 12: Адаптивное планирование сетей поставок

## Проблема

Управление цепочками поставок предполагает согласованное взаимодействие между фабриками и поставщиками материалов для планирования производства, межрегиональными складами и транспортными компаниями для планирования поставок и развозки по магазинам в регионах, поддержания товарных остатков на складах, а также прогнозирование сбыта в магазинах [1].

Один из наших первых проектов по управлению цепочками поставок был связан с задачей поставок различных марок стирального порошка крупной многопрофильной компании с нескольких фабрик на крупные склады и далее поставок по магазинам с учетом изменяющейся потребности в товарах [2]. При этом каждая фабрика старалась сделать как можно более товара, в то время как склады и магазины стремились заказывать только нужные товары, но при этом прогноз и факт потребления далеко не всегда совпадали, что требовало пересмотра планов «на лету», с чем не могла справиться классическая ERP система.

Рассмотрим более подробно такого рода типичные проблемы цепочек поставок на примере компании LEGO, хорошо известной во всем мире своими конструкторами игрушек, которые постоянно обновляются и интегрируются во взаимодополняющие серии [3].

Поставляя свои игрушки в более чем 50 000 магазинов по всему миру LEGO также имеет значительное число собственных фирменных торговых точек LEGO Brand Retail (LBR), которые являются «лицом» бренда компании LEGO для покупателей. Одновременно более 600 наименований товаров обращается в розничной торговой сети LEGO, которая должна обеспечивать покупателям весь самый современный ассортимент товаров на полках и не допускать потери продаж товаров, когда покупатель не видит на полках нужный ему товар. В особенности, если начинается новая рекламная кампания по телевидению – нельзя допустить, чтобы покупатель, придя в магазин, не обнаружил интересующую его активно рекламируемую новинку на полке.

С появлением фирменных магазинов LBR процессами заказа всего ассортимента в торговые точки стали управлять с помощью автоматизированной системы LEGO-System, которая планирует закупку товаров на фабриках компании. Для формирования заказов на следующую неделю отдел управления запасами LBR использует инструмент собственной разработки на основе VisualBasic и таблиц Excel, в который загружаются данные с точек продаж за последние четыре недели, а также уровень запасов и бюджет закупок для каждого магазина. Исходя из этих данных, отдел управления запасами создает заказы по каждому магазину для каждого артикула товара, и эта информация затем загружается в LEGO-System.

Процесс изготовления деталей игрушек LEGO характеризуется очень высокими требованиями по качеству, а важные особенности, добавляющие сложность в этот процесс, связаны с этапом заказа пресс-форм и этапом упаковки, периодичностью доставки, ограничениями размером площадей складов в магазинах и другими факторами, которые влияют на сроки и себестоимость изготовления и поставки готовых игрушек на склады и в магазины.

Так как некоторые игрушки неожиданно оказываются более популярны, чем другие, LEGO-System должна динамически принимать решения о том, как распределить запасы в сети розничных магазинов, включая фирменные магазины LBR. Однако, на деле это происходит по-другому – и команда менеджеров просто решает каждую неделю, например, по вторникам, какие товары надо куда отправлять. Но почему эта команда собирается один в неделю, и почему именно по вторникам? Может быть, если сбыт не меняется и новых решений не требуется – можно и вовсе не собираться, но и, наоборот, если спрос резко усилился и надо быстрее принимать решения по изменению объемов поставки – то надо собираться и каждый день. Кроме того, фирменные магазины LBR не проверяют и не корректируют свои запасы после того, как им были распределены те или иные товары, так как LEGO-System автоматически и не обратимо направляет товары на комплектование, упаковку и отправку. При этом распределение товара во многом определяется той последовательностью, в которой заказы от фирменных заказов LBR поступили в ERP-систему LEGO (SAP-ECC 6.0). И часто случается так, что заказы от "наиболее важных магазинов" обрабатываются в начале недели, а от "менее важных" - позже. В результате порядок, в котором распределяются товары, порождает своего рода «замкнутый круг», в котором успешные магазины всегда будут оставаться более успешными, так как их заказы обрабатываются раньше, в то время как менее успешным торговым точкам товары распределяются позже.

Такая очередь заказов обычно накапливается и не обрабатывается вплоть до выходных, что еще больше усложняет проблему, так как у магазинов, чьи заказы поступили раньше, накапливается и большее расхождение между ранее выработанным прогнозом и фактом продажи товаров. В итоге, с учетом различной емкости складов магазинов, некоторые из них не смогут даже принять отправленные им товары, когда они поступят в магазин.

Решение этой проблемы требует от транспортной компании гибкого изменения плана развозок - хранение товаров на промежуточных складах осуществляется до тех пор, пока торговая точка не будет готова получить их в полном объеме. Однако, коробки с игрушками объединены упаковкой в более крупные объемы - паллеты коробок, которые еще и укладываются на складах так, как удобно сотрудникам склада, а не в соответствии с потребностями магазинов, поэтому менеджеру магазина часто приходится принимать не удобные решения, выбирая целые паллеты однотипных игрушек, из расчета что будут нужнее его магазину в ближайшем будущем, причем часто приходится брать товар с избытком. А другие, возможно более нужные товары, соответственно, вынужденно откладываются на следующий раз. Некоторые магазины при этом распаковывают паллеты на отдельные коробки на ближайшем складе с целью более эффективного выбора и доставки товаров, но подобная дополнительная сортировка требует временных и финансовых затрат, поэтому используется только тогда, когда других вариантов нет.

Такой способ хранения в итоге оказывается слишком дорогостоящим, составляя примерно 12% всех затрат на доставку. Если бы работа склада LEGO была более гибкой, прогноз в магазинах уточнялся бы каждый день и товары отправлялись в магазины также каждый день и именно в том количестве, в котором торговые точки могут их принять, это существенно сократило бы общие логистические расходы компании.

Компания осознала проблему и пришла к выводу, необходим скорейший переход к реальному времени в принятии решений для того, чтобы отвечать уровню ожиданий своих покупателей и повышать эффективность своей сети поставок.

При этом были сформированы следующие требования к новой интеллектуальной системе управления поставками в реальном времени:

- уточнять прогноз продажи товара по каждой позиции в реальном времени, по мере того, как покупатель получает чек в магазине;
- строить план развозок в магазин динамически, по мере того, как магазины продают товары и генерируют сигналы обновления своих прогнозов;
- менять планы поставок на промежуточные склады из фабрик по мере того как накапливаются заказы на развозку от магазинов;
- обеспечить открытость системы, в которую могут добавляться новые склады и магазины по мере развития бизнеса;
- поддерживать сотни и тысячи магазинов, а также тысячи наименований товаров;
- реагировать на ежедневные, еженедельные, ежемесячные и ежегодные колебания спроса, а также учитывать как долгосрочные прогнозы, основанные на субъективных оценках, так и краткосрочные прогнозы на основе статистических данных и плана рекламных кампаний и других событий;
- работать с любым количеством товара, поставляемого со склада в торговые точки, чтобы сводить к минимуму риск потери продаж, повышать уровень обслуживания и увеличивать прибыль;
- своевременно пополнять запасы и оперативно реагировать на любые изменения в сети, чтобы уйти от пакетной обработки информации, которая препятствует управлению бизнесом в реальном времени;
- нужна возможность интерактивно пересматривать и корректировать предлагаемые решения по мере изменения ситуации и др.

Так как в сети магазинов компании не было опыта работы с такими системами реального времени, руководство приняло решение сначала запустить пилотный проект.

Однако, оказалось, что корпоративные системы управления, используемые в LEGO System, основаны на пакетной обработке данных, в которой переход к обработке событий в реальном времени не возможен. При этом проводилась оценка многих вариантов, включая доработку системы SAP Forecasting&Replenishment (F&R) по прогнозированию и пополнению запасов. Но архитектура SAP F&R слишком ориентирована на формирование заказов из предположения, что поставщик имеет «бесконечные» запасы – при этом заказы не пересматриваются даже после того, как становится известно реально доступное количество товара. Кроме того, система SAP F&R не дает возможности интерактивной доработки решений, чтобы пользователь мог увидеть последствия своих действий и скорректировать свои решения и результаты в требуемом направлении.

В результате исследования научной литературы по рассматриваемой проблеме компания вышла на нас с предложением провести исследования и сделать первый прототип мультиагентной системы управления цепочкой поставок в реальном времени, который бы помог экспериментально доказать значимость перехода к реальному времени, используя реальные данные о годовой продаже примерно 600 наименований товаров в 20 наиболее крупных магазинах в городе Чикаго (США).

## Решение

Сложность планирования процессов в цепочках поставок обусловлена, главным образом, неопределенностью спроса и ограничениями пропускной способности производства, каналов транспортировки и складских помещений для хранения товаров. Требуется согласованно спланировать все процессы на относительно длительный период времени, необходимый для выполнения всех этапов для своевременного пополнения запасов проданных товаров, таких как производство, транспортировка, складирование и распределение по магазинам.

Наше решение представляет собой мультиагентную систему адаптивного планирования, предназначенную для уточнения прогнозов спроса и быстрого реагирования в случаях, когда прогноз спроса не оправдывается или, наоборот, появляется дополнительный спрос [4-5].

Основная идея решения заключается в том, что каждое событие инициирует активность соответствующего программного агента, который меняет свой план, при этом действуя согласованно и координированно с другими агентами, которые также начинают менять свои планы. Например, каждый новый факт продажи товара в магазине может вызвать перепланирование поставок с целью поддержания уровня обслуживания или увеличения прибыли (Рисунок 12.1).

При этом осуществляется пошаговый ввод каждого события, который запускает адаптивное прогнозирование и повторяющееся перепланирование.

Например, запланированная поставка может быть изменена вплоть до тех самых пор, когда необходимо отправить подтверждение заказа на склад для того, чтобы запустить операции комплектования, упаковки и последующей отправки.

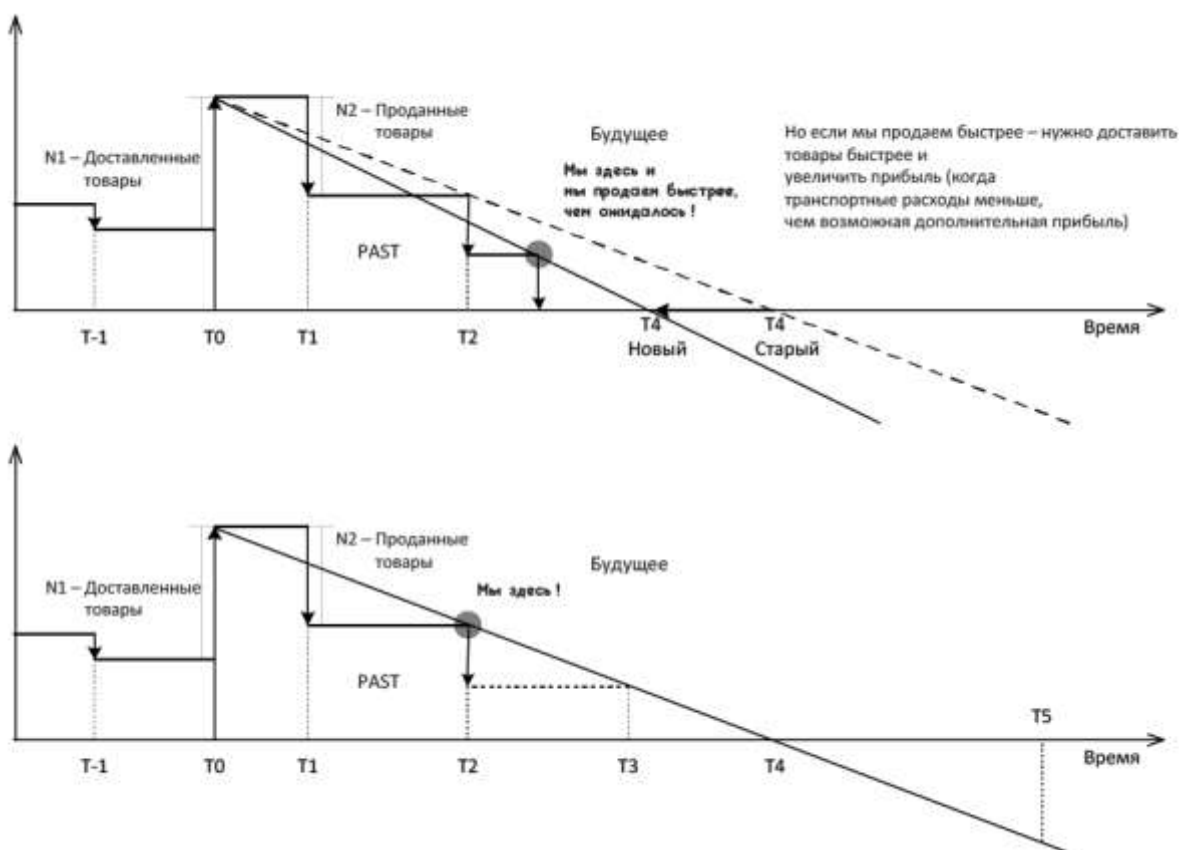


Рисунок 12.1. Пример пересчетов прогноза потребления товара при продаже

При этом события могут инициировать изменения в планах в различных версиях виртуального мира, создаваемых под разные реальные или прогнозируемые ситуации (Рисунок 12.2).





Рисунок 12.2. Иллюстрация последовательного адаптивного перепланирования по мере импортирования событий

Наиболее важные события сигнализируют о том, что запасы товара были завершаются или уже израсходованы, с помощью сигналов и учетных документов из магазинов.

При этом запускается процесс пересмотра прогноза для каждого конкретного товара на основе текущего состояния виртуального мира, содержащего такие атрибуты, как текущий уровень запасов, текущая скорость продаж и другие.

### База Знаний

Онтология данной предметной области описывает классы объектов и отношений, определяющих работу мира цепочек поставок. На основе онтологии в ряде случаев строятся бизнес-правила работы или взаимодействия объектов (Таблица 12.1).

Таблица 12.1. Примеры классов объектов, отношений, атрибутов и правил

Класс объекта	Класс отношения	Класс атрибута	Правила
Заказчик	Доход Товар	Тип заказчика	Платит за товары. Получает возмещение расходов, когда возвращает продукт. Выбирает другой товар, если желаемого товара нет в наличии, или уходит.
Доход магазина	Клиент Товар	Валюта {GBP, USD, EUR, ...}	Создается в момент оплаты товара
Товар	Клиент Полка	Идентификатор товара	Должен быть упакован в коробку

	Заказ магазина Склад готовой продукции Поставка в магазин Транспортировка Заказ распределительного центра Коробка	Цена товара Цена транспортировки Цена хранения Высота Ширина Длина Цена FMC-value Тема Штрихкод	перед транспортировкой.
--	---	---	----------------------------

Фрагмент онтологии цепочки поставок в торговой сети компании LEGO дан на рисунке 12.3.



Рисунок 12.3. Фрагмент онтологии цепочки поставок

Как и в примерах выше, онтология позволяет построить модель ситуации (сцену), складывающейся в торговой сети, и использовать эти данные для перепланирования поставок.

## Виртуальный Мир

Начальная ситуация в реальной сети поставок задается начальной сценой, позволяющей запустить систему в работу.

Вся обработка начальной сцены и каждого отдельного события выполняется сообществом агентов Виртуального Мира (ВМ). Каждое событие, представляющее собой набор изменений, произошедших в реальном мире, вызывает действия агентов, направленные на перестройку расписания.

В результате система реагирует адаптивно и в режиме реального времени, при этом поддерживая достижение ключевых показателей эффективности (КПЭ) компании.

Виртуальный Мир состоит из нескольких типов агентов:

- Агент потребности в товаре.
- Агент поставки товаров.
- Агент склада (запасов).
- Агент товара.
- Агент транспортировки.

Агент потребности товара представляет прогноз в ПВ-сети и отвечает за возможность потребления конкретного продукта в определенный момент времени. Он может отражать как прогнозное потребление, так и фактическое потребление, имевшее место ранее. Потребительский спрос полностью удовлетворяется, если для него есть достаточное количество запасов товара в назначенное время потребления. Если запасов недостаточно, то Агент потребности ведет переговоры с Агентами склада (запасов) для того, чтобы большее количество товара было доставлено в требуемое место к нужному моменту времени.

Агент запасов отвечает за наличие товара в пункте назначения - и потому ведет переговоры с Агентом транспортировки и Агентом товара для того, чтобы получить информацию об ограничениях и стоимости доставки для конкретного объема продукции. Агенты поставок выставляют счета Агентам потребности за запросы на поставку товаров и за изменения времени доставки. Агенты запасов планируют также дополнительные объемы запасов и выставляют счета за хранение наименований продукции. Если уровень запасов неожиданно меняется против прогноза, Агент запасов просит Агента товара пересмотреть прогноз спроса.

Агент товара знает специфику товара и меняет прогнозное потребление, если меняется ситуация (например, если товар продается быстрее), а также договаривается о транспортировке и хранении товара. Агент склада контролирует ограничения конкретного места (площади хранения, возможности поставки) и имеет информацию о стоимости хранения, а также договаривается с товаром о хранении на определенной площади.

Агент Транспортировки знает ограничения конкретного канала транспортировки (количество паллет) и стоимости доставки в различное время недели, а также ведет состояние каждого канала доставки.

Предлагаемое решение поддерживает следующий список событий:

- Изменение прогноза потребления.
- Неожиданная продажа.
- Отсутствие ожидаемого потребления.
- Изменение количества потребления.
- Неожиданное изменение уровня запасов.
- Пополнение запасов и другие.

Любое событие может запустить волну переговоров внутри Виртуального Мира. Длина этой волны зависит от ситуации в плане и может привести в худшем случае к полному перепланированию расписания поставок, но это не часто случается.

Фрагменты протоколов переговоров между агентами представлены на рисунке 12.4.

Обработка событий может повлиять на следующие параметры: время доставки; соотношение показателей потребления и пополнения запасов; объединение товаров внутри поставок; объем потребления; объем поставок; стоимость хранения и транспортировки продукции; и / или прибыль компании.

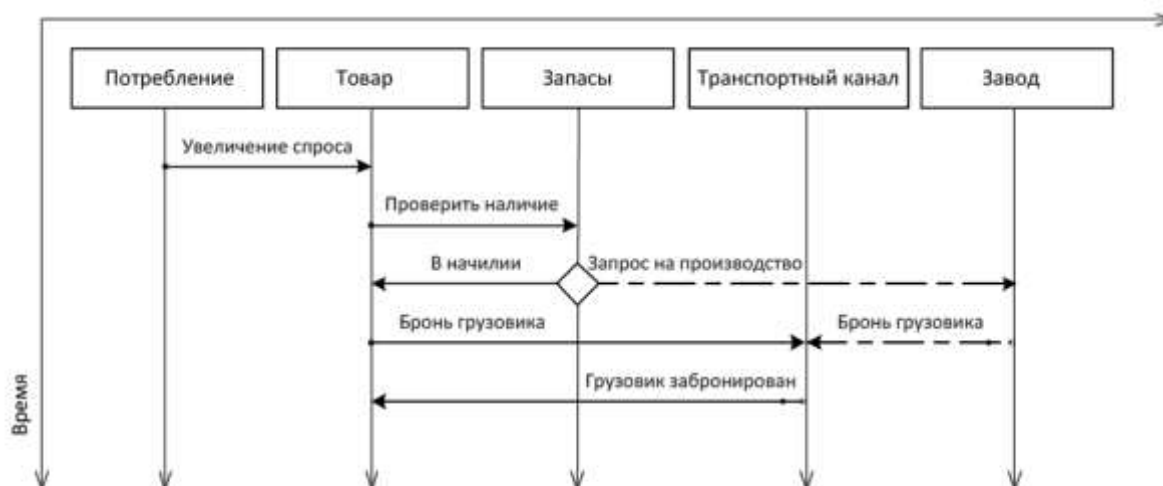


Рисунок 12.4. Основные протоколы переговоров агентов

Планирование цепочек поставок осуществляется путем переговоров: например, Агент потребности в товаре ведет переговоры с Агентом поставки товара о том, как добиться того, чтобы в конкретной торговой точке всегда имелся определенный запас данного товара, но при этом не было его излишков; Агент поставки товара, в свою очередь, ведет переговоры с Агентами склада и Агентами Транспортировки о том, как доставить товары в торговую точку и из какого склада взять товар, минимизируя при этом издержки и соблюдая временные сроки.

Важно отметить, что все агенты имеют возможности на этапе проактивности улучшить свои состояния, например, Агент транспортировки на этом этапе имеет возможность оценить свое состояние и дать встречное предложение магазинам, которые могут быть в зоне доставки, что возможно, изменит их планы, поскольку новое предложение может оказаться лучше прежнего – в результате происходит постоянная самоорганизация расписания.

### Соединение реального и виртуального мира

Для решения задачи была создана среда для моделирования процессов принятия решений при управлении цепочками товаров.

Данные загружаются в виртуальный мир в конце каждого рабочего дня в виде подробных отчетов с точек продаж (местоположение, проданный товар, количество и т.д.).

Результаты моделирования и расчетов представляются команде менеджеров и логистов для согласования решений и их воплощения в реальной жизни.

В экспериментах сопоставлялись также решения, выработанные системой, и решения команды менеджеров без использования системы.

### Интерфейс пользователя

Примеры экранов интерфейса пользователя системы, выполненные в веб-интерфейсе, представлены на рисунках 12.5-12.7.

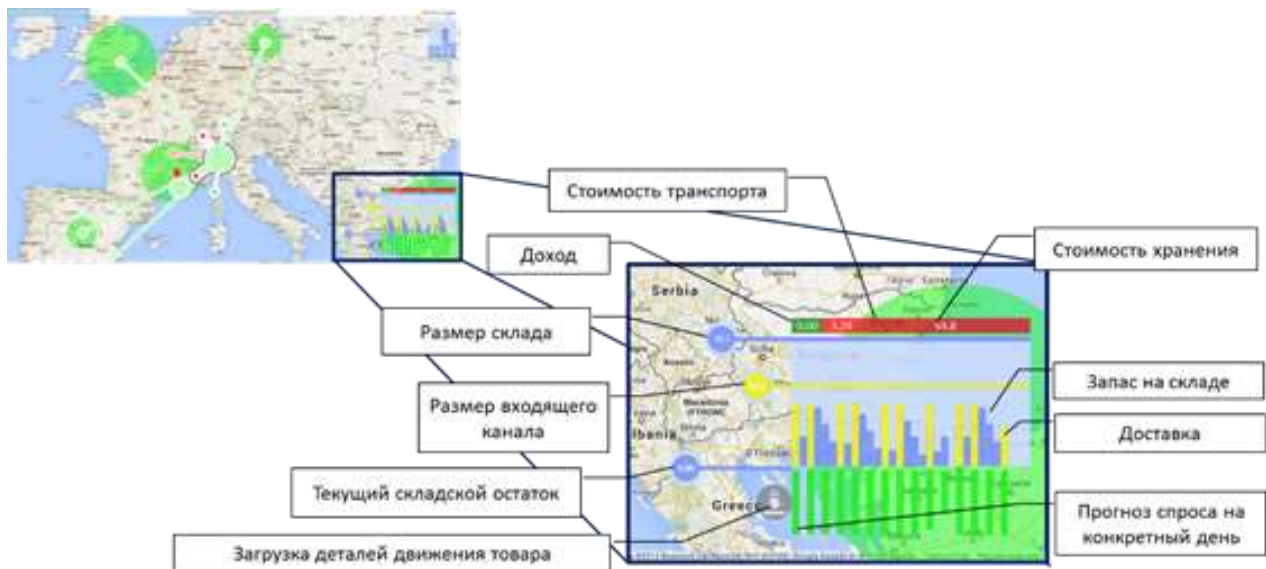


Рисунок 12.5. Основной экран конструктора сети цепочек поставок

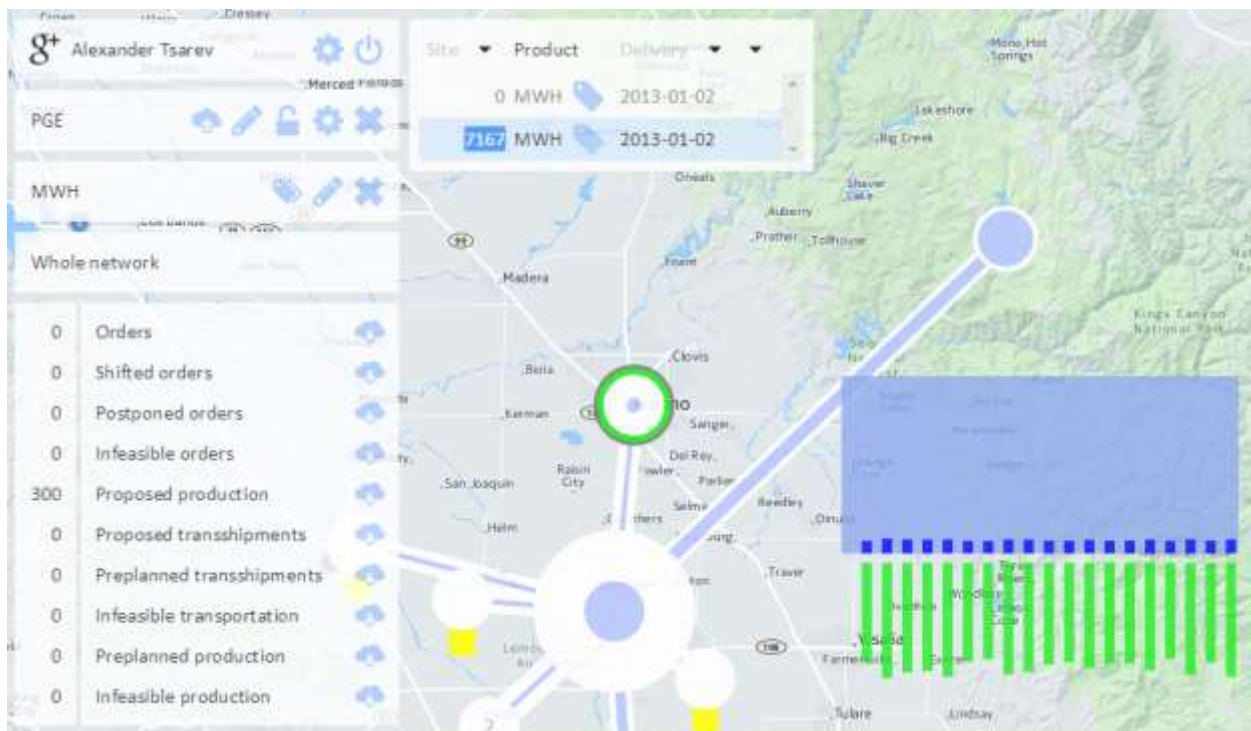


Рисунок 12.6. Задание прогноза потребления товаров в магазинах

В моделирующей системе пользователь может в интерактивном режиме конструировать свою собственную сеть поставок, определяя места фабрик, складов и магазинов, а также связывая их каналами транспортировки.

Для магазинов созданной сети можно задавать прогноз потребления по любым группам товаров и далее наблюдать, как строятся согласованные планы фабрик, транспортных каналов и складов, а также как происходит их корректировка по событиям в режиме реального времени.



### 3. Прогнозирование на основе тренда (текущая практика).

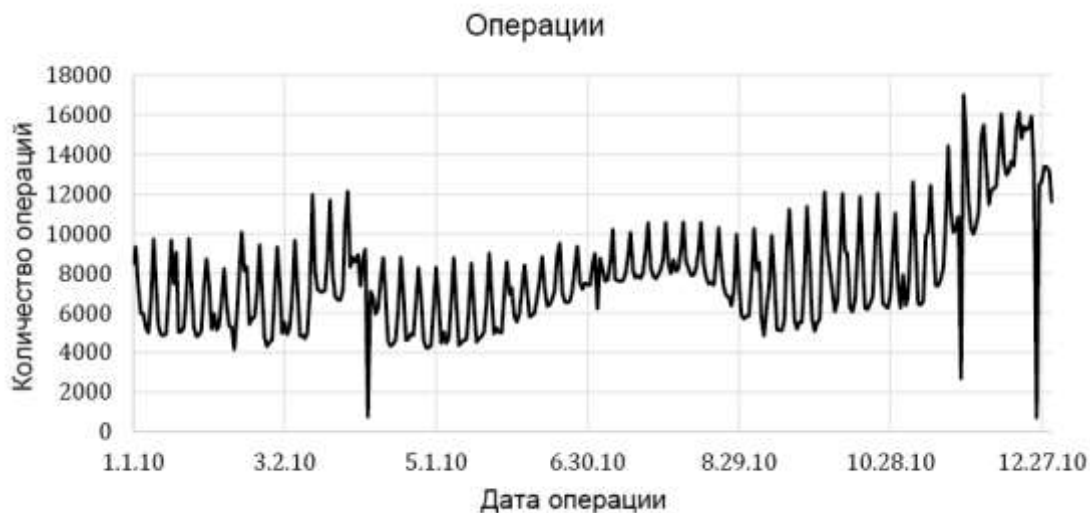


Рисунок 12.8. Пример реальных данных о продажах в магазинах

Результаты экспериментов представлены в Таблице 12.2 ниже.

Таблица 12.2. Результаты адаптивного планирования на годовой выборке данных магазинов

Сценарий	Прибыль	Уровень обслуживания	Упущенный доход	Цена	Номер строки
Теоретический идеал	100%	100%	0%	100%	1
(A1) Планирование в режиме реального времени и гибкие бизнес-процессы + идеальное прогнозирование	88%	90%	10%	102%	2
(A2) Планирование в режиме реального времени и гибкие бизнес-процессы + стохастическое прогнозирование	81%	86%	16%	105%	3
(A3) Планирование в режиме реального времени и гибкие бизнес-процессы + прогнозирование на основе тренда	76%	86%	20%	105%	4
(B1) Планирование в режиме реального времени и фиксированные бизнес-процессы + идеальное прогнозирование	82%	83%	17%	96%	5

(B2) Планирование в режиме реального времени и фиксированные бизнес-процессы + стохастическое прогнозирование	76%	79%	22%	96%	6
(B3) Планирование в режиме реального времени и фиксированные бизнес-процессы + прогнозирование на основе тренда	61%	71%	35%	96%	7
(C1) Фиксированная схема планирования и жесткие бизнес-процессы + идеальное прогнозирование	81%	82%	17%	96%	8
(C2) Фиксированная схема планирования и жесткие бизнес-процессы + стохастическое прогнозирование	66%	69%	31%	95%	9
(C3) Фиксированная схема планирования и жесткие бизнес-процессы + прогнозирование на основе тренда	56%	66%	40%	95%	10

Следует сопоставлять десятую строку (самая нижняя), показывающую текущую практику, с другими строками для оценки возможного выигрыша от адаптивности и гибкости в связи с переходом к реальному времени, например, третья строка отражает достижимое состояние с учетом гибкого бизнес-процесса и адаптивного планирования в режиме реального времени.

В результате, используя разработанные мультиагентные решения для двадцати выбранных точек продаж за один год пробного периода, компания LEGO получила следующие результаты:

- Снижение количества упущенных продаж с 40% до 16%;
- Повышение уровня обслуживания с 66% до 86%;
- Повышение рентабельности с 56% до 81%.

Полученные результаты превзошли ожидаемые и помогли дать первую оценку ценности мультиагентной системы для всей цепи поставок LEGO.

Результаты первого этапа разработок с использованием мультиагентных технологий показали важные преимущества для управления цепочками поставок, включая открытость к новым событиям, высокую гибкость и адаптивность, производительность и надежность [7-8].

Вывод о возможном существенном повышении эффективности цепочек поставок при переходе к планированию в реальном времени был также подтвержден при создании мультиагентной системы управления цепочками поставок стирального порошка [2].



В настоящее время проведенные разработки используются для создания промышленной версии мультиагентной системы управления цепочками поставок прохладительных напитков крупной международной компании в Германии.

## Список литературы

1. Andreev M., Rzevski G., Ivashchenko A., Skobelev P., Shveykin P., Tsarev A. Adaptive Planning for Supply Chain Networks - Proceedings of 4-th International Conference on Holonic Approach and Multi Agent Systems. Germany, June 2007. – Volume 4659 LNAI, 2007, Pages 215-224.
2. Батищев С. В., Орлов А. Ю., Скобелев П. О. Метод push-pull взаимодействия при составлении и адаптации краткосрочного плана производства в условиях высокой динамики спроса // Труды VII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 27 июня - 01 июля 2005 года. Самара. 2005. – С. 397-402.
3. Bjorn Madsen, George Rzevski, Petr Skobelev, Alexander Tsarev. Real-time Multi-Agent Forecasting & Replenishment Solution for LEGO's Branded Retail Outlets. – Proceedings of the 13th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD 2012), August 8-10, 2012, Kyoto, Japan. – pp. 451-456.
4. Скобелев, П.О. Мультиагентная система моделирования цепочек поставок в реальном времени / П.О. Скобелев, А.В. Царев, И.В. Майоров // Материалы 6-й мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2013, 30 сентября-5 октября 2013 г., с. Дивноморское, Геленджик, Россия. Т.1. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. – с. 156-160..
5. В. Madsen, А.В. Царев, И.В. Майоров, Д.С. Очков. Мультиагентная система управления цепочками поставок // Труды XVI Международной конференции “Проблемы управления и моделирования в сложных системах”, Самара, 30 июня-03 июля 2014г. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 129-142.
6. Bjorn Madsen, George Rzevski, Petr Skobelev, Alexander Tsarev. A Strategy for Managing Complexity of the Global Market and Prototype Real-time Scheduler for LEGO Supply Chain // International Journal of Software Innovation, 2013. – Vol.1, Issue 2. – P. 28-39. – DOI: 10.4018/ijsi.2013040103.
7. Alexander Tsarev, Dmitry Ochkov, Petr Skobelev. Effective interaction in asynchronous multi-agent environment for supply scheduling in real-time // Proceedings of the Eleventh International Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS 2015), May 24 - 29, 2015 - Rome, Italy. 2015 (in publishing).
8. George Rzevski, Bjorn Madsen, П.О. Скобелев, А.В. Царев. Управление цепочками поставок с использованием мультиагентных технологий // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015 (в печати).

# Глава 13: Адаптивное построение программы полета, планирование грузопотока и расчета ресурсов Российского сегмента Международной Космической Станции

## Проблема

Международная Космическая Станция (МКС) - это один из сложнейших проектов за всю историю человечества, в реализации которого участвуют большие коллективы ученых и инженеров из России, США и ряда других стран [1].

Одна из важнейших задач жизнеобеспечения работы МКС – это управление грузопотоком по доставке важнейших грузов на станцию, таких как воздух и вода, топливо, продукты питания и оборудование для научных экспериментов, а также возврата результатов экспериментов и других грузов обратно на Землю.

Для планирования грузопотока требуется учитывать множество разных по своей природе факторов, критериев принятия решений, ограничений и предпочтений, включая состояние склада и ресурсы приборов на станции, изменяющиеся потребности в топливе, воде и продовольствии, особенности баллистики в движении станции и солнечную активность, типы кораблей и стыковочных модулей и другие [2-4].

Характеристики сложности задачи:

- к станции ежегодно стыкуются свыше десятка грузовых и пилотируемых кораблей различных типов;
- главным приоритетом является безопасность жизнедеятельности экипажа космического корабля;
- в первую очередь необходимо своевременно обеспечивать экипаж (состав которого регулярно меняется) запасами воздуха и воды, продовольствия и топлива и др.;
- при этом также важно вовремя доставлять на космическую станцию лабораторное оборудование, различные материалы и инструменты для осуществления полезной деятельности космонавтов;
- для планирования грузопотока требуется учитывать особенности полетов кораблей, времен старта, стыковок и отстыковок и сотни других параметров;
- доставляемые грузы исчисляются тысячами наименований и десятками тысяч отдельных единиц продуктов и материалов;
- требуется постоянно отслеживать положение и статус имеющихся на борту ресурсов (запасов);
- в случае аварий и задержек старта кораблей требуется перепланирование с учетом пропущенного цикла доставки;
- требуется отслеживать грузы с истекающим сроком годности для их утилизации и высвобождения пространства под размещение грузов очередной поставки;
- планы доставки грузов должны быть согласованы с программой научных экспериментов на борту станции;

- обслуживание МКС осуществляется в условиях жестких ограничений пространства, веса и времени и т.д.

Особенности процесса планирования:

- планируется работа Российского сегмента МКС (РС МКС), но необходимо учитывать планы еще трех других космических агентств из разных стран;
- имеются как стратегические планы на несколько лет, так и годовые и полугодовые тактические планы – вплоть до оперативных посуточных планов;
- процессом планирования РС МКС управляет 8 главных диспетчеров (проектантов) и до 150 поставщиков (кураторов) грузов;
- часто обнаруживаются конфликты между грузами различных приоритетов и т.д.

При этом любое важное событие, например, изменение дат запусков, стыковок или отстыковок кораблей, потеря грузового корабля, изменение состава экипажа или внеплановые работы на борту станции, ведет к цепочке перепланирования многих других связанных работ, ресурсы для которых должны быть пересчитаны.

В частности, появление космического мусора на орбите (к примеру, из-за внезапного отказа запущенного спутника и т.д.), вызывает необходимость в маневре станции и корректировке ее орбиты, что требует включения двигателей и затрат топлива, что в свою очередь приводит к необходимости в следующий старт привезти на станцию больше топлива, для чего надо какие-то грузы перепланировать на следующий полет и т.д.

Грузоподъемность космических кораблей ограничена, поэтому, если неожиданно возникает потребность в дополнительном грузе, то объемы топлива или воды, а также объемы и массы других грузов приходится уменьшать, согласованно меняя планы отправки грузов на последующих кораблях.

Работа по планированию грузопотока МКС до недавнего времени выполнялась вручную проектантами и кураторами грузов, которым для получения рабочего плана приходилось вместе производить много итераций и постоянно взаимодействовать для выработки и согласования компромиссных решений.

Основная сложность планирования заключается во взаимозависимости всех этих планов и принимаемых решений, что требует смыслового согласования и точной координации действий с учетом всех перечисленных факторов.

## Решение

Для повышения эффективности управления грузопотоком Международной Космической Станции была разработана сетевая мультиагентная система (Рисунок 13.1), которая представляет собой адаптивную сеть из следующих адаптивных мультиагентных планировщиков [5-7]:

- мультиагентный планировщик для разработки программы полетов;
- мультиагентный планировщик грузопотока;
- мультиагентный планировщик поставок топлива и воды;
- мультиагентный планировщик возврата грузов и их утилизации.

На основе разработанной системы, получившей краткое название МАС «Грузопоток», процесс планирования программы полетов, формирования грузопотока и расчетов ресурсов

для МКС строится в несколько взаимосвязанных этапов с различными горизонтами планирования.



Рисунок 13.1. Архитектура MAC по управлению грузопотоком МКС

На первом этапе создается стратегическая модель грузопотока, которая помогает рассчитывать количество необходимых транспортных полетов в год на основе количества ожидаемых экспедиций и их ожидаемого численного состава. На этом этапе необходимо достичь соглашения между всеми заинтересованными сторонами по количеству и времени стыковок и расстыковок космических кораблей с модулями МКС, принимая во внимание сроки возможных пусков космических кораблей, солнечную активность, конфигурацию и ожидаемое расположение МКС, требования космического экипажа и т.д. На данном этапе разрабатываются и изучаются несколько версий программы полетов, прежде чем окончательный план будет принят руководством предприятия и программой космических исследований.

Далее начинается интерактивная разработка программы грузопотока, изначально предполагающая многочисленные итерации для согласования конфликтных интересов проектантов и кураторов. На этом этапе объемы грузов распределяются между грузовыми космическими полетами и пилотируемыми полетами на основании данных о среднем дневном потреблении ресурсов экипажем и системами станции. Информация о количестве космонавтов и о датах запусков и стыковок берется из утвержденной программы полетов. Поставки топлива рассчитываются на основе данных о планируемых баллистических корректировках положения МКС и о ее текущем состоянии, что также важно для расчетов стыковки и планирования внешекорабельной деятельности для проведения космических экспериментов и ряда других космических операций.

Далее план грузопотока используется, чтобы выстроить план утилизации и возврата грузов с МКС на Землю, как через грузовые затопливаемые в мировом океане корабли, так и пилотируемые корабли, возвращающие на Землю результаты экспериментов и т.п.

В ходе планирования вырабатываются следующие виды планов:

- программа полетов (ПП), представляющая собой график стыковок космических кораблей к модулям (отсекам) МКС, учитывающий различные ограничения, такие как минимальный период времени между операциями стыковки и расстыковки; необходимость постоянного наличия по меньшей мере одного пилотируемого корабля, пристыкованного к станции, а также различные предпочтения для стыковки различных типов судов;
- стратегический (укрупненный) план грузопотока (СП), рассчитываемый на основе программы полетов и общего знания о потреблении с учетом необходимых технологических операций, численности космонавтов на борту станции и т.д.;
- тактический план грузопотока (ТП), который указывает конкретные даты и объемы грузов для поставок воды, топлива и продовольствия, систем, блоков и материалов для грузовых рейсов и пилотируемых космических кораблей, основанный на программе полетов.
- планы утилизации и возврата грузов на Землю (ПУ и ПВ), рассчитанные с учетом наличия свободного места на МКС и даты отстыковки и возврата кораблей.

При необходимости в дальнейшем могут быть разработаны дополнительные планировщики, которые легко подключаются в указанную сеть, например, планировщик времени труда и отдыха космонавтов.

Интеграция с системой управления запасами на МКС позволяет обновлять расписания в соответствии с фактическими данными в ежедневном режиме и инициировать перепланирование в реальном времени.

## База Знаний

Важные знания предметной области управления грузопотоком МКС в ходе проекта были собраны и формализованы в онтологии и фактических базах данных заказчика [8-10], которые по сути представляют собой Базу Знаний планирования (Рисунок 13.2).

Классы объектов предметной области, представленные в онтологии, включают в себя: МКС, Модуль МКС, Полет, Порт, Космический Корабль, Экипаж, Груз, Топливо, Программа Полетов, Ресурс, Грузовой Отсек, Стыковочный Отсек, Служебный Модуль, Исследовательский Модуль, Прогресс-М, Союз и т.д.

Классы основных объектов были связаны отношениями внутри семантической сети, включая «Состоит из» (модуль из подсистем), «Может пристыковаться к» (корабль к модулю или отсеку), «Является» классом (род-вид) и другие.

Онтология может быть изменена пользователями с помощью простого пользовательского интерфейса, который позволяет редактировать онтологию без отключения системы. Например, пользователи могут задать новые типы космических кораблей и указать, к каким портам они могут быть пристыкованы, а также указать новые типы портов / модулей, ввести новые виды грузов и операций и т.д.

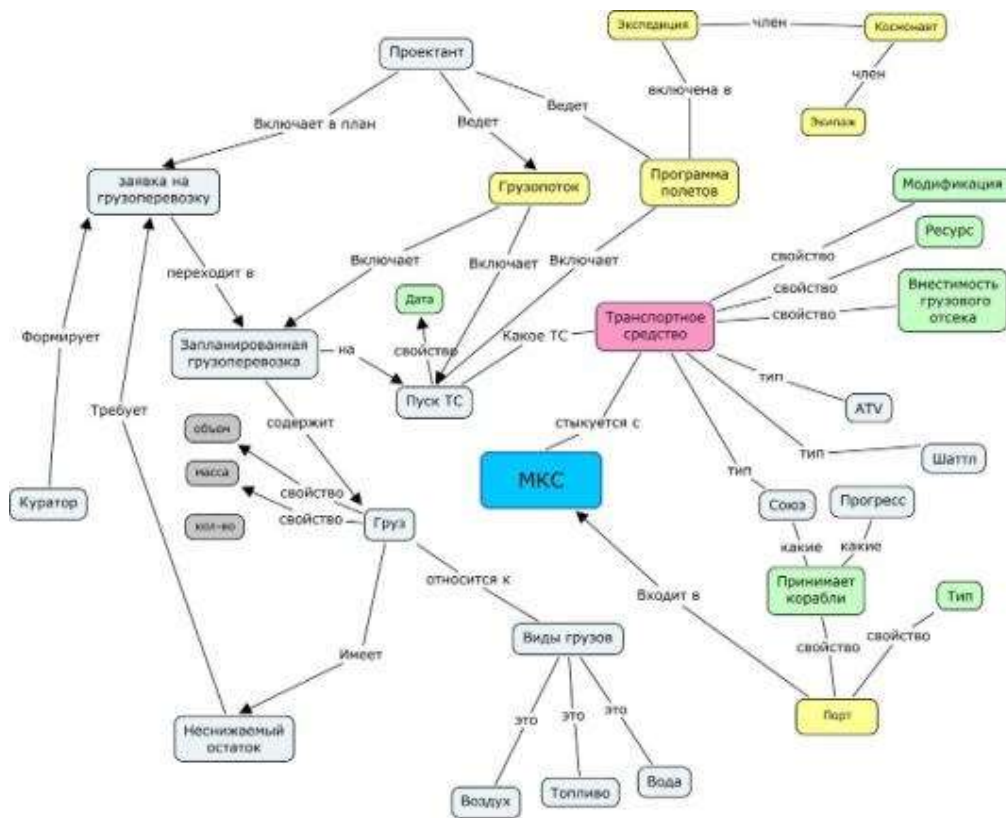


Рисунок 13.2. Фрагмент онтологии грузопотока МКС

Онтология является основой для построения концептуальных моделей сложных объектов предметной области и моделей ситуаций, представляемых как сцены мира МКС, задаваемых на вход виртуального мира мультиагентной системы планирования полетов и грузопотока МКС.

## Виртуальный Мир

Виртуальный Мир каждого планировщика построен на основе рассмотренной выше концепции ПВ-сети и имеет ряд специализированных агентов.

Например, в планировщике программы полетов есть Агенты космического корабля, Агенты экспедиции и Агенты космонавтов, в то время как в планировщике грузопотока есть Агенты груза и Агенты полета. Некоторые классы агентов могут существовать в двух или более виртуальных мирах, имея разную функциональность, но обеспечивая сопряжение и взаимодействие между планировщиками.

Например, Агент полета присутствует как в Планировщике программы полетов, так и в Планировщике грузопотока. Если из-за задержки подготовки корабля начало полета откладывается, агент этого полета, присутствующий в Виртуальном Мире программы полетов, поменяет свой план, т.е. даты запуска, стыковки и расстыковки. А так как он задействован как в программе полетов, так и в грузопотоке, то его сообщение об изменениях в плане предупредит Агентов грузов в Планировщике грузопотока о задержке их полета и даст им возможность успеть «перепрыгнуть» на другой полет, если это требуется. И наоборот, если объем некоторых грузов уменьшается, то коэффициент загрузки полета может стать слишком низким, что будет тотчас же отражено ростом неудовлетворенности Агента полета. Этот агент будет пытаться сдвинуть свой полет на более позднее время в программе полетов, чтобы стать более эффективным и привлекательным для других Агентов грузов.

Рассмотрим более подробно пример работы пользователей и взаимодействия агентов в МАС «Грузопоток»:

- Пусть от куратора поступает новый запрос на доставку заданного груза на определенное время – по этому событию создается новый Агент груза (потребность).
- Новый Агент груза взаимодействует с Агентами полетов, которые уже имеются в системе, что найти свое наилучшее размещение.
- Если подходящего полета еще нет, то инициируются попытки совместно с Агентами кораблей создать новый полет или осуществить сдвиг уже имеющегося.
- Если на выбранном полете достаточно свободного пространства, и данный груз умещается по массе и размерам, новый груз включается в график.
- В противном случае, Агент груза пытается вытеснить один из уже размещенных ранее грузов, который имеет меньшую важность или больший резерв по времени.
- В этих целях Агент груза отправляет выбранным агентам запрос уменьшить свои объемы и массы или переместиться в другие полеты, с учетом неуменьшаемого установленного количества ресурса, которое должно быть всегда доступно на станции.
- Из полученных в ответ вариантов делается попытка найти наилучшую конфигурацию, что, возможно, вызовет еще несколько взаимодействий и итераций для поиска уступок и более гармоничного решения.
- Если роста ценности решения больше не наблюдается, то фиксируется «динамический останов» (система продолжает работать, но изменений плана больше не происходит), и решение выдается пользователю.
- Пользователь может вручную переместить грузы на другие полеты, если необходимо, «заморозить» часть грузов от изменения размещений и т.д.

В приведенном выше примере процесса переговоров агентов может развиваться вспыхивающая «цепная реакция» перестановок, которая будет захватывать и менять принятые ранее решения, поскольку часть грузов после размещения всегда остается не полностью удовлетворенной и только и ждет возможности «перепрыгнуть» в другой корабль или перейти на другой полет при первом же случае.

## Интерфейс пользователя

Примеры экранов МАС «Грузопоток» представлены на рисунках 13.3 - 13.5.

Пользователь может создавать различные версии программы полета и сравнивать их между собой, после чего строить под каждую версию свой план грузопотока и план возврата и утилизации грузов.

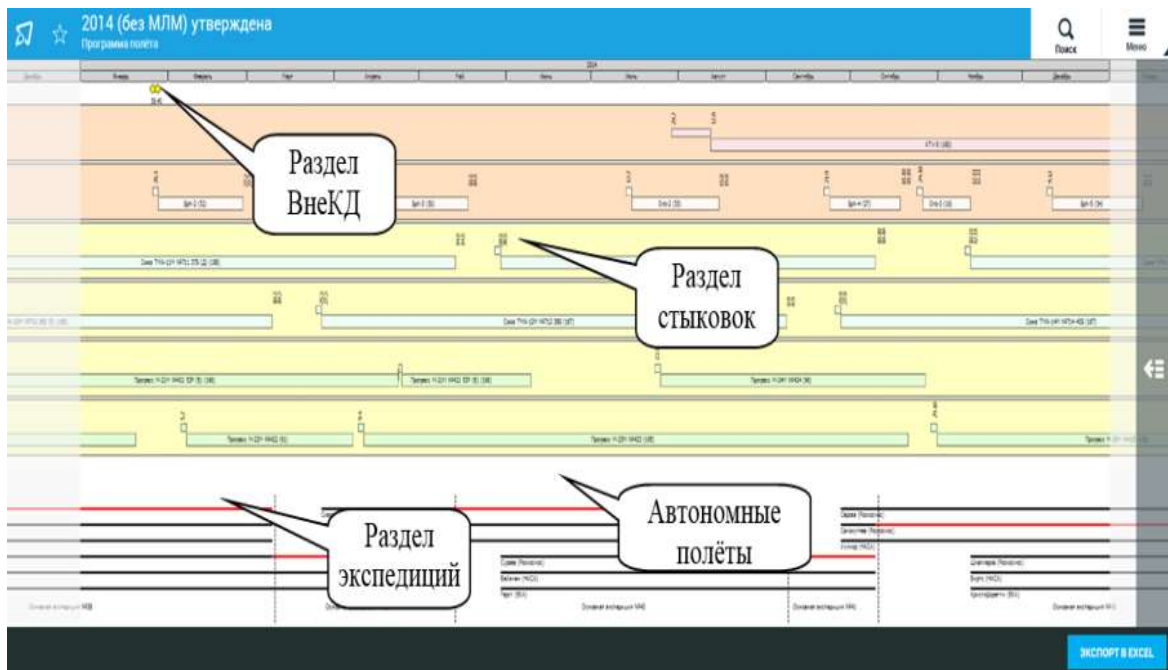


Рисунок 13.3. Интерактивный редактор программы полетов к МКС

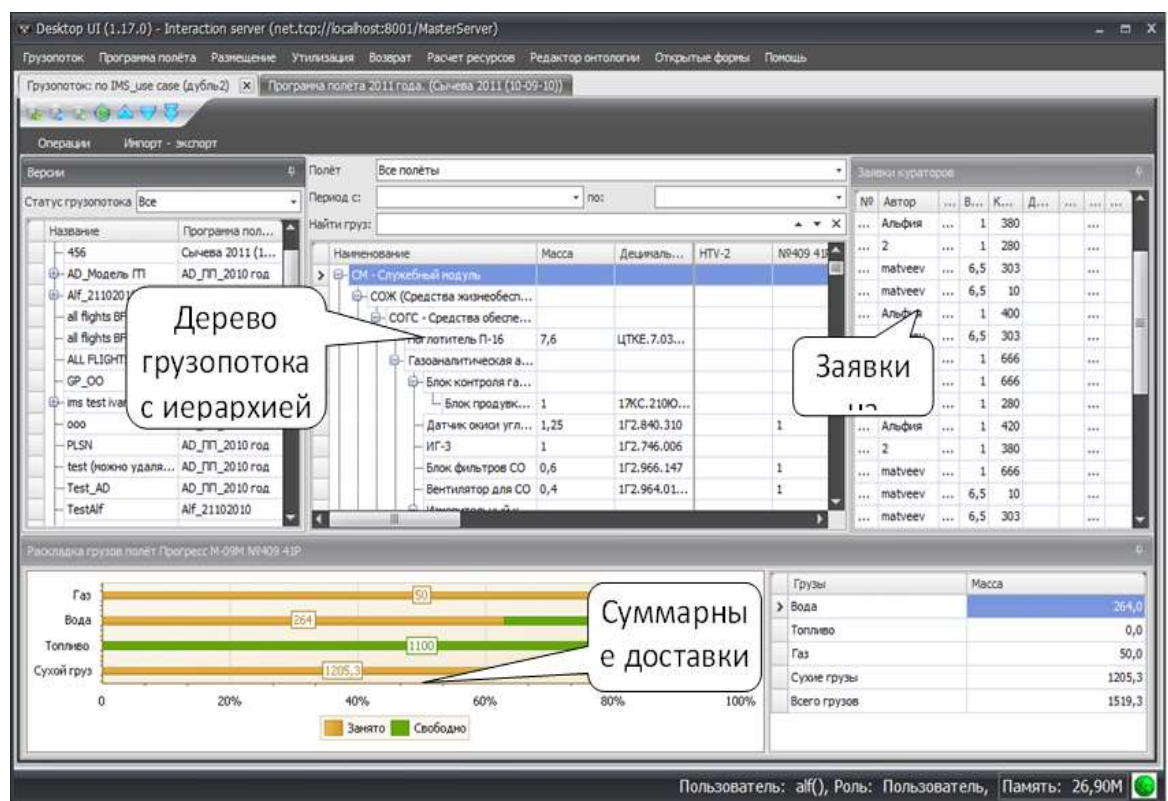


Рисунок 13.4. Интерактивный редактор плана грузопотока МКС



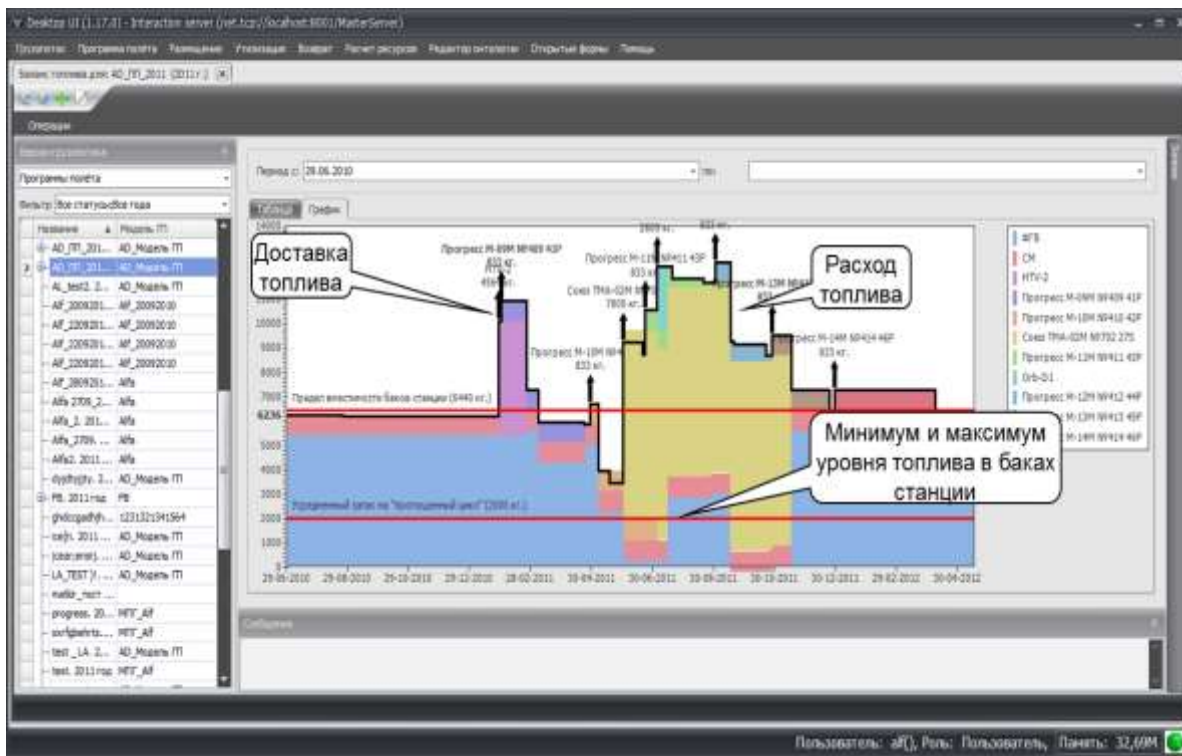


Рисунок 13.5. Интерактивный расчет ресурсов МКС

Разработанные версии программы полетов и грузопотока становятся доступными для согласования кураторами.

В системе обеспечивается построение различных отчетов и поддержка пользователя за счет бизнес-радаров с основными показателями эффективности.

В развитие подхода планируется создание нового мультиагентного планировщика для управления полетными операциями и временем нахождения космонавтов на борту МКС [11].

## Результаты

Система была разработана в 2010-2012 гг. и внедрена сначала в опытную, а затем и в промышленную эксплуатацию в 2013 году.

Важно отметить, что уже с первых шагов разработанная система предоставила заказчику возможность разработки и сравнения нескольких вариантов программы полетов и грузопотока, в том числе отражающих различные стратегии возможных реакций на непредвиденные события.

В целом, по результатам использования системы в 2010 – 2014 годах можно сделать следующие основные выводы и дать первые оценки эффективности внедрения системы:

- существенно уменьшено (на практике сведено почти к нулю) число ошибок в выпускаемой документации по грузопотоку РС МКС;
- стало возможным вести постоянный мониторинг и контроль за излишним или недостающим оборудованием и ресурсами на борту станции;
- время создания грузопотока РС МКС снизилось со 176 - до 8 часов, а время, затрачиваемое на процесс согласования – в среднем с 264 до 88 часов;

- теперь сотни извещений об изменениях в год формируются автоматически, а ранее каждое составлялось не менее 1-2 часа;
- экономия времени на автоматической актуализации грузопотока для поддержания полного соответствия с фактом составила до 200 часов в год;
- адаптивное перепланирование грузопотока (например, при угрозе потери грузового корабля) выполняется за 8 часов, а ранее требовался как минимум 1 месяц;
- экономия времени на формировании резервных программ полёта на случай аварийных ситуаций – 320 часов в год;
- общее время составления плана размещения грузов для одного корабля снизилось с 264 до 128 часов;
- суммарная экономия при планировании грузопотока - 544 часа в год для ТГК «Прогресс» и 320 часов для ТПК «Союз»;
- автоматическая проверка списков утилизируемых грузов от ЦУП на дубликаты экономит около 312 часов в год;
- экономия времени при расчётах балансов продовольствия, воды, топлива и времени экипажа – от 10% до 15% по каждому модулю, что в общей сложности составляет 270 часов в год.

Ключевым результатом внедрения для повышения эффективности работы предприятия является уменьшение трудоемкости и времени, затрачиваемого на планирование и, как следствие, возможность моделирования различных вариантов расписания кораблей и грузов, а также на поддержку взаимодействий и переговоров между заинтересованными участниками, направленных на поиск лучшей реакции на внешние события и адаптацию планов «на лету» в ходе работы предприятия.

Эти возможности помогают свести к минимуму возможные риски и подготовиться к оперативному управлению непредвиденными событиями.

## Список литературы

1. Скобелев, П.О. Опыт создания мультиагентных систем для аэрокосмических применений / П.О.Скобелев, Е.В.Симонова, И.А.Сюсин, А.В.Царев, С.С.Кожевников // Труды X международного симпозиума «Интеллектуальные системы» (INTELS'2012), Вологда, 25-29 июня 2012 г. – М.: РУСАКИ, 2012. – С. 251-254.
2. Диязитдинова А. Р., Иващенко А. В., Симонова Е. В., Скобелев П. О., Сычева М. В., Хамиц И. И., Царев А. В. Концепция мультиагентной системы интерактивного построения программы полета и планирования грузопотока международной космической станции. // Труды XII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». 23 - 25 июня 2010 г. Самара, 2010. С. 686-694.
3. А.В.Иващенко, К.Ю.Матвеев, А.Л.Новиков, Е.В.Симонова, П.О.Скобелев, М.В.Сычева, И.И.Хамиц. Мультиагентная подсистема построения программы полета Международной космической станции / // Перспективные информационные технологии для авиации и космоса (ПИТ-2010). Труды Международной конференции с элементами научной школы для молодежи, Самара, 29 сентября – 1 октября 2010 г. Самара: СГАУ, 2010. – с.98-101.
4. Диязитдинова А. Р., Иващенко А. В., Литвинов И.И., Новиков А. Л., Скобелев П. О., Сычева М. В, Хамиц И. И. Обеспечение согласованного взаимодействия по планированию грузопотока Международной космической станции с помощью мультиагентных технологий. // Труды XIII Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, 2011. с.435-442.

5. Дязитдинова А. Р., Иващенко А. В., Литвинов И. И., Новиков А. Л., Скобелев П. О., Сюсин И. А., Царев А. В. Интерактивная мультиагентная система построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов МКС. // Материалы 4-й мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2011, 3-8 октября 2011 г., с.Дивноморское, Геленджик, Россия. Т.1. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. - С. 343-346.
6. Ivashenko A., Khamits I., Skobelev P., Sychova M. Multi-Agent System for Scheduling of Flight Program, Cargo Flow and Resources of International Space Station. 5-th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011). –Springer Verlag. – Volume 6867 LNAI. – 2011, p. 165 - 174. DOI: 10.1007/978-3-642-23181-0\_16.
7. Бидеев А.Г., Карбовничий В.А., 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.
8. М.М. Матюшин, Т.Г. Вакурина, В.В. Котеля, П.О. Скобелев, О.И. Лахин, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, А.И. Носкова. Методы и средства построения онтологий для визуализации связанных информационных объектов произвольной природы в сложных информационно-аналитических системах // Информационно-управляющие системы. – 2014. №2(69). – С. 9-17.
9. Вакурина Т.Г., Котеля В.В., Лахин О.И., Матюшин М.М., Скобелев П.О. Онтология российского сегмента Международной космической станции и ее практическое использование в интеллектуальных аэрокосмических приложениях // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» - Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2014), 20 – 22 февраля 2014 г. – Минск: БГУИР, 2014. – С. 221-226.
10. Т.Г. Вакурина, О.И. Лахин, Ю.С. Юрыгина, Е.В. Симонова, Д.Н. Коршиков, А.И. Носкова. Корпоративная распределенная онтология для управления российским сегментом международной космической станции // Труды XVI Международной конференции “Проблемы управления и моделирования в сложных системах”, Самара, 30 июня-03 июля 2014г. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 435-443.
11. В.И. Станиловская, А.М. Беляев, О.И. Лахин, А.И. Носкова, Д.Н. Иванова. Подход к адаптивному планированию полетных операций российского сегмента международной космической станции на основе мультиагентных технологий // Труды XVII Международной конференции “Проблемы управления и моделирования в сложных системах”, Самара, 22-25 июня 2015г. – Самара: СНЦ РАН, 2015. – С. -. (в печати)

# Глава 14: Адаптивное планирование группировки спутников

## Проблема

Мировая космическая индустрия переживает решительную смену парадигмы управления космическими аппаратами (КА) [1].

Традиционные большие и тяжелые многоцелевые КА, разрабатывавшиеся по 5-7 лет, постепенно замещаются малогабаритными, гибко конфигурируемыми, лёгкими и дешевыми спутниками (Таблица 14.1), выполняющими специализированные функции, запуск которых на орбиту не требует тяжелых ракет.

Таблица 14.1. Классы КА

Класс КА	Масса
Большие КА	> 500 кг
Мини КА	100-500 кг
Микро КА	10-100 кг
Нано КА	1-10 кг

Новый тип «пикоспутников» обладает массой меньше 10 килограмм, обладая возможностями для сбора данных, обработки информации, передачи на Землю.

Примером такого рода уже реализуемых проектов является Европейская программа CubSat-50, в ходе которой предполагается вывести на орбиту 50 мини- и микроспутников университетов.

Однако самое важное изменение должно произойти в самое ближайшее время в связи с появлением возможности эффективной прямой передачи информации без участия центров управления на Земле [2].

Эта новая возможность позволяет превратить группировку автономных спутников, управляемых с Земли, в самоорганизующийся «рой спутников», самостоятельно и согласованно принимающий решения в космосе.

Наш заказчик был заинтересован в разработке моделей и исследовании возможностей для распределенного решения задачи в группировке спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для следующих применений [3-4]:

- Мониторинг экологической обстановки.
- Поиск передвижных объектов (например, кораблей в море).
- Наблюдение за состоянием крупных гидроэлектростанций.
- Предотвращение распространения пожаров.
- Оценка последствий технических катастроф.

Каждый спутник в группировке может обладать определенными способностями:

- Определение собственных координат.
- Анализ наблюдаемых ситуаций.
- Принятие решений для последующих действий.
- Инициация сеансов общения с другими спутниками и наземными центрами управления спутниками (прием и получение сообщений).
- Проведение переговоров и согласование решений.
- Передача данных.

Наша цель заключалась в совместном решении двух сложных проблем:

- распределенного анализа наблюдаемых ситуаций для совместного распознавания образов;
- распределенного планирования для обеспечения совместной деятельности группировки спутников.

Например, если один спутник может лишь частично распознать признаки пожара в видимом диапазоне (например, из-за наличия облаков), то он может вызвать на помощь другой спутник, оснащенный тепловизором, чтобы уточнить наличие очага пожара в указанном первым спутником заданном месте.

## Решение

Для управления группировкой КА было предложено создание мультиагентной системы адаптивного планирования ресурсов [5-6], позволяющей по событиям в реальном времени перераспределять поступающие задачи на КА (Рисунок 14.1).

В качестве примеров важных событий, запускающих перепланирование задач в группировке, могут быть даны следующие: поступление новой задачи дистанционного зондирования участка Земли с целью обнаружения заданного объекта, задержка в получении результата, появление нового или отказ существующего спутника и т.д.

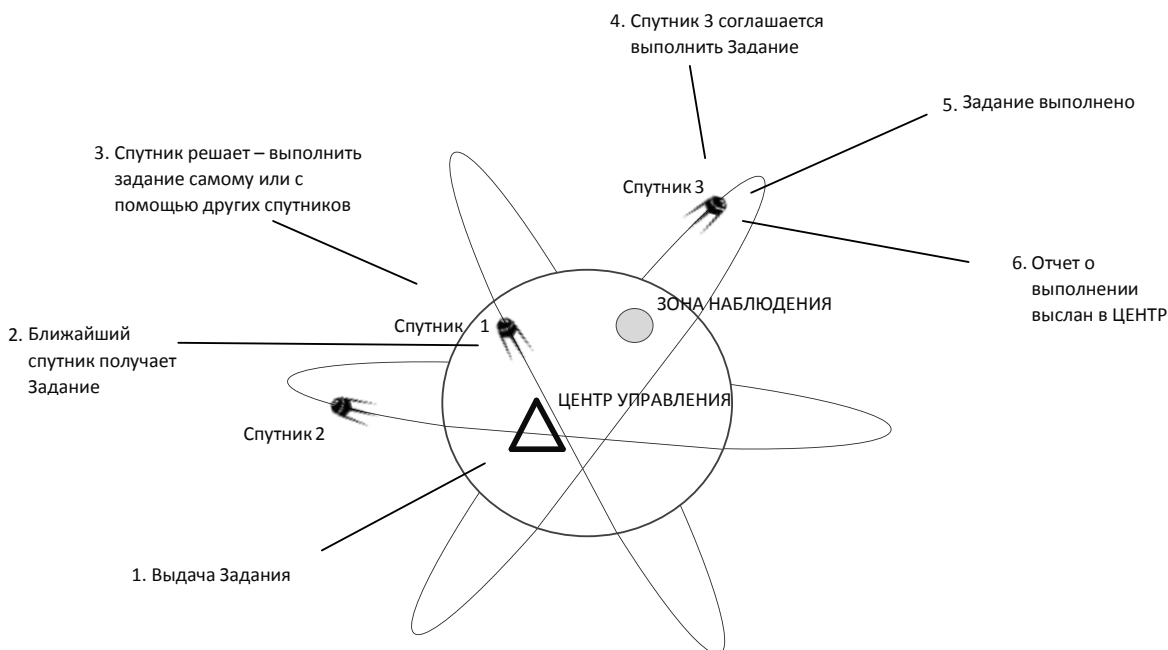


Рисунок 14.1. Пример этапов взаимодействия КА в «рое спутников»

Любой приходящий новый запрос на распознавание заданного объекта (пожар в лесу или деревне и другие) поступает на ближайший КА, который анализирует возможность решения поставленной задачи с учетом ранее взятых на себя обязательств и требований по решению задачи, которые доступны в Базе знаний. Если решение задачи невозможно или возможно частично, поскольку КА не обладает нужным оборудованием или не пролетает требуемую зону, то запрос передается ближайшим соседям и далее распространяется по сети спутников до тех пор, пока динамически не сформируется группа КА, способных решить задачу.

В ходе решения этой задачи выполняется декомпозиция сложной задачи на подзадачи, например, заданный квадрат поиска разбивается на участки для сканирования, и первый КА, выполнивший частичный просмотр квадратов, может передавать эту информацию другим КА, которые могут досканировать местность.

Если заданный объект найден, его координаты передаются на Землю также через сеть КА для оперативного получения результата.

### База Знаний

Важной особенностью системы является использование Базы знаний на основе онтологий, в которой могут быть представлены описания как искомых объектов и задач, которые требуется решать, так и индивидуальных возможностей КА.

В онтологии дистанционного зондирования Земли содержались следующие классы понятий: Цель наблюдения, Деревня, Дом, Дорога, Трубопровод, Лес, Дерево, Опасность, Зона повышенной температуры, Зона повышенной радиации, Спутник, Задача и Центр управления (Рисунок 14.2).

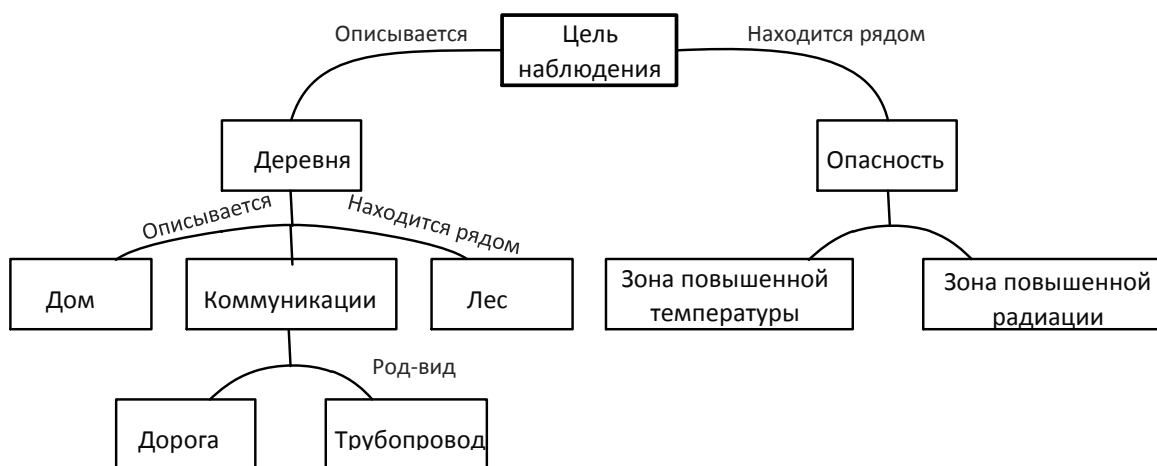


Рисунок 14.2. Фрагмент онтологии дистанционного зондирования Земли

В этом описании деревня описывалась как набор домов, которые связывались «коммуникациями», например, дорогами или трубами с газом или водой, лес – как набор деревьев, а факт выявления повышенной температуры требовал привлечения тепловизионной аппаратуры.

На вход системы можно было сгенерировать квадраты съемки с заранее неизвестными системе примерами сцен с различными конфигурациями домов и дорог, деревьев, трубопроводов и других объектов, которые передавались группировке спутников на исследование в виде XML-файлов.

Предполагалось, что начальная обработка изображений (фильтрация помех, скелетизация и оконтуривание и др.) проводится типовыми пакетами программ, которые давали разметку объектов на изображении, которую и предстояло интеллектуально проанализировать группировке спутников.

В результате задача исследования заданного квадрата распределялась между спутниками, которые далее выполняли сканирование и выдавали его результаты, моделируя процесс распознавания.

Наличие онтологии позволяло динамично вводить новые классы задач и оборудования спутников без перепрограммирования системы.

## Виртуальный мир

В нашем решении было предусмотрено два Виртуальных Мира: один для распознавания образов, а другой – для планирования.

### Виртуальный Мир распознавания образов

Виртуальный Мир распознавания образов населен агентами следующих типов: Цели наблюдения, Дома, Здания, Дороги, Пожары и т.д.

Типы создаваемых в системе агентов зависят от задачи наблюдения, которая ставится перед группировкой.

Агент Цели наблюдения играет роль Агента заказа в рассмотренных ранее приложениях, определяя, какие операции требуется системе выполнить для решения задачи, например, поиск пожаров в заданных квадратах местности.

Агент цели анализирует ситуацию и активирует соответствующих агентов, таких как Агент Здания, Агент Леса, Агент Дороги или Агент Пожара для поиска соответствующих объектов. Каждый из этих Агентов ищет свой образ в сканируемом квадрате и, если он найден, передает его координаты и выявленные атрибуты другим агентам, которых по онтологии можно рассматривать как соседей через отношение типа «Находится рядом».

Благодаря этому даже сам процесс распознавания сложных образов выполняется группировкой КА децентрализованным образом – каждый агент ищет соответствующие ему объекты (здания, дороги) или явления (пожар), поскольку в условиях действия различного рода помех никогда заранее не понятно, какой объект будет выявлен первым.

Любой найденный сложный образ объекта (например, пожар в деревне) собирается как в конструкторе из своих частей, которые помогают друг другу повысить коэффициент распознавания: дом идентифицирует дорогу или, наоборот, дорога и трубопровод могут помочь идентифицировать дом.

Результаты распознавания передаются в интеллектуальную систему планирования, которая соответствующим образом перестраивает планы.

Например, если выявлен объект (дом в деревне) с подозрением на пожар, то подключается спутник с инфракрасной камерой.

### Виртуальный Мир планирования

Виртуальный Мир планирования населен агентами следующих типов: Спутник, Задание, Задача, Оборудование и Центр управления (Агент Предприятия).

Агент Задания присваивается новому заданию, полученному планировщиком из Центра управления или с другого спутника.

Агент задания считывает из онтологии типы спутников и имеющихся у них моделей оборудования, которые могут помочь с выполнением задания, после чего делит задание на задачи и начинает опрашивать эти спутники на предмет возможности решения поставленных конкретных задач.

Агенты спутников могут рассчитывать свои траектории с учетом заданных орбит и скорости движения, поправок на потерю траектории со временем и определять зоны предпочтительной видимости объектов на Земле.

Кроме того, Агенты спутников ведут и корректируют свои расписания, в которые записывают задания и задачи, которые взялись решать в заданные интервалы времени, а также иницируют сеансы связи с Землей и другими спутниками.

Новый агент Задания начинает обмен сообщениями с Агентами Спутников, направленный на выбор спутника с наиболее подходящими атрибутами для выполнения ближайшей задачи.

При этом новое задание сначала предлагается ближайшим спутникам, которые решают, смогут ли они выполнить задание целиком или только частично и, если это необходимо, передают запросы следующим спутникам. Спутники при этом могут демонстрировать как конкуренцию за задания, так и кооперацию для совместного выполнения заданий, когда каждый из них делает ту часть задач, к которой наилучшим образом подходит.

В ходе переговоров КА во внимание принимаются следующие критерии, ограничения и предпочтения: возможности технического оснащения спутника для наблюдений, его текущее расположение и орбита полета, возможность и стоимость наблюдения.

Если спутник дает сбой или целиком выходит из строя, что может быть идентифицировано по таймауту, вызванному невозможностью дать ответ, то его агент посылает сообщение всем другим членам группировки, которых может коснуться это событие, и их агенты запускают процесс перепланирования задач, которые теперь остались без исполнителя.

Если спутник удастся «оживить» с Земли, например, путем его полной перезагрузки, то его агент снова может войти в группировку и вызвать процесс обратного перераспределения задач.

Перепланирование также оказывается необходимо, когда центр управления посылает директивный запрос на скорейшее выполнение нового срочного задания, например, сканирования нового квадрата на предмет обнаружения пожаров.

## Соединяя виртуальный и реальный миры

Группировка спутников имеет три основных типа возможных каналов связи:

- Прямая связь между спутниками.
- Использование спутников связи на геостационарной орбите.
- Связь через наземный центр управления и центр обработки данных.

Выбор каналов связи может осуществляться по ситуации: например, прямая связь может использоваться при условии, если КА находятся в поле зрения друг друга и в пределах заданных расстояний.



Кроме того, возможна также организация каналов связи через коммерческую спутниковую связь типа ГлобалСтар.

## Результаты

Первая версия системы была разработана с целью моделирования работы группировки и оценки эффективности предлагаемого подхода.

Полученные результаты полностью подтвердили гипотезу, что распределенное решение задач ДЗЗ в группировке КА позволяет добиться более высокой оперативности, гибкости, надежности и живучести [7-8].

На рисунке 14.3 показано, как взаимодействия и переговоры агентов сокращают время наблюдения, когда число целей наблюдения увеличивается.

На рисунке 14.4 представлены результаты эксперимента, в котором исследовалось, как замедляется время решения задачи с выходом КА из строя.

Показывается высокая живучесть системы: при выходе из строя даже значительного числа спутников, системе удается решить поставленную задачу.

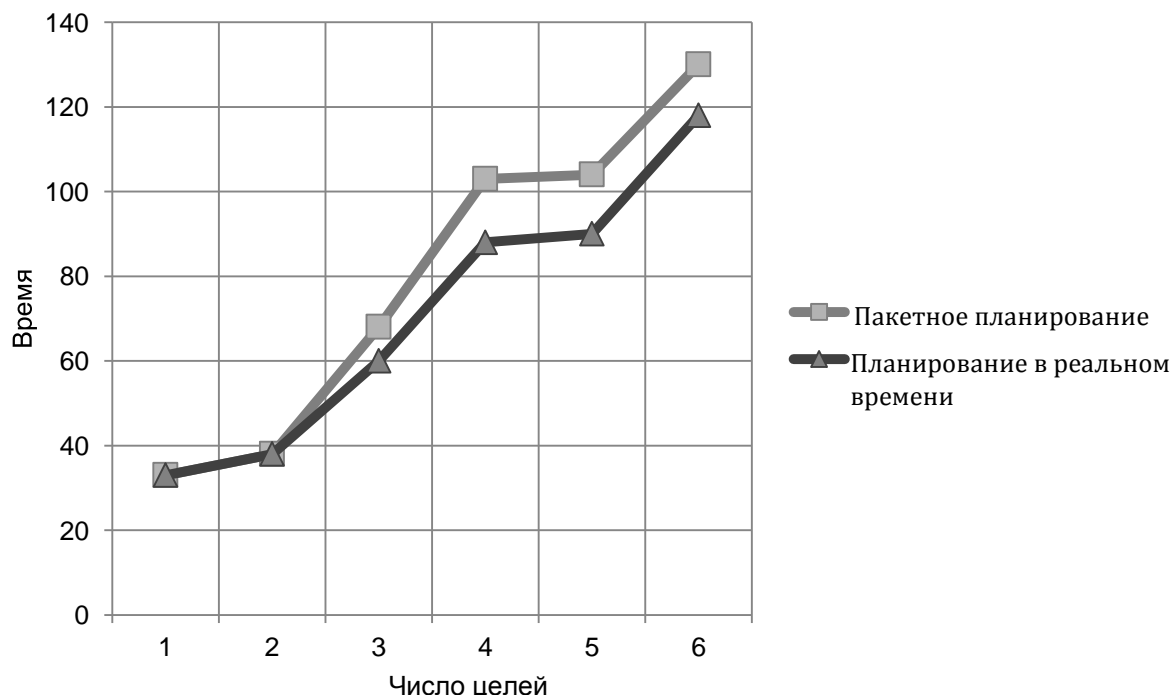


Рисунок 14.3. Время выполнения задачи в случае распределенного взаимодействия КА в группировке превосходит централизованный вариант с ростом числа целей

Адаптивное планирование и распознавание образов в режиме реального времени могут быть особенно полезными при непредсказуемом изменении спроса и предложения на рынке космических услуг и частых нарушений в планах КА [9].

В настоящее время совместно со специалистами АО «РКЦ «Прогресс» ведется отработка реализации автономных интеллектуальных систем указанного класса для размещения на борту каждого спутника [10].

## Sensing time

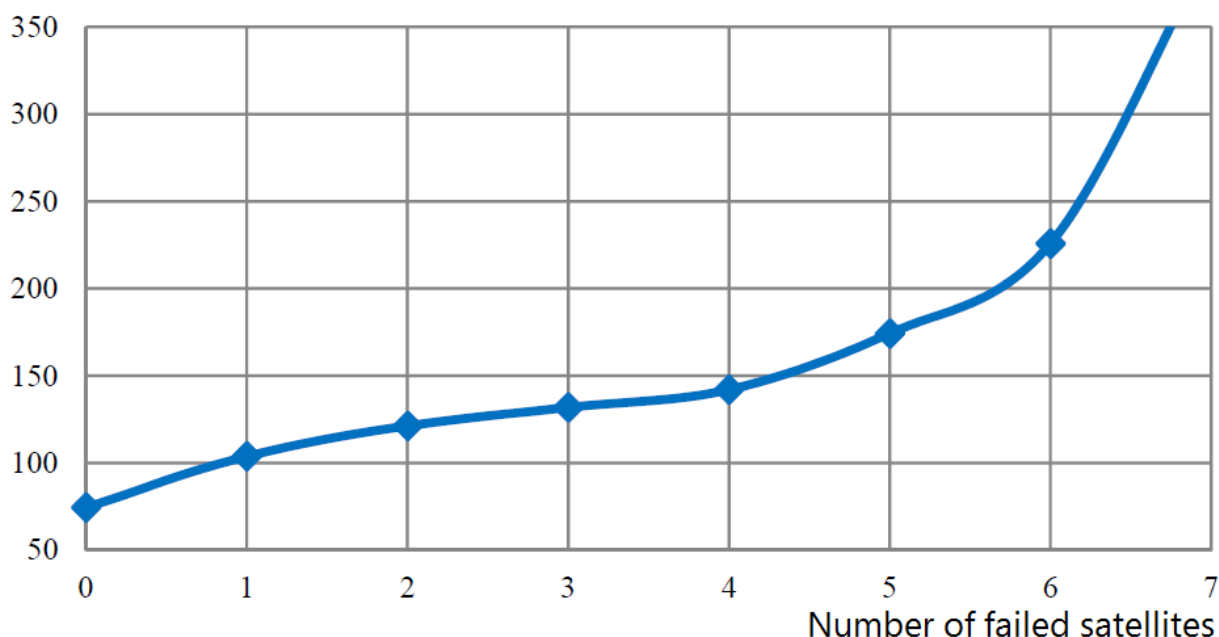


Рисунок 14.4. Время выполнения задачи при выходе из строя части КА растет, но позволяет выполнить миссию

Кроме того, совместно со специалистами Лозанской политехнической школы решается задача моделирования для оценки эффективности при взаимодействии КА и сети станций в проекте CubSat-50 [11-12].

Разработанная система в дальнейшем может рассматриваться как основа для новой интеллектуальной платформы коммерциализации космоса.

## Список литературы

1. Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Степанов М.Е., Царев А.В. Проблемы автономного согласованного межспутникового взаимодействия в гетерогенных мультиагентных системах МКА ДЗЗ // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. № 4. С. 65 – 70.
2. Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е. Модели сетевых задач планирования и управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов при решении задач дистанционного зондирования Земли. // Информационно-управляющие системы. – 2012. №1(56). – С.34 – 38.
3. Соллогуб, А.В. Оценка эффективности кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А.В.Соллогуб, П.О.Скобелев, Е.В.Симонова, М.Е.Степанов, А.В.Царев, А.А.Жилиев // Информационно-управляющие системы. – 2012, №5(60). – С. 24 – 28.
4. Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е., Жилиев А.А. Мультиагентные технологии распределенного управления группировкой малоразмерных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли//Информационное общество. – 2013. №1-2. – С. 58–68.
5. Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е., Жилиев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. – 2013. №1(62). – С. 16-26.
6. Соллогуб, А.В. Экспериментальные исследования методов взаимодействия малоразмерных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А.В.Соллогуб,

П.О.Скобелев, Е.В.Симонова, М.Е.Степанов, А.А. Жилиев, А.В.Царев // Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении (ПИТ-2012). Труды научно-технической конференции с международным участием и элементами научной школы для молодежи, Самара, 18 - 20 декабря 2012 г. Самара: СНЦ РАН, 2012. – С. 213-216.

7. I. Belokonov, P. Skobelev, E. Simonova, V. Travin, A. Zhilyaev. Multiagent planning of the network traffic between nanosatellites and ground stations // Proceedings of the 65th International Astronautical Congress (IAC 2014), Toronto, Canada, September 29 – October 03, 2014. – IAC-14, D1,P,1,x27032.

8. A.Zhilyaev, E. Simonova, P. Skobelev. Using multi-agent technology for distributed management of cluster of remote sensing satellites // Proceedings of the International Conference on Complex Systems in Business, Administration, Science and Engineering (Complex Systems 2015), 12 - 14 May, 2015, New Forest, UK. 2015 – P. 267-275.

9. А.Б. Иванов, А.А. Жилиев, И.В. Майоров, Е.В. Симонова, П.О. Скобелев, В.С. Травин, В.К. Скимунт, Н.Р. Стратилатов, С.В. Тюлевин. 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. Электрон. текстовые дан. (1074 файл: 537 МБ). 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). ISBN 978-5-91459-151-5. Номер государственной регистрации: 0321401153.

10. П.О. Скобелев, А.Б. Иванов, Е.В. Симонова, В.С. Травин, А.А. Жилиев. Концепция применения сервисно-ориентированной архитектуры при построении космических систем микроспутников // Труды XVI Международной конференции “Проблемы управления и моделирования в сложных системах”, Самара, 30 июня-03 июля 2014г. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 513-518.

11. П.О. Скобелев, В.С. Травин, А.А. Жилиев, Е.В. Симонова, А.Б. Иванов. Мультиагентная технология адаптивного планирования сеансов связи группировки малых космических аппаратов с наземными станциями // 7-я российская мультиконференция по проблемам управления. Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2014), 7-9 октября 2014 г., Санкт-Петербург, Россия. СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2014. – с. 701-709.

12. P. Skobelev, E. Simonova, A. Ivanov, I. Mayrov, V. Travin, A. Zhilyaev. Real time scheduling of data transmission sessions in the 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), October 22-24 2014, Rome, Italy. – SciTePress, 2014. – pp. 153-159. DOI 10.5220/0005034301530159.

# ГЛАВА 15: Адаптивное планирование поездов

## Проблема

Проблема оперативного планирования железнодорожного движения – одна из сложнейших задач, что во многом обусловлено взаимозависимостью движения поездов разных типов в общем поле ресурсов станций и путей [1-2].

К числу основных условий данной задачи относятся следующие:

- Разные поезда движутся с разными скоростями.
- Разные поезда обладают разными приоритетами.
- Один поезд может обогнать другой на станции или, если это необходимо, на одном из свободных участков.
- В исключительных случаях возможен вывод поезда на пути встречного направления.
- Пропускная способность станций ограничена доступным числом путей.
- Требуется поддерживать интервалы безопасности между поездами.
- Платформы на станциях имеют разную длину и т.д.

Движение поездов подвержено влиянию целого ряда непредвиденных событий, таких как:

- Поломки поездов.
- Выход из строя железнодорожного полотна.
- Задержки поездов.
- Задержка ремонта ж/д полотна и т.п.

При возникновении непредвиденного события расписание движения составов должно перестраиваться так, чтобы минимизировать время возврата к расписанию с обеспечением минимально возможных изменений в расписаниях других поездов, т.е. сокращая неудобства для пассажиров.

Наша задача, поставленная нам ОАО «РЖД» и ВНИИАС [3-5], заключалась в разработке интеллектуальной системы адаптивного планирования поездов на очень оживленной железнодорожной магистрали Москва-Санкт-Петербург.

В это время высокоскоростные экспрессы часто отставали от расписания, в основном, по причине нарушений состояния железнодорожного полотна и проведения внеплановых ремонтов, что также сказывалось и на движении всех других поездов, внося задержки иногда до 8 часов.

Главная цель разработки состояла в том, чтобы обеспечить скорейший возврат высокоскоростных поездов класса «Сапсан» к расписанию в случае возникновения непредвиденных событий.

Инфраструктура этого участка включает около 700 км железнодорожных путей, разбитых на 5 полигонов из 49 станций с 48 сегментами путей (около 14 имеют три пути, но большая часть - 2 пути), представленных 3700 блок-участками, дающими информацию о прохождении поездов.

Для решения задачи требуется согласованно перепланировать движение 810 поездов «на круге», где имеются высокоскоростные и обычные пассажирские поезда разных классов, пригородные электрички, грузовые и технические поезда и некоторые другие. Всего надо учитывать до 50 приоритетов поездов.

Горизонт планирования составляет от 6 до 18 часов.

Управление движением осуществляется главным диспетчером с командой из примерно 5 человек, при этом в одну рабочую смену возникает до 100 событий, требующих перепланирования (поломки пути, задержки и др.).

При этом существующая система автоматизации движения на базе платформы «Вектор» обеспечивает непрерывный мониторинг движения и положения поездов (примерно 50 сигналов в минуту).

## Решение

Разработанная интеллектуальная система адаптивного управления движением поездов позволяет выполнять следующие функции:

- загружать описание инфраструктуры и базовое расписание движения поездов в качестве начальных данных системы;
- автоматически создавать расписание для всего множества поездов в рамках заданной инфраструктуры;
- адаптивно перестраивать расписание в реальном времени при возникновении любых непредвиденных событий.

В начале проекта в системе рассматривалось 5 основных критериев планирования, но к концу проекта – уже более 85 предпочтений и ограничений, большая часть из которых является плохо формализуемыми, например:

- стремиться избегать неравномерного движения;
- не планировать скопления больших групп поездов на подходах к станциям;
- избегать встречного прохождения скоростных поездов и платформ перевозки открытых грузов (иначе щебенка бьет окна);
- планировать стоянки поездов только на подходящих путях;
- минимизировать выезды на встречный путь движения и т.д.

При этом построить сразу наилучшее решение «с нуля» никак не представляется возможным, слишком сложный комбинаторный перебор требуется.

Однако разработанная стратегия решения позволяет быстро построить первое «грубое» решение, а далее оценить «слабые места» и последовательно начать улучшать решение в нужном направлении, начиная от приоритетных поездов.

При этом в ходе работы, исходя из необходимых требований высокой производительности, разработанный адаптивный планировщик был реализован как сетевая структура, представленная на рисунке 15.1 [6-7].



Рисунок 15.1. Сетевая структура планировщиков движения поездов

Сетецентрическая система предполагает в данном случае, что каждый планировщик действует как автономная система, координирующая свои действия при необходимости с любым другим через общую шину предприятия.

В представленной выше сетецентрической структуре планировщиков расписание движения поездов строится по нескольким уровням:

1. Планировщик Маршрутов: на этом уровне строится «грубое» расписание движения для всех поездов, задетых событием, учитывающее маршруты движения каждого из них. В результате сразу выявляются и подсвечиваются конфликты, которые разрешаются агентами этих поездов в прямых переговорах между собой с уступками, например, путем изменений графика или маршрута движения. Разрешение наиболее крупных конфликтов приводит агентов к новым, как правило, менее значимым конфликтам, которые далее разрешаются аналогичным образом – пока все они не будут устранены.

2. Планировщик Станций: агенты станций получают запросы от агентов поездов на прохождение станций и на этой основе выстраивают расписание использования путей станций. Если требуемый поезду слот времени наиболее подходящего пути уже занят, фиксируется конфликт, который разрешается по аналогии: занятый слот может быть освобожден ранее забронировавшим его поездом, если это не приводит к более значимым задержкам, или новый поезд должен уступить и согласиться на другой слот времени или другой путь. Наблюдая за общей картиной загрузки станции, агенты станций могут снижать стоимость своих «пустых» слотов динамически, делая их еще более привлекательными для поездов, которые оплачивают услуги станциям.

3. Планировщик Участков: одновременно с «утряской» расписания на верхнем уровне непрерывно проверяется реализуемость расписания на самом нижнем уровне до отдельных блок-участков. Если по каким-то причинам фиксируется конфликт, и несколько поездов претендуют на один блок-участок – осуществляется разрешение конфликта на данном уровне, или же вырабатывается сигнал на верхние уровни с требованием разрешить конфликт уступками более высокого уровня, например, с разрешением выезда высокоскоростного поезда на встречный путь на одной из станций.

Заметим, что простые уступки через учет приоритетов (более приоритетный поезд выгоняет менее приоритетный) при этом могут не работать – требуется ситуативный анализ, базирующийся на анализе последствий решений – что случится, если второй поезд пропустит первый. Так, в наших экспериментах наблюдались случаи, когда высокоскоростной Сапсан вытеснял пассажирский поезд, а тот еще дальше - грузовой поезд, который в итоге полностью перекрывал путь другому Сапсану.

Разработанная стратегия построения расписаний оказалась очень удобной и для адаптивной реакции на события, не требуя полного пересмотра расписания, а ограничиваясь лишь разбором конфликтов между поездами, оказывающимися затронутыми событиями.

Например, если с определенного блок-участка приходит сигнал о том, что путь неисправен, то агент блок-участка может сразу найти поезда, которые въезжают на этот участок и оповестить их о своей недоступности, что позволит поездам сразу же начать перепланироваться, чтобы задержаться на ближайшей станции или начать искать варианты объезда неисправного пути.

Перестроенное расписание диспетчерами может сразу передаваться машинистам для корректировки маршрутов и графиков движения поездов.

## База знаний

Онтология системы [8] включает такие классы понятий как: Поезд, Дорога, Маршрут, Сегмент пути, Станция, Платформа, Путь, Запасной путь, Встречный путь, Блок-Участок и некоторые другие. Указанные понятия связаны классами отношений вида: «Поезд занимает Блок-Участок», «Поезд находится на Станции», «Запасной путь относится к Станции» и другими.

Фрагмент онтологии для управления движением поездов представлен на рисунке 15.2, где для упрощения показаны только основные понятия.

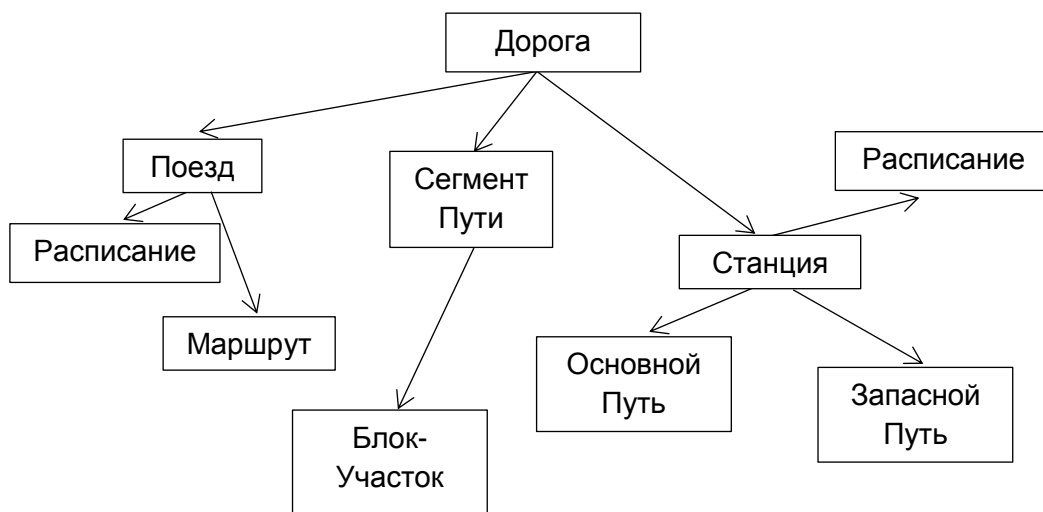


Рисунок 15.2. Фрагмент онтологии управления движением поездов

Экземпляры рассмотренных понятий и отношений позволяют агентам строить и анализировать модели ситуаций (сцены) с десятками тысяч объектов, складывающиеся в ходе движения поездов.

Пример фрагмента сцены представлен на рисунке 15.3, где показано, по какому маршруту идет конкретный поезд, какие посещает станции, и на каких путях планируется его размещение.

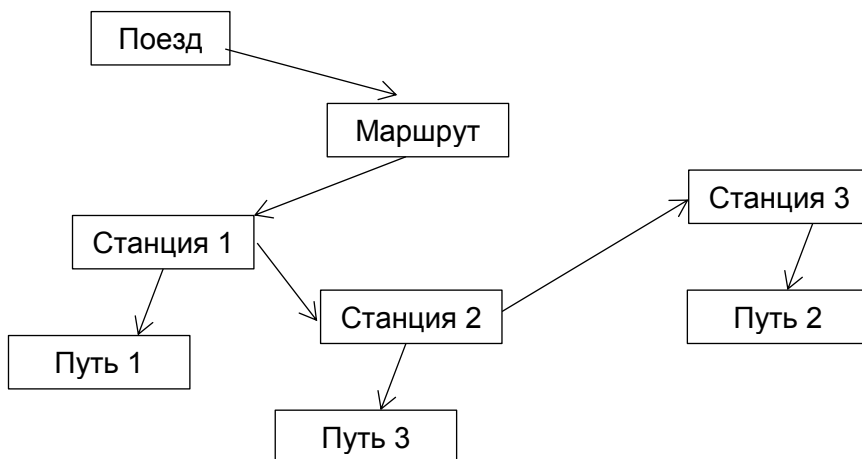


Рисунок 15.3. Фрагмент сцены управления движением поездов

В случае, если вдруг возникает проблема с одним из путей – по данной структуре данных можно быстро найти все поезда, которые проходят через этот путь и инициировать их перепланирование со стороны станций.

Для ускорения работы системы онтология была реализована на программном уровне, обеспечивая высокую скорость обработки сцены текущей ситуации.

## Виртуальный Мир

Виртуальный Мир системы содержал агентов следующих типов: Агент Поезда, Агент Станции, Агент Запасного пути, Агент Участка и другие.

Построение расписания движения поездов или корректировка данного расписания по событиям осуществлялась в ходе взаимодействия и переговоров агентов, каждый из которых также мог читать и анализировать информацию из общей сцены и принимать решения.

Агент Поезда может порождать Агентов Маршрута как потребности в обеспечении прохода от требуемого пункта отправления к пункту назначения. А они, в свою очередь строят варианты различных конкретных маршрутов движения.

Агент Маршрута может обращаться к станциям и бронировать слоты времени на занятие нужных ему путей, поскольку для пассажирских поездов важно учитывать длину платформы на каждом пути, иначе пассажиры не смогут выйти из вагонов.

Каждый из агентов, соответственно, имеет доступ к онтологии, позволяющей ему сразу же узнать, какие пути есть на данной станции и какой из них наилучшим образом подходит тому или иному поезду.

Агент сегментов и станций аналогичным образом взаимодействует с агентами путей и блок участков.

Основой переговоров при распределении и планировании путей являлось то условие, что для перемещения поезда из точки А в точку Б все участки на этом пути должны быть свободны от прочих поездов на момент их достижения согласно расписанию.

При рассмотрении возможности обгона поезда должны рассмотреть возможность выхода на встречную полосу. Информация о наличии такой возможности также хранится в онтологии каждой станции.

Как уже было указано выше, общая стратегия построения столь сложного расписания состоит в том, чтобы строить план методом последовательных приближений с итерационным разрешением конфликтов на каждом этапе и с учетом приоритетов поездов. При этом все переговоры ведутся с целью увеличения общей функции ценности, уравнивающей важность достижения различных, зачастую противоречивых целей, например таких, как соблюдение указанных приоритетов поездов, минимизация задержек, минимизация использования участков, зарезервированных для поездов встречного направления, соблюдение особых ограничений выбора платформы для поездов и т.д. В результате на последних этапах устраняются чрезмерные задержки низкоприоритетных поездов.

Благодаря применяемому подходу расписание с каждым шагом, как правило, становится все более сбалансированным. Но если данная стратегия планирования не приводит к удовлетворительному значению ценности расписания, то агенты могут принять решение об уничтожении неадекватного расписания и начать процесс сначала целиком или на выбранном «худшем» фрагменте, применяя другие стратегии, как было описано в Главе 4 в разделе про возможное созидательное разрушение (провокации) расписаний.

То же самое может произойти, если пользователь системы (диспетчер) решает, что расписание, созданное агентами, является неудовлетворительным.

В этом случае пользователь имеет возможность «заморозить» часть расписания, а часть, например, для выделенных поездов – «распустить», и тогда начать более прицельно строить новое расписание в выбранных сегментах дороги.



## Соединяя виртуальный и реальный миры

Разработанная система может загружать начальные данные из существующих автоматизированных систем управления движением ОАО «РЖД».

А далее может постоянно получать события через автоматизированную систему мониторинга и контроля движения на базе Платформы «Вектор», которые помогают корректировать позиции поездов на основе созданных планов движения или фиксировать непредвиденные события.

Получаемое новое расписание передается машинистам, на станции и другим пользователям через списки корректировок движения поездов,

## Интерфейс пользователя

В настоящий момент разработанная система работает под системой «Вектор», дающей пользователю общую картину движения поездов (Рисунок 15.4).

Рассмотрим пример обработки системой конфликтных ситуаций на направлении Санкт-Петербург – Бусловкая и подробно разберем принимаемые планировщиком решения.

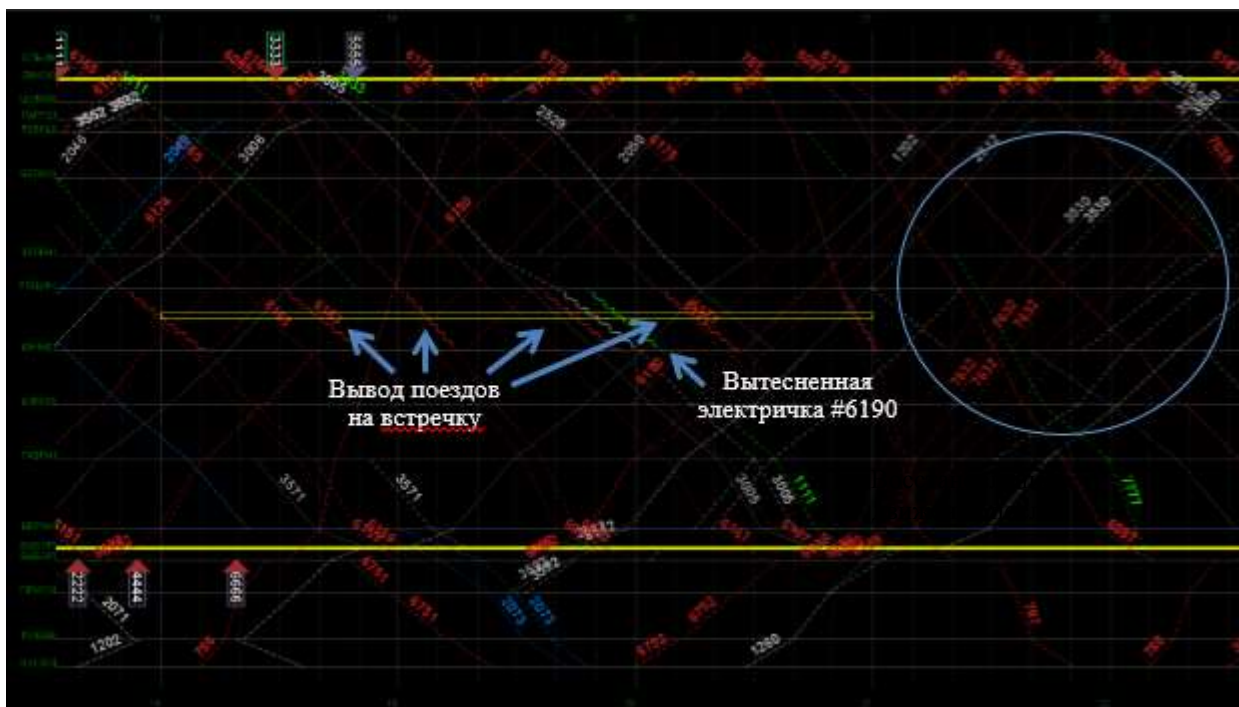


Рисунок 15.4. Пример обработки событий и корректировки расписаний движения

На рисунке представлен результат обработки события ввода трехчасового окна ремонтов на перегоне Рожино - Каннельярви на первом пути.

В результате обработки окна, пригородные поезда №6163, №6095, №6167, №6171, имеющие больший приоритет по отношению к грузовым, объезжают окно на перегоне по «неправильному» пути, чтобы не отстать от своего расписания (на рисунке отмечены волнистой линией).

Эти поезда вытесняют небольшую часть поездов своего приоритета, например №6190, поскольку в случае пропуска №6190, суммарное опоздание будет больше. На «неправильный» путь также выходят два грузовых поезда (№3005 и №1111), а также поезд «Аллегро» №787, причем поезд №1111 идет диспетчерским расписанием, то есть планировщик самостоятельно

строит для него расписание прохода по станциям полигона, ориентируясь только на планируемое время входа и выхода на полигон.

Как видно из рисунка, при выходе на неправильный путь поезда замедляются, поскольку нормативная скорость следования по неправильному пути по принятым правилам должна быть меньше.

Данное отставание после прохождения участка с ремонтным окном компенсирует только поезд «Аллегро», поскольку электрички не могут превышать нормативную скорость движения по перегону.

Вследствие отклонения каждой электрички от своего исходного графика, возникают конфликты с другими поездами, что требует дополнительного изменения расписаний поездов, непосредственно не затронутых конфликтом.

Например, поезд №6098 оказался сдвинут поездом №6167, поскольку конфликт возник на однопутном участке из-за сдвига №6167 вследствие окна. Поскольку №6167 уже имел опоздание, то он уступил в данной ситуации поезду №6098.

Тем не менее, возникшее возмущение в графике движения поездов не распространяется дальше часа после времени окончания окна.

Рассмотрим ситуацию с большим количеством возмущений, которая представлена на рисунке 15.5.

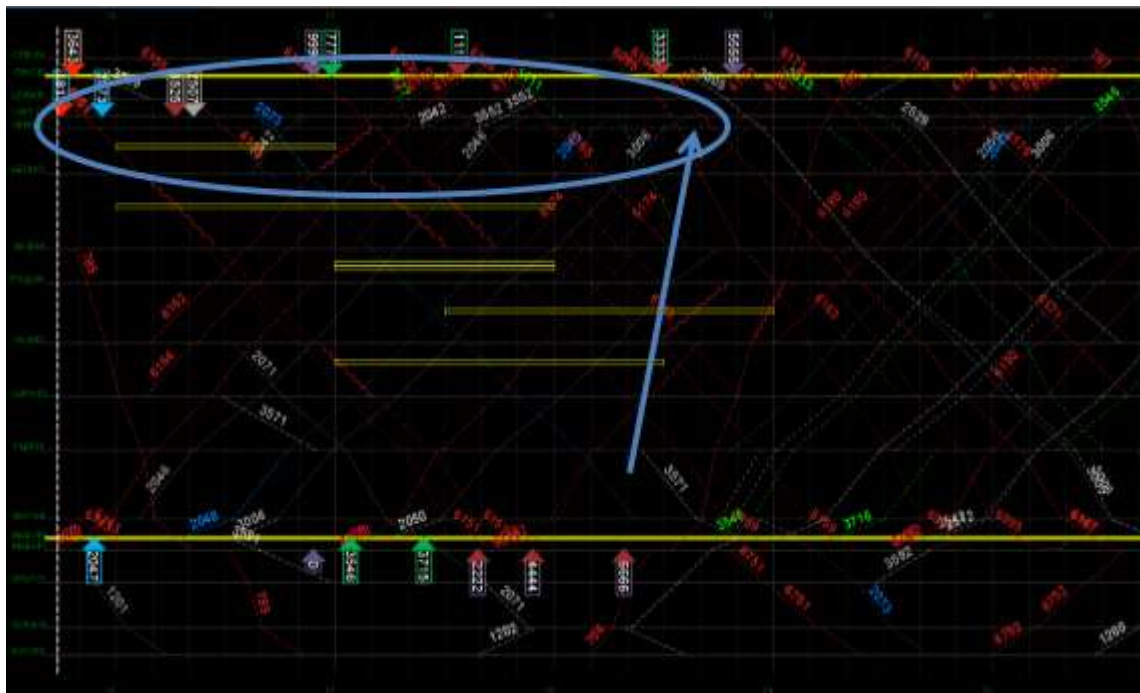


Рисунок 15.5. Пример обработки более сложной цепочки событий: задержки поездов №2048, №6155 и №6163 с учетом появления большого числа ремонтов

Здесь показана ситуация с вводом новых 6-ти окон ремонтных работ, два из которых полностью перекрывают движение на перегоне Рощино – Зеленогорск в течение часа.

Обработка рассматриваемой ситуации потребовала задействования обратных связей различными уровнями планировщика.

В ходе планирования из-за большого сгущения линий графика после окончания ремонтного окна и необходимости быстрого пропуска поездов маршрутный планировщик не смог сразу построить окончательный план, поскольку торможения и разгон поездов при постановке на стоянку и выезде на неправильный путь нарушали требования безопасности движения.

Маршрутный планировщик фиксирует данное несоответствие как конфликт и отправляет сообщение планировщику участков, который для исправления ситуации должен задержать часть поездов на предшествующих станциях (например, №2048, №6155, №6163), учитывая излишнюю загруженность перегонов.

Новое сформированное решение отправляется назад в маршрутный планировщик, который строит маршрут и проверяет соответствие решения требованиям безопасности движения.

В результате расписание получилось более сбалансированным и устойчивым к возможным последующим возмущениям, влияние окон ремонтных работ локализовано.

После завершения ремонтов графики движения поездов стремятся к эталонным.

Сверхзагруженность перегона разрешить без участия второго планировщика невозможно, поскольку изменение маршрута с выездом на встречный путь будет стоить гораздо больше, чем изменение времен прохождения станций поездами.

## Результаты

Разработанная система адаптивного управления движением поездов была внедрена в промышленную эксплуатацию на участке Москва - Санкт-Петербург в 2014 г. [9-13].

Общие характеристики процесса построения расписания:

- память для построения расписания: от 0,6 - до 0,9 Гб;
- среднее число активных агентов в системе: около 40 тысяч агентов;
- число согласований между уровнями планировщиков: от 15 до 25.
- число сообщений в ходе построения расписания: > 1 млн. штук;
- время построения начального расписания: < 45 минут;
- время отработки события (до 50 изменений состояний поездов, станций или дороги): < 30 секунд.

Оценка качества результатов планирования:

- Задержки движения высокоскоростных поездов класса «Сапсан» – практически нет!
- Выполнение всех основных требований безопасности (интервалы между поездами, отсутствие поездов с щебенкой на встречной полосе и т.д.) – 99%;
- Выполнение технических требований (время разгонов и торможения, выбор платформ, времена стоянок и др.) – 97%;
- Средняя задержка поездов на участке - менее 8% (до 30 поездов в конфликте);
- Среднее время возврата к расписанию – в 1.5 раза быстрее.

При этом разработанный мультиагентный планировщик обеспечил существенное – более чем в 2 раза - снижение трудоемкости, необходимой на перепланирование поездов, расписание которых пострадало из-за непредвиденных событий.

При этом появились новые возможности для прогнозирования развития ситуаций и анализа возникающих рисков, что должно способствовать дальнейшему росту безопасности движения.

Наконец, впервые появилась возможность моделирования различных изменений в инфраструктуре железной дороги для повышения эффективности использования имеющихся ресурсов.

В настоящее время планируется тиражирование разработанной системы на другие дороги ОАО «РЖД».

Начаты работы по созданию новой интеллектуальной системы для построения сетевого графика движения на Байкало-Амурской магистрали [14].

## Список литературы

1. А.А. Белоусов, П.О. Скобелев, В.Г. Матюхин, Н.А. Кузнецов. Управление логистикой РЖД 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. 160-166.
2. Шабунин А. Б., Чехов А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е., Курбатов Е. В., Сазуров С. В., Дмитриев Д. В. Сетецентрический подход к созданию мультиагентной системы для управления производственными процессами ОАО «РЖД». // Материалы Международной научно-практической мультиконференции «Управление большими системами-2011», 14-16 ноября 2011, Москва, 2011. – Т.3. – С. 222-225.
3. А.Б. Шабунин, А.В. Чехов, Г.А. Ефремов, Д.В. Дмитриев, Е.В. Курбатов, С.В. Сазуров, И.О. Бабанин, А.А. Белоусов, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, П.О. Скобелев, М.Е. Степанов, А.В. Царев, Г.Ю. Мунтян. Решение конфликтов в графике движения поездов в реальном времени с использованием мультиагентных технологий // Труды 1-й научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте ИСУЖТ-2012», Москва, 15-16 ноября 2012 г. – С. 51-55.
4. А.Б. Шабунин, Н.А. Кузнецов, П.О. Скобелев, И.О. Бабанин, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, М.Е. Степанов, А.В. Царев. Разработка мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО «РЖД» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. №1. – С. 23–29.
5. Шабунин А.Б., Чехов А.В., Ефремов Г.А., Сазуров С.В., Курбатов Е.В., Дмитриев Д.В., Кузнецов Н.А., Скобелев П.О., Царев А.В., Симонова Е.В., Белоусов А.А. Интеллектуальная система управления эксплуатационной работой ОАО «РЖД» // Тезисы 3-й Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте» (ИнтеллектТранс-2013), Санкт-Петербург, 3-5 апреля 2013 г. – Спб: Петербургский госуниверситет путей сообщения, 2013. – С. 36.
6. А.Б. Шабунин, С.Н. Марков, Д.В. Дмитриев, Н.А. Кузнецов, П.О. Скобелев, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, А.В. Царев. Интеграционная платформа для реализации сетецентрического подхода к созданию распределенных интеллектуальных систем управления ресурсами ОАО «РЖД» // Программная инженерия. – 2012. №9. – С. 23 – 28.
7. Шабунин, А.Б. Разработка сетецентрического подхода к созданию интеграционной платформы и интеллектуальной системы управления ресурсами грузовых сортировочных станций в реальном времени / А.Б.Шабунин, А.В.Чехов, С.В.Сазуров, Е.В.Курбатов, Д.В.Дмитриев, Н.А.Кузнецов, П.О.Скобелев, И.О.Бабанин, С.С.Кожевников, Е.В.Симонова, М.Е.Степанов, А.В.Царев // Труды Третьей российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ' 12). Москва, 16-19 апреля 2012. – М.: ИПУ РАН, 2012. – С. 1560-1572..
8. А.Б. Шабунин, Н.А. Кузнецов, П.О. Скобелев, И.О. Бабанин, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, М.Е. Степанов, А.В. Царев. Разработка онтологии для мультиагентной системы управления ресурсами ОАО «РЖД» // Информационные технологии. – 2012. №12. – С. 42 – 45.
9. А.Б. Шабунин, В.А.Чехов, П.О. Скобелев, Н.А. Кузнецов, Е.В. Симонова, И.О. Бабанин, С.С. Кожевников, М.Е. Степанов, А.В. Царев, С.В. Сазуров, Е.В. Курбатов, Д.В. Дмитриев. Сетецентрический подход к созданию распределенных систем управления ресурсами ОАО «РЖД» на основе мультиагентных технологий // Труды XIV Международной конференции “Проблемы управления и моделирования в сложных системах”, Самара, 22-25 июня 2012г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. – С. 724-734.
10. А.А. Белоусов, Г.А. Ефремов, М.Е. Степанов, А.Б. Шабунин. Мультиагентный подход к решению сложной задачи построения расписаний в крупномасштабной системе управления

железнодорожным движением // «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2014)»: Сборник научных трудов / под общ. ред. С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна; Ин-т проблем управления им. В.А.Трапезникова Рос. акад. наук. – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 252-262.

11. А.А. Белоусов, Г.А. Ефремов, М.Е. Степанов, А.Б. Шабунин. Сетецентрическая мультиагентная система для адаптивного управления железнодорожным движением в реальном времени // 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. 8912-8924. Электрон. текстовые дан. (1074 файл: 537 МБ). 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). ISBN 978-5-91459-151-5. Номер государственной регистрации: 0321401153.

12. A.A. Belousov, A.A. Goryachev, P.O. Skobelev, M.E. Stepanov. Multi-agent method to adaptive real-time train scheduling with conflict limitations // Proceedings of the International Conference on Complex Systems in Business, Administration, Science and Engineering (Complex Systems 2015), 12 - 14 May, 2015, New Forest, UK. 2015 – P. 253-265.

13. A.A. Belousov, P.O. Skobelev, M.E. Stepanov. Network-centric approach to adaptive real-time train scheduling // Proceedings of the Sixth International Conference on Swarm Intelligence (ICSI), 26-29 June, 2015, Beijing, China. 2015 (in publishing).

14. Н.А. Кузнецов, А.Б. Шабунин, А.А. Белоусов, А.С. Еремин, А.А. Абрамов. Разработка сетевого графика движения 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. 8995-9002.

# ГЛАВА 16: Адаптивное планирование цехов машиностроительного производства

## Проблема

Управление ресурсами цехами машиностроительных предприятий - сложная многокритериальная задача, требующая часто ситуационного решения с учетом индивидуальных особенностей заказов, технологии их реализации, возможностей ресурсов, экономики предприятия и ряда других предпочтений и ограничений.

Цель одного из наших первых крупных проектов в этой сфере состояла в том, чтобы обеспечить динамическое построение сменно-суточных заданий (ССЗ) для рабочих в инструментальном цехе машиностроительного предприятия электронной промышленности [1-2].

Параметры сложности решаемой задачи для инструментального цеха:

- списочный состав работников цеха – около 120 рабочих (токари, слесари, шлифовщики и др.);
- номенклатура выпускаемых изделий: приспособления, пресс-формы, штампы, специальная оснастка, электродержатели, фрезы, тара, кондуктора и пр.;
- объем заказов - 30-40 заказов в день на изделия, каждое из 20-30 компонент;
- парк станков (токарные, шлифовальные, фрезерные, заточные, сверлильные, расточные станки, печи, прессы и пр.) – около 300 единиц оборудования;
  - средняя трудоемкость исполнения заказа – 35 н/ч (в инструментальном цехе);
  - максимальная трудоемкость – 4 000 н/ч (в инструментальном цехе);
  - цех вырабатывает в месяц около 17 000 н/ч;
  - максимальное число входящих в изделие деталей и сборочных единиц (ДСЕ) – до 150;
  - максимальное число уровней вложенности – до 10 и т.д.

Один из наиболее сложных проектов производственных цехов был связан со сборочным цехом на производстве реактивных авиационных двигателей:

- сборка двигателя – более 50 тыс. деталей;
- каждое изделие требует от 10 до 300 технологических операций;
- 10 заказов в день, горизонт – от месяца до года;
- количество связанных задач на горизонт планирования - до 150 тысяч;
- надо учитывать особенности техпроцессов, умения рабочих, возможность брака, наличие склада, особенности организации участков и т.д.

Примеры типовых критериев принятия решений в машиностроении:

- обеспечить высокое качество сборки изделия;
- минимизировать стоимость исполнения заказов;
- минимизировать сроки исполнения заказов;
- обеспечить равномерную загрузку ресурсов;
- обеспечить минимальные риски исполнения заказов в срок и другие.

Задача управления ССЗ для производства подобных изделий может быть сформулирована как распределение, планирование, оптимизация и контроль производственных ресурсов цеха (например, станков и рабочих, материалов, заготовок и т.п.) по заказам во времени, при условии частого возникновения непредвиденных событий, например, появления новых заказов, изменений в параметрах заказов, появления новых или отказа имеющихся ресурсов, задержек, человеческих ошибок и других.

На первом этапе ставилась задача автоматизации управления ресурсами и динамической перестройки ССЗ в одном выбранном цехе, который на практике, как правило, всегда был наиболее проблемным для предприятия.

## Решение

Для решения поставленной задачи была разработана мультиагентная система адаптивного управления ресурсами цехов машиностроительного предприятия в реальном времени [3-7].

Разработанная система включает следующие АРМы и поддерживает представленный ниже бизнес-процесс управления ресурсами цеха (Рисунок 16.1):

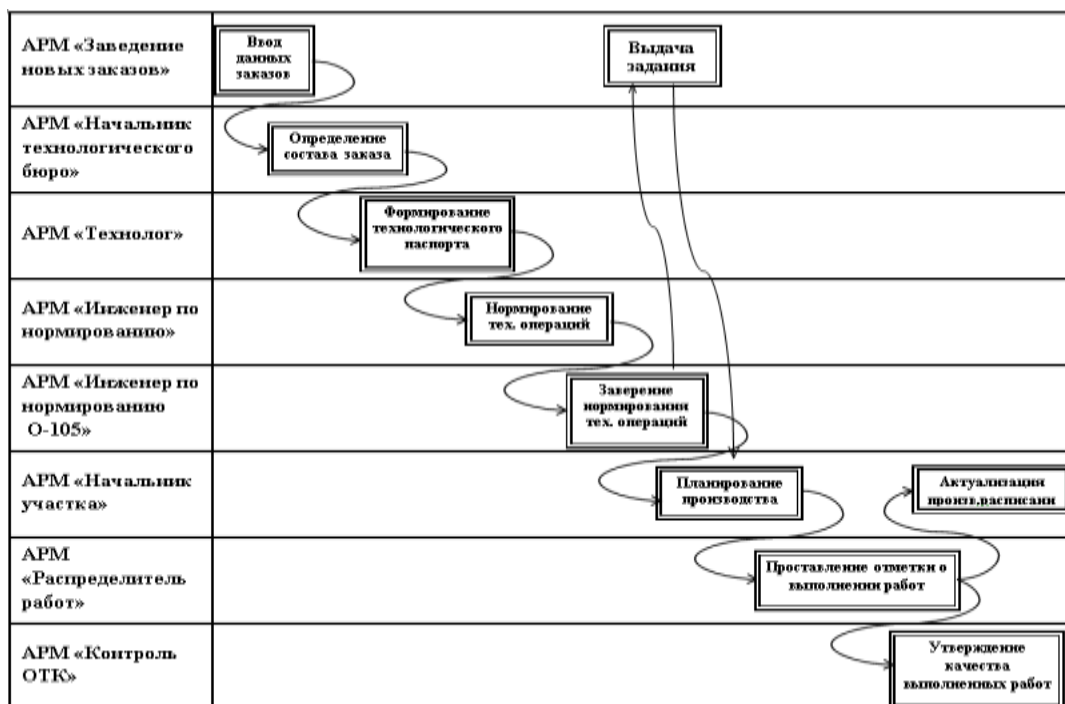


Рисунок 16.1. Бизнес-процесс управления ресурсами цеха предприятия

Основные функциональные возможности системы:

1. Ведение справочников: система позволяет задавать данные о заказчиках, заказах, технологических процессах, станках и компетенциях рабочих, операции которых планируются для исполнения заказов.

2. Автоматическое оперативное планирование:

- система строит мастер-план и ССЗ автоматически;
- мастера смен ежедневно получают список наиболее приоритетных заданий для своих рабочих и принимают решение о перераспределении тех или иных задач;
- для мастеров реализована возможность утверждать предлагаемое ССЗ полностью или частями с возможностью перепланирования;
- гибкое перепланирование в случае брака и другие возможности.

3. Ввод факта (отметки о выполнении работ): разработанная система предоставляет возможность простановки отметок факта выполнения работ и формирования сменного отчета-наряда в электронном виде с возможностью автоматического заполнения полей норм, названий ТО и ДСЕ, автоматического расчета расценочных полей и итогов работы по каждому рабочему.

4. Интеграция: ADEM, Team Center, 1С и другие:

- импорт заказов из отдела продаж предприятия;
- копирование технологического процесса по отдельным ДСЕ;
- копирование всего дерева ДСЕ с данными по материалам;
- автоматическое формирование нарядов на заготовки;
- импорт норм времени (например, из системы ADEM);
- автоматический расчёт суммарной трудоемкости;
- расчёт и экспорт заработной платы в 1С.

5. Аналитика для руководства цеха и завода:

- бизнес-радар прогноза работ цеха по текущему состоянию дел в цехе;
- формирование отчетов по заказам и ресурсам цеха.

6. Удобные сервисы для работы мастеров:

- для ежедневного использования системы: подсказки и подсветки, перепланирование при браке, учет матрицы транспортировки и т.д.
- Поддержка сенсорных терминалов рабочих, планшетов для мастеров и другие возможности.

7. Терминал рабочего – возможность ввода предпочтений рабочих и выборки работ в задание, отметка факта, ввод событий и другие возможности.

Разработанная система интегрируется с типовыми PLM- и ERP-системами предприятия (Рисунок 16.2).

Адаптивные планировщики оперативно реагируют на непредвиденные события и пытаются повысить прибыль или другие важные показатели предприятия путем улучшения перераспределения ресурсов по заказам, например, подтягивая хвосты операций заказов, когда образуются время простоя рабочих.

Планировщики созданы таким образом, чтобы работать интерактивно с руководителями цехов, мастерами и рабочими, позволяя менять составленное агентами расписание по событиям в реальном времени.



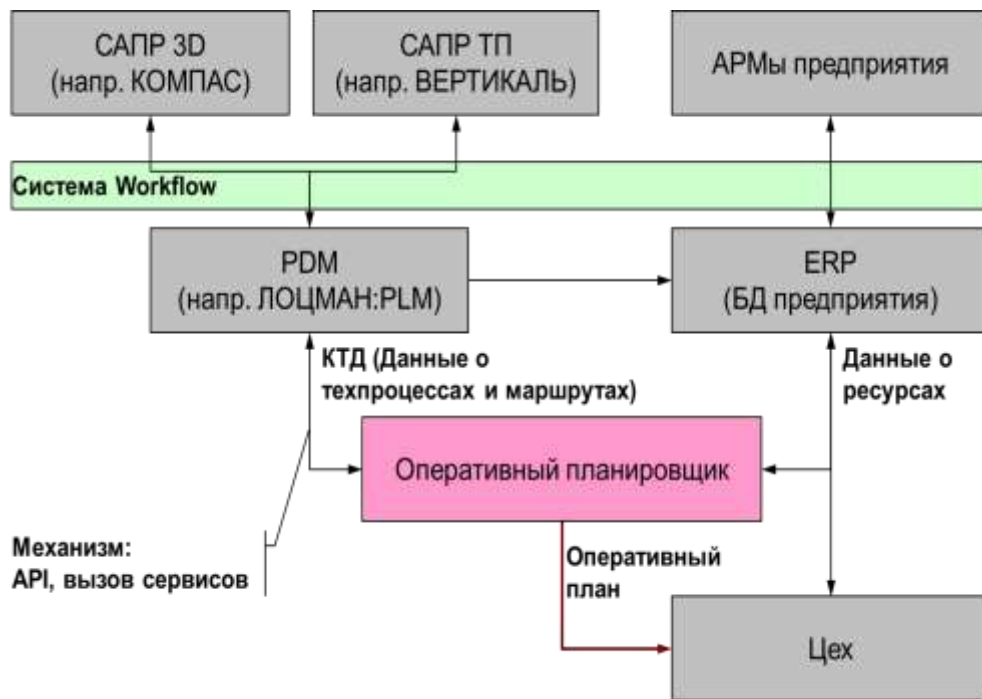


Рисунок 16.2. Интеграция разработанной системы с PLM- и ERP-системами предприятия

## База знаний

Онтология мультиагентной системы управления ресурсами цеха содержит классы таких объектов, как: Заказ, Цех, Станок, Процесс, Операция, Изделие, Материал, Заготовка и другие.

Примеры атрибутов классов объектов: для заказа – класс изделия, число заказанных изделий и сроки изготовления, для рабочего – умения и компетенции, заработная плата и др.

Фрагмент онтологии предметной области машиностроительного производства представлен на рисунке 16.3.



Рисунок 16.3. Фрагмент онтологии предметной области

Примеры классов отношений: изделие состоит из частей, изделие имеет род-вид, заказ делается в цеху, рабочий забронирован для технологической операции, для операции требуется инструмент и т.п.

Фрагмент сцены мира производственного планирования в виде объектной модели представлен на рисунке 16.4.

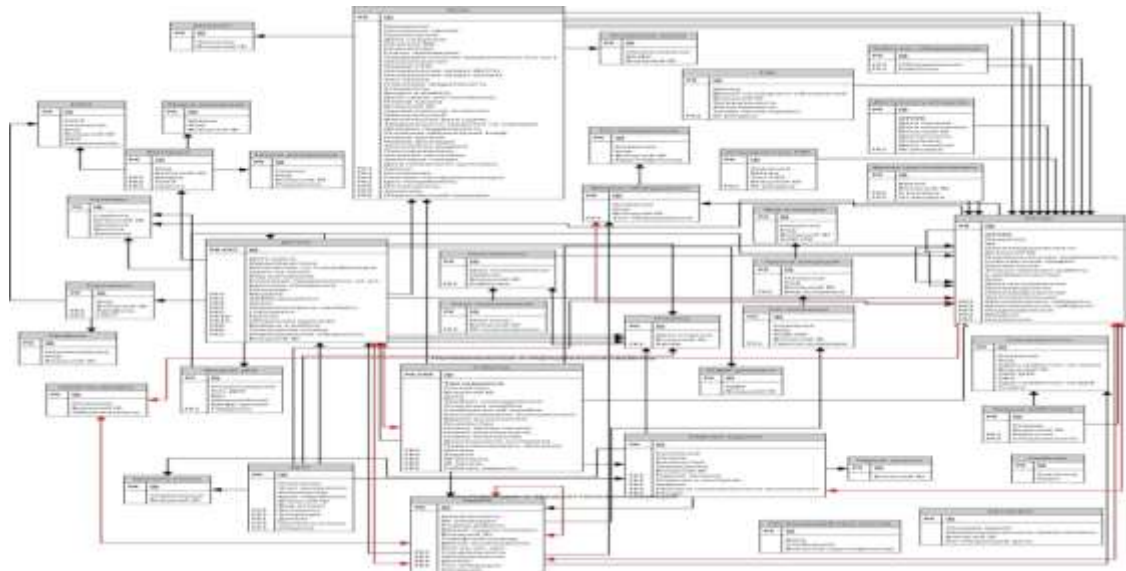


Рисунок 16.4. Фрагмент сцены мира цеха машиностроительного предприятия

Онтология предметной области может в определенных пределах уточняться и дополняться для каждого заказчика без перепрограммирования системы [8].

Эти возможности позволяют сократить затраты на разработку, внедрение и сопровождение системы.

### Виртуальный мир

Виртуальный мир адаптивного планировщика цеха содержит следующих агентов: Агент Заказа, Агент Предприятия, Агент Рабочего, Агент Станка, Агент Процесса, Агент Операции, Агент Изделия, Агент Материала и другие (Рисунок 16.5).

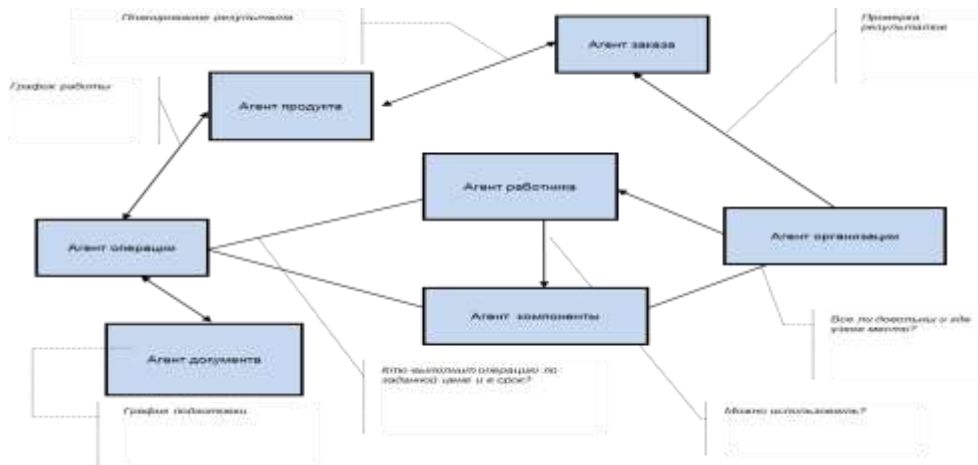


Рисунок 16.5. Классы агентов виртуального мира цеха предприятия

Примеры решаемых задач для агентов: для Агента заказа – найти наилучшие возможные станки и рабочих; для Агента рабочего – получить расписание, которое обеспечит наилучшую оплату или задачи, которые повысят квалификацию рабочего, для Агента станка – найти полную загрузку и т.д.

Поведение агентов определяется заданной логикой и переговорами агентов, пример протоколов которых представлен на рисунках 16.6 - 16.7

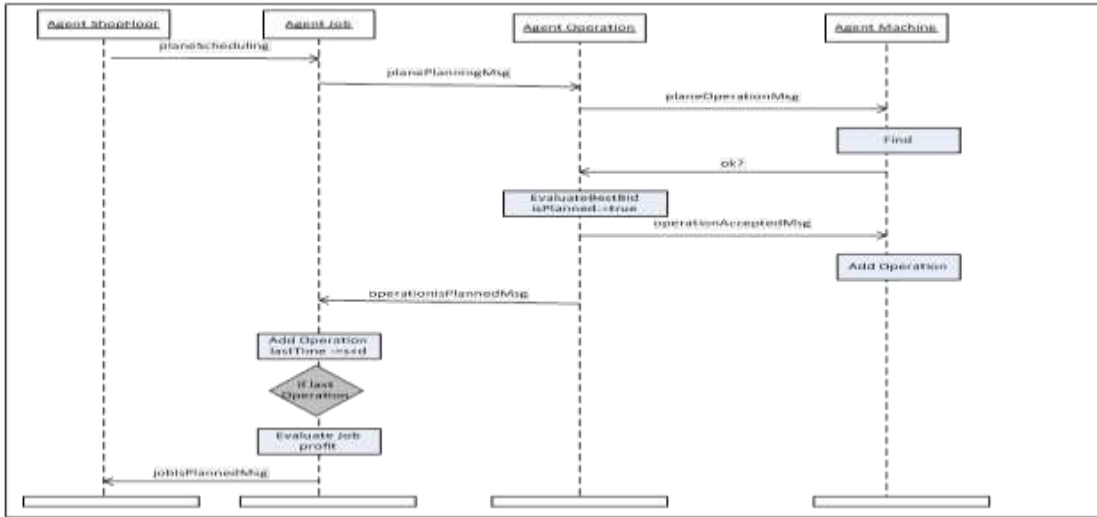


Рисунок 16.6. Фрагмент переговоров агентов виртуального мира цеха на стадии предварительного бронирования

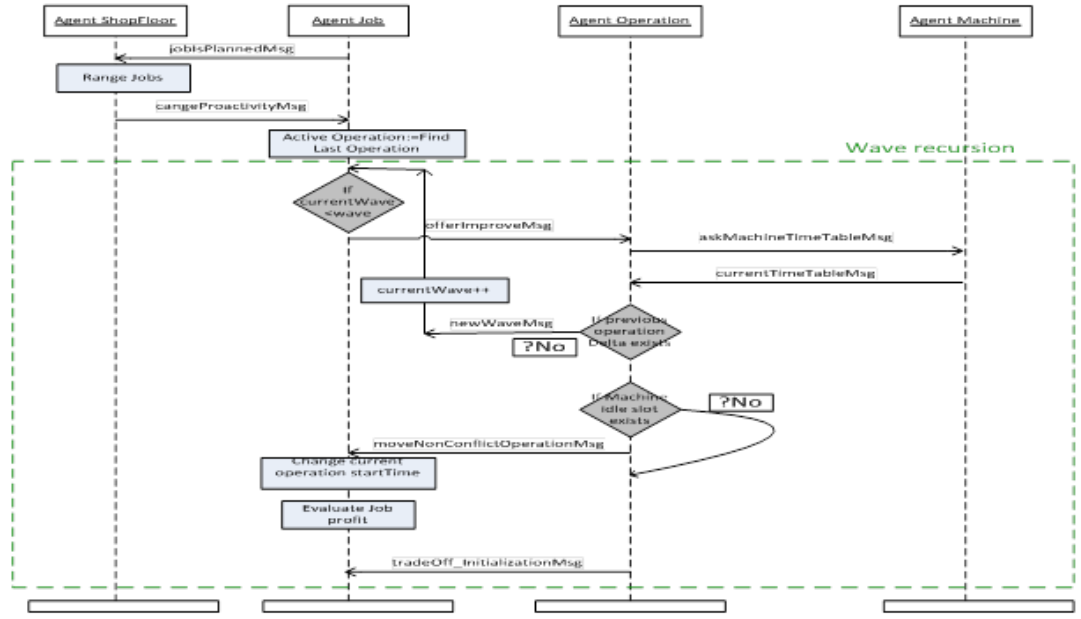


Рисунок 16.7. Фрагмент переговоров агентов виртуального мира цеха на стадии проактивного улучшения плана

Переговоры агентов направлены на разрешение конфликтов, вызванных ситуациями, когда новая операция хочет занять временной интервал, уже занятый другими операциями. Конфликт обычно устраняется путем взаимных уступок в попытке передвинуть ранее распределенные операции вперед или назад во времени, чтобы поместить новую операцию.

Пример разрешения такого конфликта путем переговоров показан на рисунках 16.8 - 16.10.

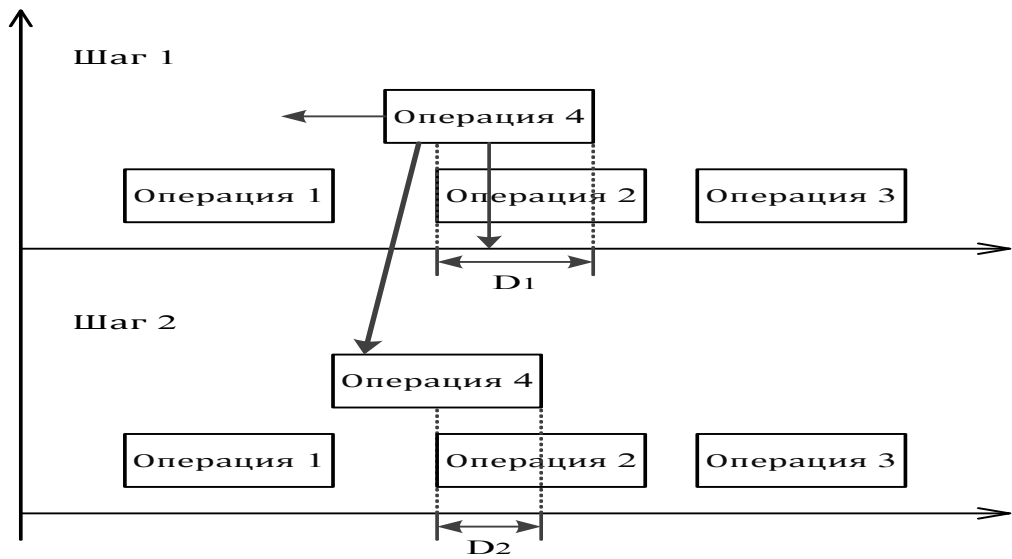


Рисунок 16.8. Операция 4 пытается найти размещение между Операциями 1 и 2 и начинаются переговоры агентов

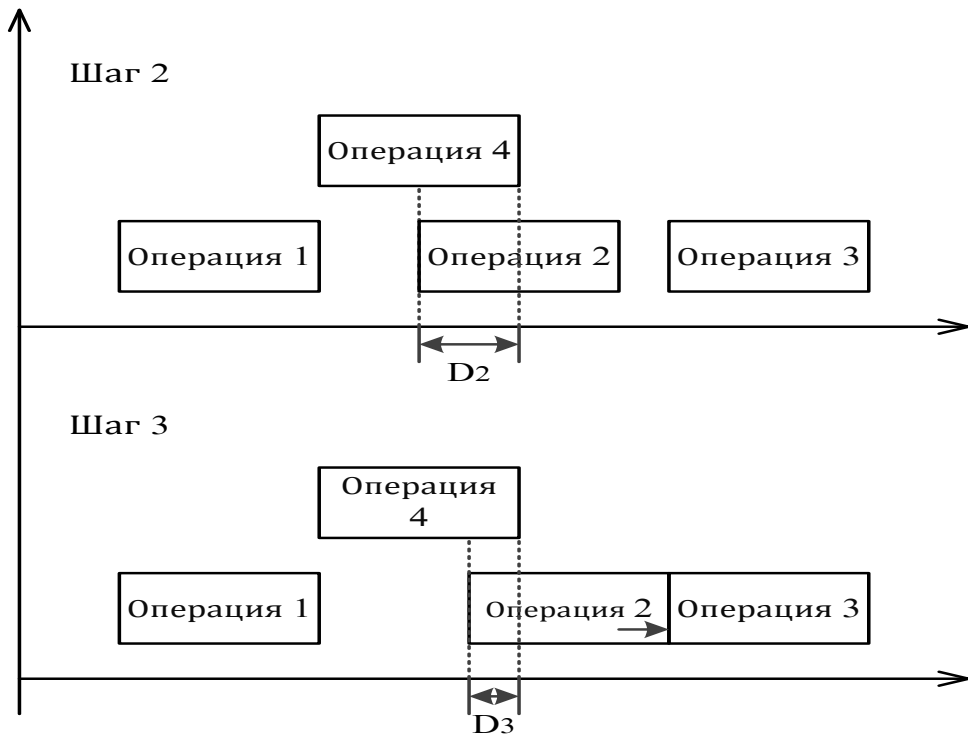


Рисунок 16.9. Сдвиг Операции 2 вперед во времени помогает частично решить задачу

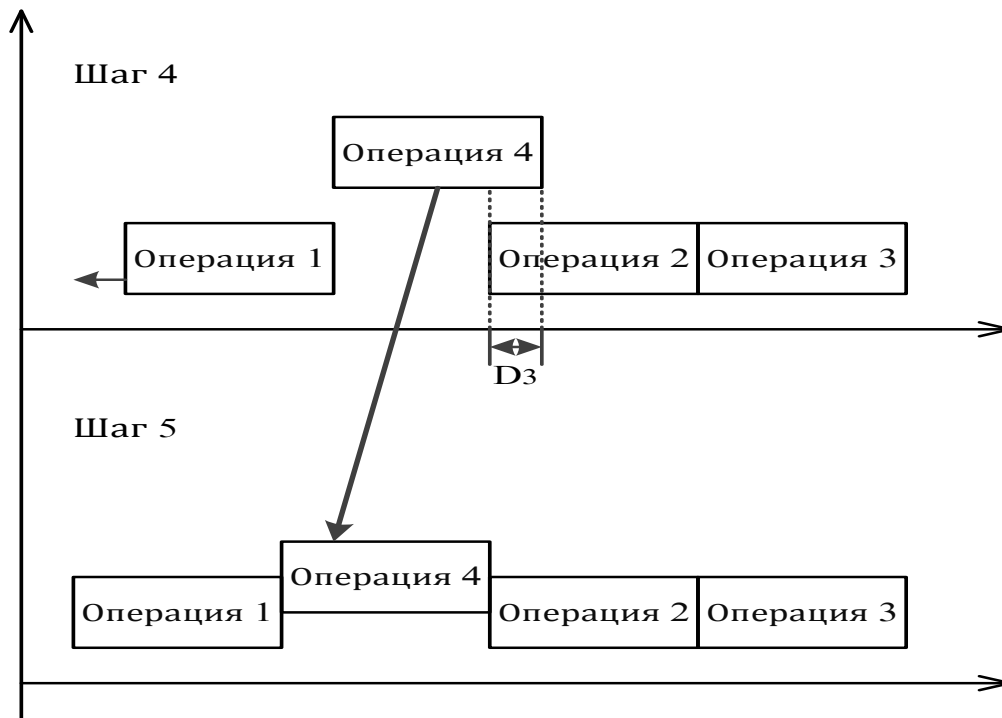


Рисунок 16.10. Сдвиг Операции 1 вперед во времени позволяет встроить Операцию 4.

Такой подход обеспечит ряд важных преимуществ по сравнению с традиционными методами планирования ресурсов [9].

В результате обеспечивается непрерывная оперативная, гибкая и эффективная адаптивная перестройка расписания работы цеха по событиям в реальном времени.

### Соединяя виртуальный и реальный миры

Мультиагентная система управления цехом связана с PLM- и ERP-системами ввода заказов, технологической подготовки производства, расчета заработной платы рабочих цеха, склада материалов и готовой продукции и другими.

В ближайшем будущем планируется обеспечить связь системы со станками для автоматической фиксации режимов и результатов обработки.

### Интерфейс пользователя

Разработанная система предлагает пользователям набор АРМов с графическим интерфейсом для управления ресурсами цеха.

Например, экран ввода заказов позволяет задавать новые заказы вручную или загружать их из отдела продажи изделий (Рисунок 16.11).

Здесь отображены все заказы для цеха с указанием текущего статуса, для которых предлагаются фильтры и средства сортировки заказов, ведется автоматический подсчет общей трудоемкости выделенных строк заказов.

При этом для удобства пользователей и снижения трудоемкости наполнения системы данными существующие заказы могут быть полностью перекопированы в новые заказы.

Статусы заказов цеха: не начат, на технологической проработке, на нормировании, в работе, запланирован, выполняется, выполнен, сдан, снят с производства, приостановлен и другие.

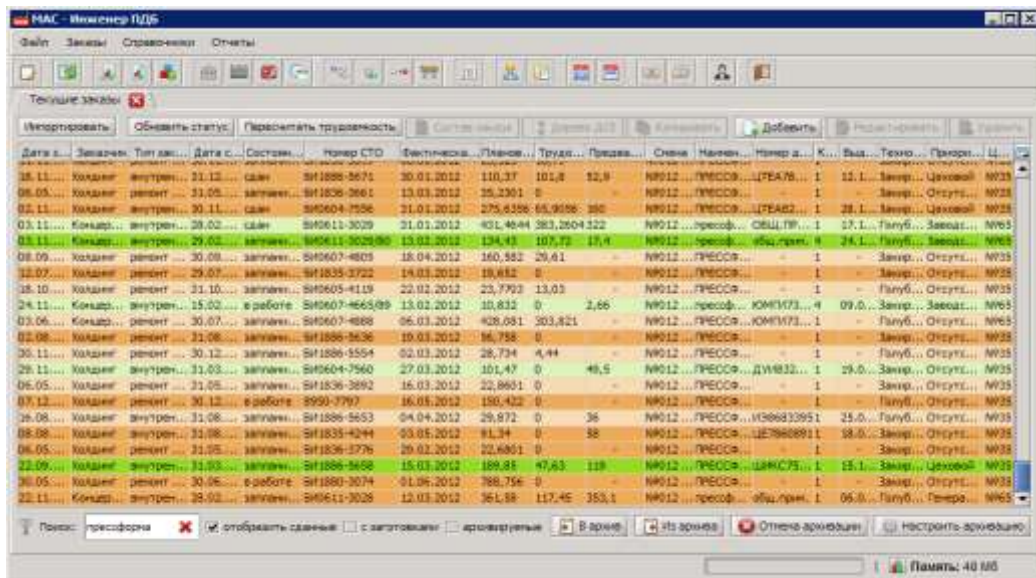


Рисунок 16.11. Окно ввода заказов на производство изделий

Цветовая градация:

- Зеленый цвет – фактическая дата изготовления заказа совпадает (или меньше) с датой по договору;
- Оранжевый цвет – фактическая дата изготовления заказа больше даты по договору;
- Белый цвет – заказ не запланирован (т.е. ни одна ДСЕ не выдана на выполнение).
- Насыщенный цвет (темно-зеленый или коричневый) соответствует внешнему заказу;
- Цвет средней интенсивности (зеленый или оранжевый) соответствует внутреннему заказу;
- Салатовый или желтый цвет соответствует ремонту оснастки.

В левом окне на экране подготовки заказов для планирования производства изделий (Рисунок 16.12) представлено дерево структуры изделия, а справа – список технологических операций для производства выбранной детали, где также указываются требования по компетенциям рабочих, материалам и инструментам второго порядка.

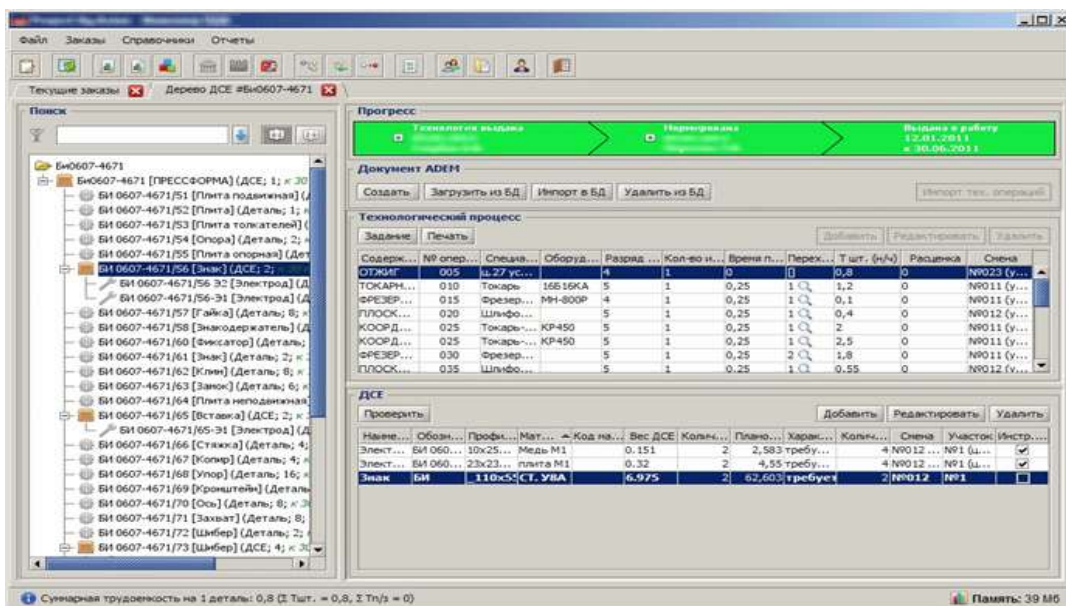


Рисунок 16.12. Экран подготовки заказов для планирования производства изделий

На рисунке 16.13 представлен дневной план рабочих цеха, показывающий загрузку рабочих технологическими операциями производства изделий на день.

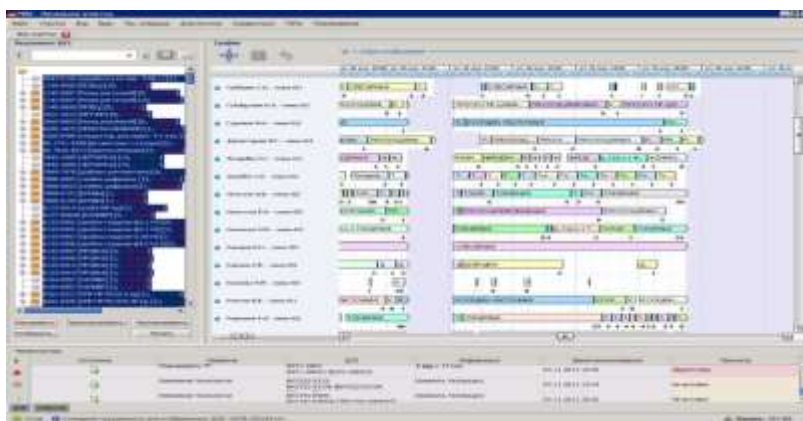


Рисунок 16.13. Оперативный план рабочих цеха

На рисунках 16.14 - 16 15 показаны фрагменты плана по выбранным заказам и подразделениям цеха машиностроительного предприятия.

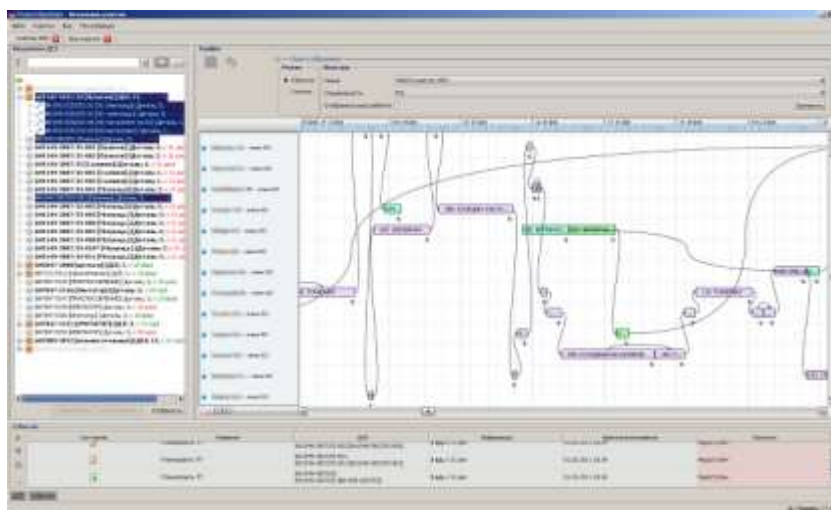


Рисунок 16.14. Пример развертки операций для одного из заказов

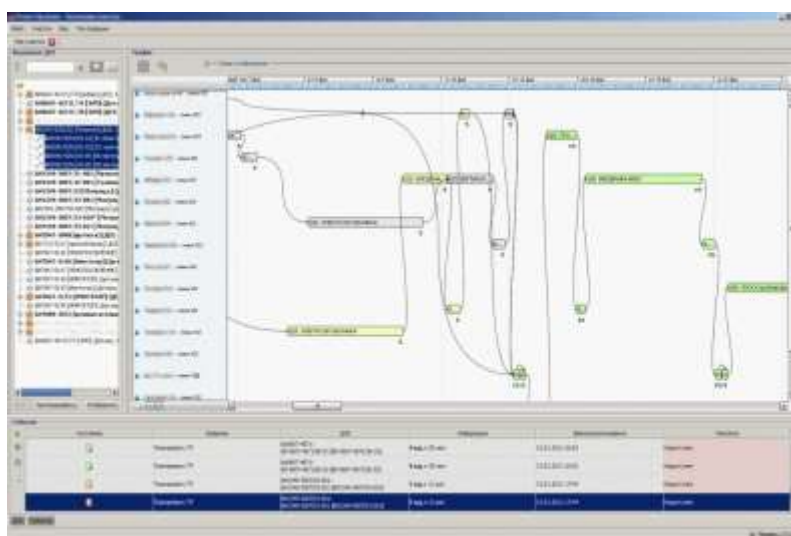


Рисунок 16.15. Пример развертки операций для другого заказа

На рисунке 16.16 показан пример отчета выполнения ССЗ рабочим, автоматически генерируемого системой.

Экран терминала рабочего представлен на рисунке 16.17.

№	Ф.И.О. рабочего	Таб. №	Смен-ный номер	Объектный номер БЭ	№	Вид	Норм. време-ни на выпол-нение	Задан-ная норма	Факт. выпол-нение	Дата начала	Дата окончания	Продол-жительность
1	Васильев П.И.	42904	III	88043-302/107-31	005	88043-302/107-31	5	20000	10000	10.02.2011 10:00	10.02.2011 10:00	00:00
2	Васильев П.И.	42904	III	7845-7976	005	7845-7976	0	84	0000	10.02.2011 10:00	10.02.2011 10:00	00:00
3	Васильев П.И.	42904	III	88043-302/107-31 (Проверка)	005	88043-302/107-31	1	1000	1000	10.02.2011 10:00	10.02.2011 10:00	00:00
4	Васильев П.И.	42904	III	88043-302/107-31 (Проверка)	005	88043-302/107-31	1	1000	1000	10.02.2011 10:00	10.02.2011 10:00	00:00
5	Васильев П.И.	42904	III	88043-302	005	88043-302	003	20	0200	10.02.2011 10:00	10.02.2011 10:00	00:00
6	Васильев П.И.	42904	III	88 183-795/33	045	88 183-795/33	4	8000	1000	10.02.2011 10:00	10.02.2011 10:00	00:00

Рисунок 16.16. Пример ССЗ для рабочего

**Смена №011 (Цех №11)**      **Мастер смены:**

Назад

**С** Время: 09:55      Дата: 01 январь 2011      Применить

**По** Время: 09:55      Дата: 28 февраль 2011

**Рабочий:** ВСЕ РАБОЧИЕ

№	Ф.И.О. рабочего	Таб. №	Числ. № БЭ	Наименование операции	Количество операций	Среднее время на операцию	Полное время (среднее время * кол-во)	Фактически выполненная работа	Дата начала	Дата окончания	Свойства
1	Васильев П.И.	42904	88043-302/107-31	ТОЖИРНАЯ	2	1,1	2,2	10000	10.02.2011 10:00	10.02.2011 10:00	Свойства
2	Васильев П.И.	42904	88043-302/107-31	ТОЖИРНАЯ	1	4,20	4,20	10000	10.02.2011 10:00	10.02.2011 10:00	Свойства
3	Васильев П.И.	42904	88043-302/107-31	КООРДИН. РАСТВОРА	2	0,80	1,60	10000	10.02.2011 10:00	10.02.2011 10:00	Свойства
4	Васильев П.И.	42904	88043-302/107-31	КООРДИН. РАСТВОРА	4	1,40	5,60	10000	10.02.2011 10:00	10.02.2011 10:00	Свойства
5	Васильев П.И.	42904	88043-302/107-31	КООРДИН. РАСТВОРА	1	1,70	1,70	10000	10.02.2011 10:00	10.02.2011 10:00	Свойства
6	Васильев П.И.	42904	88043-302/107-31	КООРДИН. РАСТВОРА	1	1,70	1,70	10000	10.02.2011 10:00	10.02.2011 10:00	Свойства

Рисунок 16.17. Терминал рабочего для получения заданий и ввода событий

В настоящее время ведется разработка версии терминала рабочего в системе на базе мобильного планшета.



## Развитие системы

Одновременно с внедрением системы в ряде отдельных цехов машиностроительных предприятий возникла новая задача разработки масштабируемой архитектуры системы для крупных предприятий, обладающих мощностями в 20-40 цехов, которые требуют согласованного взаимодействия и принятия решений [10].

Для создания такого рода крупных приложений был предложен сетевый подход, в котором для каждого цеха строится собственная мультиагентная система управления цехом, и все эти системы взаимодействуют для согласования решений через общую шину предприятия по p2p принципам (от англ. peer-to-peer - «каждый с каждым» и «равный с равным»). В результате две мультиагентные системы могут взаимодействовать через общую шину как раньше один агент – с другим, т.е. фактически как «рой роев» самоорганизующихся систем (Рисунок 16.18). При необходимости такой подход рекурсивно разворачивается и на последующие нижние уровни [11-14]. Например, если адаптивный планировщик одного из цехов оказывается слишком сложным, то тогда он может быть разбит на планировщики отдельных участков – также как планировщик крупного машиностроительного завода разворачивается на планировщики цехов.

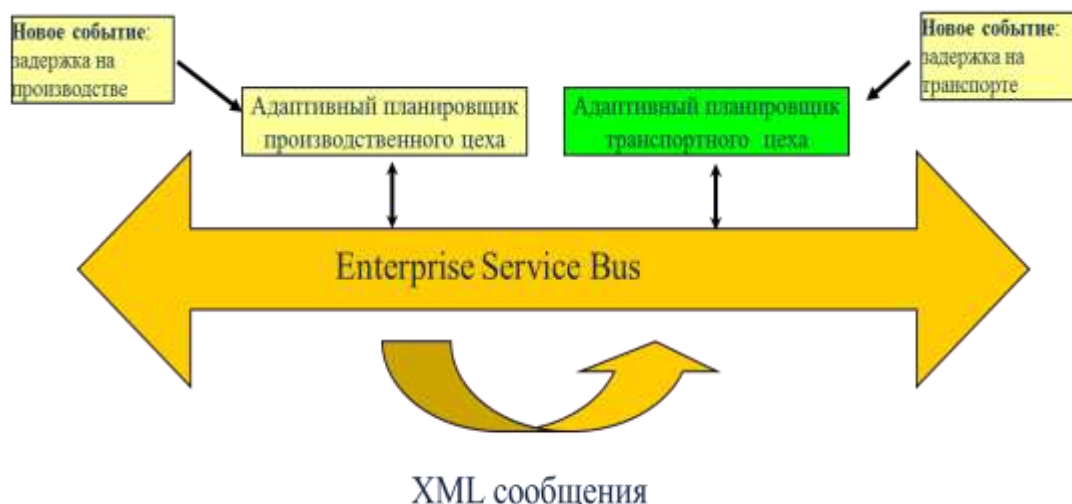


Рисунок 16.18. Сетевый «рой роев» планировщиков

Ниже приведены сценарии такого рода взаимодействий между системами:

- Сценарий 1: Производственный цех задерживается с производством изделия. Тогда транспорт, который запланирован на перевозку готового изделия клиенту, перепланируется, чтобы не стоять «у ворот» и не ждать производственный цех, и не терять деньги.
- Сценарий 2: Транспорт, который запланирован на перевозку готового изделия клиенту, опаздывает. Тогда цех перепланирует свою работу, и успевает дополнительно выполнить другой заказ, для которого важно выполниться как можно скорее.

Такого рода взаимодействие в рамках формирующейся системы систем можно рассматривать как ко-эволюцию самоорганизующихся систем.

Данный подход был в дальнейшем развит в НПК «Разумные решения» в рамках комплексного проекта с ОАО «Кузнецов», ОАО «Оборонпром» и ОАО «ОДК» при участии Самарского государственного аэрокосмического университета и при поддержке Министерства образования и науки РФ [14].

При этом общая архитектура была дополнена стратегическим планировщиком, позволяющим увидеть программу работы крупного машиностроительного предприятия на несколько лет вперед (Рисунок 16.19).



Рисунок 16.19. Многоуровневая сетевая мультиагентная система

В дальнейшем данный подход получил развитие в рамках интеграционного проекта «Adaptive Ramp-UP Management» («ARUM») по Европейской программе FP7 Smart Factory под руководством корпорации EADS и при участии Airbus и Iacobucci, а также ряда университетов Кельна, Манчестера, Праги, Браганки и других, специализирующихся на мультиагентных технологиях [15-17].

Более подробную информацию о международном проекте «ARUM» можно найти на специализированном сайте проекта [18], а также на официальном сайте Корпорации EADS [19].

В настоящее время ведется разработка новой методологии эффективного управления предприятиями машиностроительного комплекса на основе разработанных систем и технологий [20].

## Результаты

Первая промышленная версия адаптивного планировщика была разработана еще в 2011 году и уже в течение нескольких лет находится в постоянной работе на ряде предприятий, включая ОАО «Акссион-Холдинг», ОАО «АвиаАгрегат», ОАО «Кузнецов» и некоторые другие [21-27].

Система была признана «Лучшим программным продуктом в сфере автоматизированных систем управления» на XXII ежегодной выставке информационных и коммуникационных технологий Soft-tool – 2011.

На каждом предприятии систему ежедневно использует более 30 пользователей, включая преимущественно руководителей цехов, диспетчеров планово-диспетчерских отделов, мастеров, технологов, нормировщиков и контролеров.

В числе основных преимуществ применения системы пользователи отмечают следующие:

- Прозрачность работы цеха - теперь 100%, что позволяет наладить контроль и оптимизировать работы.

- Увеличилась производительность цеха при том же числе ресурсов.
- Введенные данные по объектам и технологическим процессам используются повторно, что приводит к росту производительности труда технологов и нормировщиков.
- Система цеха интегрирована в информационное пространство предприятия: заказы импортируются в МАС из ОУП предприятия, заработная плата рабочим начисляется на основе данных МАС и уходит в 1С.
- Благодаря интеграции с ОУП предприятия снижается нагрузка на планово-диспетчерское бюро цеха и увеличивается оперативность (скорость реакции) на поступление новых заказов, что в свою очередь ускоряет производство новых изделий.
- В системе поддерживается полный цикл управления: от ввода событий – к планированию и контролю результатов через отметки факта выполнения работ и анализу план против факта.
- План работы цеха может теперь в любой момент перестраиваться и пересчитываться быстро, гибко и с учетом индивидуальных особенностей каждого заказа и ресурса.
- Ускорился процесс перехода от бумажного к электронному хранению документов во всем цехе.
- Принимаемые решения становятся более надежными, обоснованными и точными, избавленными от ошибок людей.
- Стратегическое планирование также становится более простым, быстрым и удобным: специализированный АРМ «Мастер-план» строит производственное расписание на горизонт до 2 лет за время около 10-15 минут.
- Специальные знания мастеров о станках, технологиях и рабочих становятся объективными и могут быть использованы для дальнейшего повышения качества планирования.
- Создана платформа для развития цеха без роста численности управленческого персонала.

Отмечается существенное повышение эффективности управления цехами за счет следующих особенностей использования системы:

1. Появилась возможность анализа цикла производства (где и когда работа по данному заказу «застревала»: когда выдали технологию и когда пронормировали, когда пришел материал и выдали в работу, когда сдали заказ или на какой операции задержался заказ) - 256 нч/м.
2. Регулярно анализируется загруженность и производительность труда рабочих – 48 нч/м (уже в первые 3 месяца система показала, что не менее 17 % работ имеют завышенную трудоемкость).
3. Выполняется автоматическое формирование ССЗ на месяц вперед. До внедрения системы этот процесс отнимал 2 рабочих дня 4х человек. Экономия – 64 нч рабочего времени ежемесячно.
4. Автоматизированы все основные рутинные операции, что снижает трудоемкость управления (например, расценки считаются автоматически, автоматически подсчитываются объемы незавершенного производства, ССЗ формируется автоматически) – 528 нч/м.
5. Появился прогноз загрузки по основным видам работ, что дало возможность анализа потребности в рабочих той или иной специальности - 36 нч/м.

В результате внедрения системы экономия от внедрения в одном цеху составляет не менее 1163 нормо-часов в месяц, или 7 чел/мес в месяц, что в 2013 году соответствовало  $84 * 40$  т.р.= 3 360 000 руб. в год.

## Список литературы

1. Скобелев П. О. Интеллектуальная система внутрицехового планирования. // Сборник тезисов Всероссийской конференции с международным участием «Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации». г.Москва, 25-27 октября 2011 г. С.115-116.

2. Скобелев П. О., Иващенко А. В., Андреев М. В., Бабанин И. О. Мультиагентные технологии для управления распределением производственных ресурсов в реальном времени. // Вычислительные технологии в естественных науках. Перспективные компьютерные системы: устройства, методы и концепции: Труды семинара. Таруса, 24 марта 2011. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 110-122.
3. В.Ф. Шпилевой, П.О. Скобелев, Е.В. Симонова, А.В. Царев, С.С. Кожевников, Э.В. Кольбова, И.В. Майоров, Я.Ю. Шепилов. Разработка мультиагентной системы «Smart Factory» для оперативного управления ресурсами в режиме реального времени // Информационно-управляющие системы. – 2013. №6(67). – С. 91-98.
4. П.О. Скобелев, А.С. Вылегжанин, Я.Ю. Шепилов, Д.Н. Казанская, Д.В. Павлова, О.И. Храмова. Мультиагентная система SMART FACTORY для поддержки принятия решений по согласованному управлению цехами предприятий // Труды XVI Международной конференции “Проблемы управления и моделирования в сложных системах”, Самара, 30 июня-03 июля 2014г. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 245-252.
5. Баклашов В.И., Казанская Д.Н., Скобелев П.О. Шпилевой В.Ф., Шепилов Я.Ю. Мультиагентная система Smart Factory для адаптивного стратегического и оперативного управления цехами производства «точно в срок» и «под заданную стоимость» // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 16, №1(5), 2014. – С. 1292-1295.
6. П.О. Скобелев, Е.В. Симонова, С.С. Кожевников, И.В. Майоров. Разработка мультиагентной системы планирования, прогнозирования и моделирования производства // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. №1. – С. 22–30.
7. Баклашов В.И., Казанская Д.Н., Скобелев П.О. Шпилевой В.Ф., Шепилов Я.Ю. Мультиагентная система Smart Factory для адаптивного стратегического и оперативного управления цехами производства «точно в срок» и «под заданную стоимость» // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 16, №1(5), 2014. – С. 1292-1295.
8. Alexander Tsarev, Daria Kazanskaia, Petr Skobelev, Sergey Kozhevnikov, Vladimir Larukhin, Yaroslav Shepilov. Knowledge-driven adaptive production management based on real-time user feedback and ontology updates // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2013), October 13-16, 2013, Manchester, UK. – 2013. – P. 4755-4759. – DOI 10.1109/SMC.2013.809.
9. П.О. Скобелев, Е.В. Симонова, С.С. Кожевников, И.В. Майоров, А.Л. Феоктистов, Е.М. Клейменова, Е.В. Полончук. Обзор систем адаптивного планирования производства // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. №11. – С. 28–36.
10. Andreev M., Ivaschenko A., Skobelev P., Tsarev A. A Multi-Agent Platform Design for Adaptive Networks of Intelligent Production Schedulers. – 10th International IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Lisbon, Portugal, 1-2 July 2010. – Volume 10, Issue PART 1, 2010, P. 78-83.
11. Андреев М.В., Бабанин И.О., Кольбова Э.В., Скобелев П.О. Мультиагентные технологии для управления цехами промышленного предприятия в реальном времени / 7-я международная научно-техническая конференция «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования». Вологда, 13-15 марта 2012.
12. Alexey Goryachev, Sergey Kozhevnikov, Elina Kolbova, Oleg Kuznetsov, Elena Simonova, Petr Skobelev, Alexander Tsarev, Yaroslav Shepilov. «Smart Factory»: Intelligent System for Workshop Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling in Real Time. – Proceedings of the 2012 International Conference on Manufacturing (Manufacturing 2012), November 14-15, 2012, Macau, China. – Advanced Materials Research, Vol. 630 (2013), pp. 508-513, Trans Tech Publications, Switzerland.
13. Андреев М. В., Бабанин И. О., Иващенко А. В. Сетецентрический подход к созданию мультиагентной системы управления производством // Материалы Международной научно-практической мультиконференции «Управление большими системами», 14-16 ноября 2011, Москва, 2011. – Т.3. – С. 214-217.
14. А.В. Шишов, А.С. Вылегжанин, Д.В. Павлова, О.И. Храмова, Я.Ю. Шепилов. Разработка и внедрение АСУ «Кузнецов» с применением сетецентрического подхода и 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. 9050-9062..

15. П.О. Скобелев, П. Лейтао, Д.Н. Казанская, Я.Ю. Шепилов. Холоническая архитектура мультиагентной системы управления ресурсами предприятия // Труды XVI Международной конференции “Проблемы управления и моделирования в сложных системах”, Самара, 30 июня-03 июля 2014г. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 262-269.

16. Cesar A. Marin, Pavel Vrba, Paulo Leitao, Lars Monch, Georgios V. Lioudakis, Daria Kazanskaia, Vadim Chepegin, Liwei Liu, Jose Barbosa, Alexander Tsarev, Petr Skobelev, and Nikolay Mehandjiev. Application of Intelligent Service Bus in a Ramp-up Production Context // Proceedings of the 25th International Conference on Advanced Information Systems Engineering (CAiSE'13), June 17-21, 2013, Valencia, Spain. – P. 33-40.

17. Paulo Leitão, José Barbosa, Pavel Vrba, Petr Skobelev, Alexander Alexander, Daria Kazanskaia. Multi-agent System Approach for the Strategic Planning in Ramp-up Production of Small Lots // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2013), October 13-16, 2013, Manchester, UK. – 2013. – P. 4743-4748.– DOI 10.1109/SMC.2013.807.

18. ARUM Project web-site: <http://www.arum-project.eu/>

19. EADS-site: [http://www.eads.com/eads/int/en/news/press.20121105\\_eads\\_arum.html](http://www.eads.com/eads/int/en/news/press.20121105_eads_arum.html)

20. М.Ю. Тугаев, А.В. Речкалов, П.О. Скобелев. Управление машиностроительной корпорацией в реальном времени // 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. 9030-9043..

21. Daria Kazanskaia, Yaroslav Shepilov, Bjorn Madsen. Adaptive production management for small-lot enterprise // V. Marik, J.I. Martinez, P. Skobelev (Eds.): Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2015), September 2-4, 2015, Valencia, Spain. (in publishing)

22. Андреев М. В., Бабанин И. О., Вылегжанин А. С., Иващенко А. В., Кольбова Э. В., Скобелев П.О. Мультиагентная система управления инструментальным цехом. // Труды XIII Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах", Самара, 15-17 июня 2011г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. – С. 451-459..

23. Андреев М. В., Иващенко А. В., Скобелев П.О., Кривенок С. А. Мультиагентная система распределения производственных ресурсов в тяжелом машиностроении. // Программные продукты и системы. 2010. № 3. – С.15-23.

24. И.Ю. Тюрин, А.С. Вылегжанин, М.В. Андреев, Э.В. Кольбова, П.О. Скобелев, Я.Ю. Шепилов. Результаты внедрения и перспективы развития мультиагентной системы для оперативного управления инструментальным цехом ОАО "ИЖЕВСКИЙ МОТОЗАВОД – АКСИОН ХОЛДИНГ" // Труды XIV Международной конференции “Проблемы управления и моделирования в сложных системах”, Самара, 22-25 июня 2012г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. – С. 735-740.

25. И.Ю. Тюрин, А.С. Вылегжанин, Э.В. Кольбова, П.О. Скобелев, Я.Ю. Шепилов. Опыт разработки и внедрения мультиагентной системы для оперативного управления инструментальным цехом ОАО «ИЖЕВСКИЙ МОТОЗАВОД – АКСИОН ХОЛДИНГ» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. № 11. – С. 15-19.

26. Ivan Tyrin, Andrey Vylegzhaniin, Elina Kolbova, Oleg Kuznetsov, Petr Skobelev, Alexander Tsarev, Yaroslav Shepilov. Multi-Agent System “Smart Factory” for Real-time Workshop Management: Results of Design & Implementation for Izhevsk Axion-Holding Factory. – Proceedings of the 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFa 2012), September 17-22, 2012, Krakow, Poland. – 4 pp. – DOI 10.1109/ETFa.2012.6489694.

27. V. Shpilevoy, A. Shishov, P. Skobelev, D. Kazanskaia, Ya. Shepilov, A. Tsarev. Multi-agent system “Smart Factory” for real-time workshop management in aircraft jet engines production // Proc. of the 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'13), May 22-24 2013, São Paulo, Brazil. 2013. – P. 204-209.

# ГЛАВА 17: Адаптивное управление мобильными бригадами

## Проблема

Наш заказчик управляет крупной региональной сетью мобильных аварийно-ремонтных бригад, включающей центр приема звонков, центральную диспетчерскую и 27 специально оснащенных мобильных бригад техников, обслуживающих газовые хозяйства промышленных предприятий и сотни тысяч жителей региона.

Мы включились в проект, когда общего центра приема звонков и центральной диспетчерской еще не было и мобильные бригады были распределены и работали по районам, в результате, из-за неравномерности поступления заказов, одни бригады постоянно простаивали, а другие, наоборот, были все время перегружены.

При этом первоначальный порядок выдачи заданий бригадам предполагал, что команды специалистов прибывают утром в офис и получают от диспетчеров на руки задания, после чего разъезжаются по заданиям до вечера. Очевидно, что даже при наличии GPS/ГЛОНАСС датчиков на борту автомобиля, было трудно перенаправлять бригады на новые важные аварийные и ремонтные заявки, т.к. совершенно были непонятны возникающие планы объезда вызовов.

Как следствие, накапливались необработанные заявки, что снижало показатели работы компании, формировались неэффективные маршруты с пробегом излишних километров, были недовольны потребители газа, поскольку было трудно спланировать работу бригад и т.д.

При этом диспетчеры были перегружены и недовольны работой и концентрировались только на своих заявках, не имея общей картины ситуации, а попытки скоординировать работу службы при возникновении непредвиденных срочных заявок наталкивались на сопротивление бригад, отчего еще больше росло количество приоритетных, но не удовлетворенных запросов.

При этом планы достаточно часто нарушались в связи с изменениями ситуации, включая отмены заявок, поломки транспорта, задержки при выполнении задач и т.д.

В результате нашего предварительного исследования были выявлены следующие ключевые проблемные особенности процессов планирования:

1. Сложность распределения большого количества заявок при ограниченных ресурсах и под прессом времени.
2. Необходимость оперативно, гибко и эффективно реагировать в условиях неопределенности и быстро изменяющейся ситуации.
3. Высокая нагрузка на диспетчеров, несущих груз персональной ответственности.
4. Низкая эффективность работы мобильных бригад из-за неоптимального распределения ресурсов по заявкам, как результат - задержки, высокий холостой пробег, простои или дефицит квалифицированных и хорошо оснащенных бригад.
5. Необходимость индивидуального подхода к каждой поступившей заявке и ресурсу.
6. Недостаточная оперативность и скоординированность работы бригады и диспетчеров.
7. Человеческий фактор как причина ошибок и недоразумений.
8. Трудности роста бизнеса компании с дальнейшим ростом числа потребителей.

Заказчик вынужден был начать поиск решения проблемы и за значительный период времени изучил все имевшиеся предложения на рынке.

Для решения проблемы было решено найти адаптивный планировщик, способный в первую очередь уменьшить:

- трудоемкость и время планирования задач по обслуживанию;
- общий пробег автотранспорта обслуживающих бригад;
- время, необходимое для отработки заявок по обслуживанию;

- общее число невыполненных заявок клиентов и т.д.

Другими словами, клиенту требовался адаптивный планировщик, способный повысить производительность и эффективность работы мобильных аварийно-ремонтных бригад.

Подобные задачи характерны и для многих других предметных областей работы мобильных бригад, включая пожарные машины, скорую помощь, полицейские бригады, бригады электриков и водоканала и другие [1].

## Решение

Для решения проблемы была разработана мультиагентная система управления мобильными бригадами в реальном времени, способная распределять, планировать и оптимизировать задачи между бригадами «на лету» по поступающим событиям.

Основные функции разработанной системы включают следующие:

- Ведение справочников бригад и смен.
- База знаний для формализации и накопления особенностей заказов и ресурсов.
- Интеллектуальная поддержка принятия решения диспетчера в выборе ресурсов для выполнения заявок:
  - анализ ситуации в реальном времени;
  - выбор бригады, наиболее подходящей для выполнения задания;
  - построение маршрута движения бригады с учетом дорог, знаков ПДД, пробок и т.д.;
  - построение расписания движения бригады и времени доезда;
  - адаптация расписания при возникновении непредвиденных событий;
  - минимизация времени доезда (как можно скорее на важных заявках);
  - сокращение общего пробега (на заявках низкой значимости);
  - мониторинг и контроль исполнения задания.
- Оперативное адаптивное планирование работ бригад по событиям в реальном времени (с изменением планов ранее назначенных работ).
  - Обеспечение индивидуального подхода к планированию каждого заказа.
  - Отображение маршрутов и расписаний на электронной карте.
  - Мониторинг и контроль исполнения бизнес процессов с использованием недорогих мобильных телефонов.
  - Перепланирование в случае расхождения плана и факта.
  - Интеграция с системой приема заявок (Call Center), учетными системами, зарплатой и другими.
  - Построение отчетов по работе бригад.

В настоящее время разработанная система предлагается пользователям в 3 вариантах:

1. Лицензионный - стандартный адаптивный планировщик, установленный на сервере заказчика, к которому пользователи получают доступ через локальную сеть или через сеть Интернет.

2. Индивидуальный планировщик – планировщик, дорабатываемый в соответствии с потребностями клиента на основе специальных требований.

3. Планирование как SaaS услуга (Software-as-a-Service) - пользователи платят абонентскую плату за доступ к адаптивному планировщику по необходимости.

В любом случае взаимодействие с конечными пользователями системы обеспечивается через мобильный телефон бригадира мобильной бригады, куда поступает информация о

заказах, и куда бригадой может вводиться информация о событиях: успешном завершении заказа, задержках и поломках, оставшемся времени до завершения заказа и др.

На рисунке 17.1 ниже представлена диаграмма, описывающая общую архитектуру и работу системы.

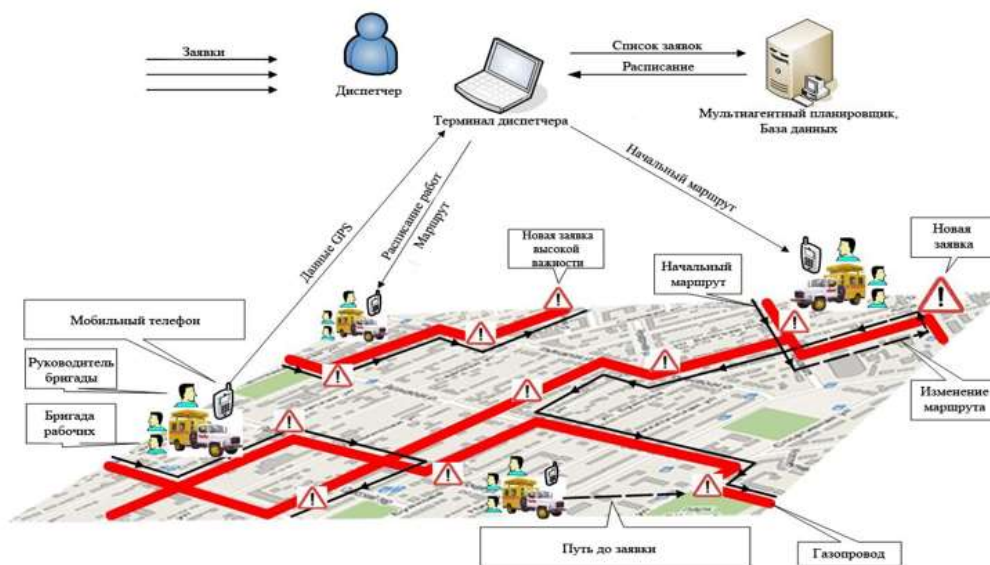


Рисунок 17.1. Адаптивное планирование обслуживающих бригад

Новые заявки поступают в центр приема телефонных звонков, где телефонистки вводят в систему заявки и видят их на карте, после чего заявки поступают диспетчерам.

Система, зная всю информацию о заявке и располагая данными о положении, текущей загрузке и планах бригад, подбирает ближайшую команду, которая находится неподалеку и вот-вот должна освободиться, и предлагает ей заявку, в случае успеха – бригада бронируется под заявку.

При этом если новая заявка появляется в дальнем районе рядом с бригадой, которая освобождается в ближайшее время, диспетчер может договориться с клиентом, что бригада тут же подъедет, и тогда ей не требуется возвращаться на базу и потом снова ехать в дальний район, что позволяет экономить силы и время и сократить холостой пробег бригады.

Аналогичным образом, возможна перестройка маршрута при появлении пробок или ремонтов дорог, а также любых других непредвиденных событий.

## База знаний

Основные классы объектов, хранящихся в онтологии, включают такие объекты как: Заявка, Аварийно-ремонтная бригада, Смена, Транспорт и Маршрут, Оборудование машины и т.д.

Примеры атрибутов для объекта «Заявка»: Месторасположение, Важность, Ожидаемая длительность, Технические характеристики; для объекта «Бригада»: Количество членов, Квалификация исполнителей и Оборудование машины.

Важной частью Базы знаний является сцена, отражающая текущее положение и планы бригад в настоящий момент времени, которая показывает, в частности, какая обслуживающая бригада над какой заявкой работает в текущий момент времени.

Сцена изменяется с поступлением каждого нового события, все изменения сохраняются для последующего аудита принятых решений.





Карта системы легко масштабируется, показывая регион и районы обслуживания (Рисунки 17.3 – 17.5).



Рисунок 17.3. Карта системы легко масштабируется: регион обслуживания

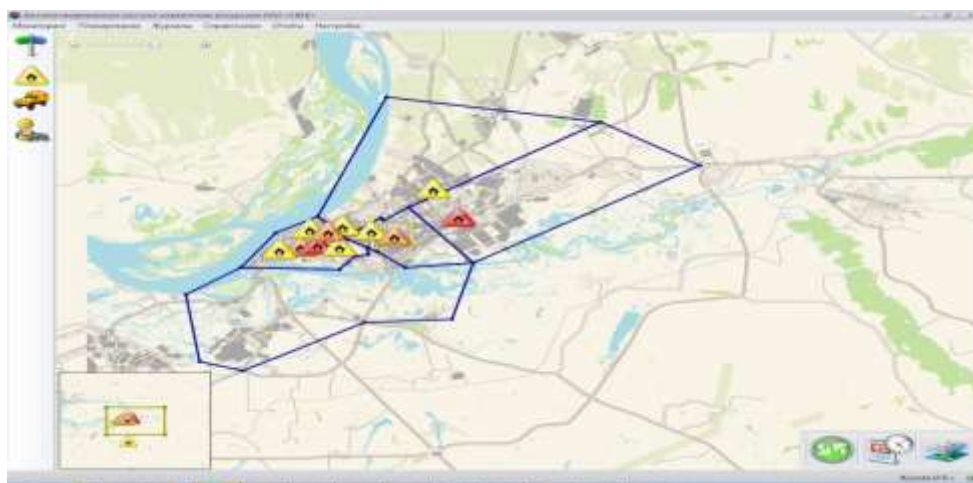


Рисунок 17.4. Районы обслуживания



Рисунок 17.5. Заявки в привязке к местам запросов

Бригады получают заявки на сотовые телефоны с визуализацией параметров заказов, точного географического адреса, телефонов клиентов и т.д. (Рисунок 17.6).

При приходе и распределении заявок выполняется поиск наиболее подходящей бригады, динамическое построение маршрутов и планов доезда и работы на объекте (Рисунок 17.7).



Рисунок 17.6. Отображение параметров заявок на сотовых телефонах бригадиров

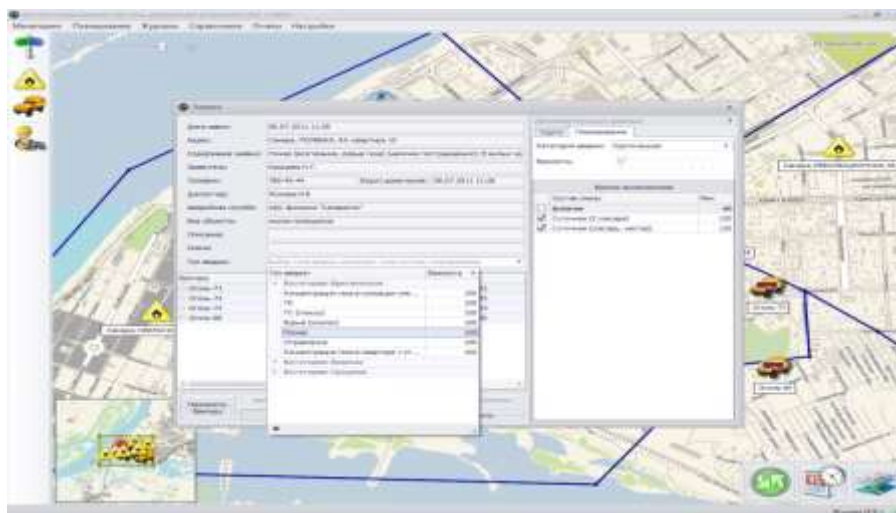


Рисунок 17.7. Варианты решений по планированию бригад на заявки

Построенные планы работы бригад могут в дальнейшем гибко перестраиваться по событиям, поступающим в реальном времени (Рисунок 17.8).

При приходе событий также перестраиваются и маршруты движения (Рисунок 17.9).

Предложения по изменению к планам предлагаются диспетчеру, который выбирает и утверждает наиболее подходящий вариант (Рисунок 17.10), после чего изменения фиксируются в плане на текущий момент времени (Рисунок 17.11) и высылаются выбранной бригаде на сотовый телефон бригадиру.

По результатам работы бригад строятся различные отчеты, которые передаются руководству и в бухгалтерию для выплаты зарплаты и премий (Рисунки 17.12-17.15).



Рисунок 17.8. Предлагаемые изменения в расписании

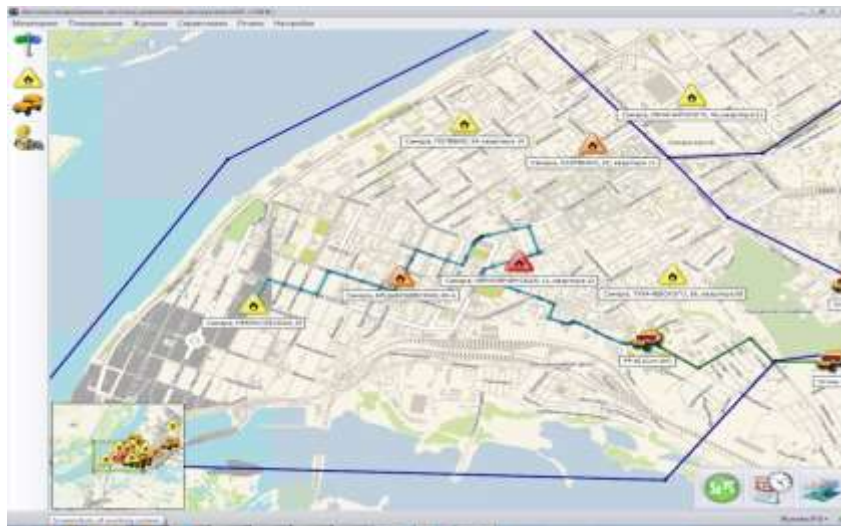


Рисунок 17.9. Перестройка маршрута движения для выполнения заявки

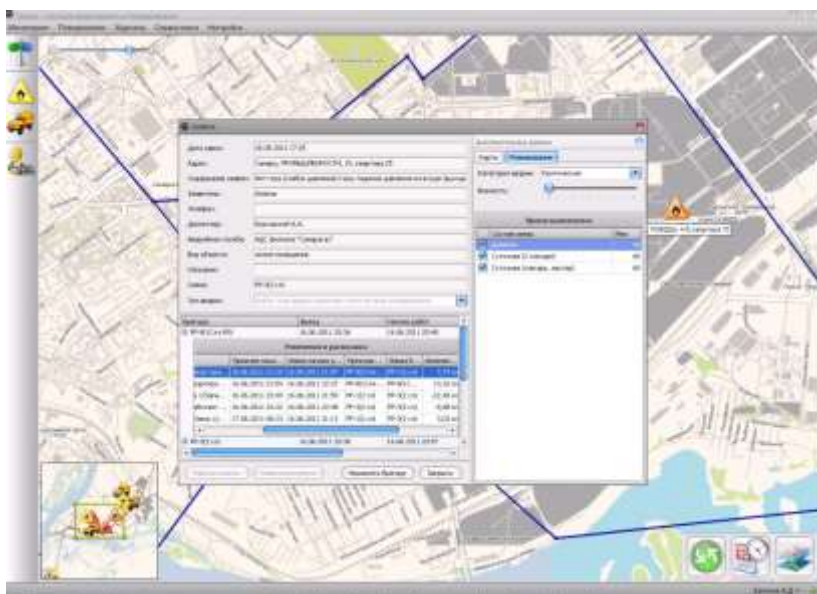


Рисунок 17.10. Выбор и утверждение диспетчером изменений в плане



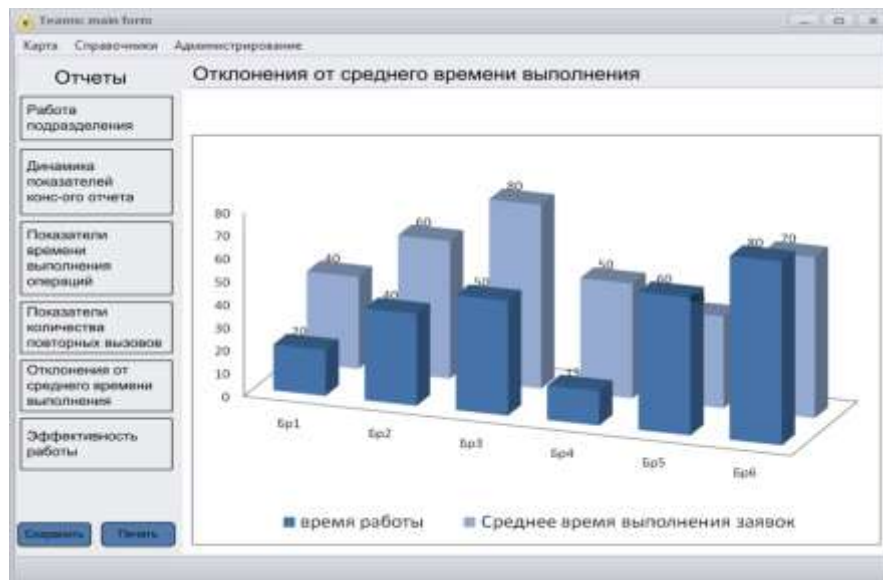


Рисунок 17.14. Отчеты по отклонениям

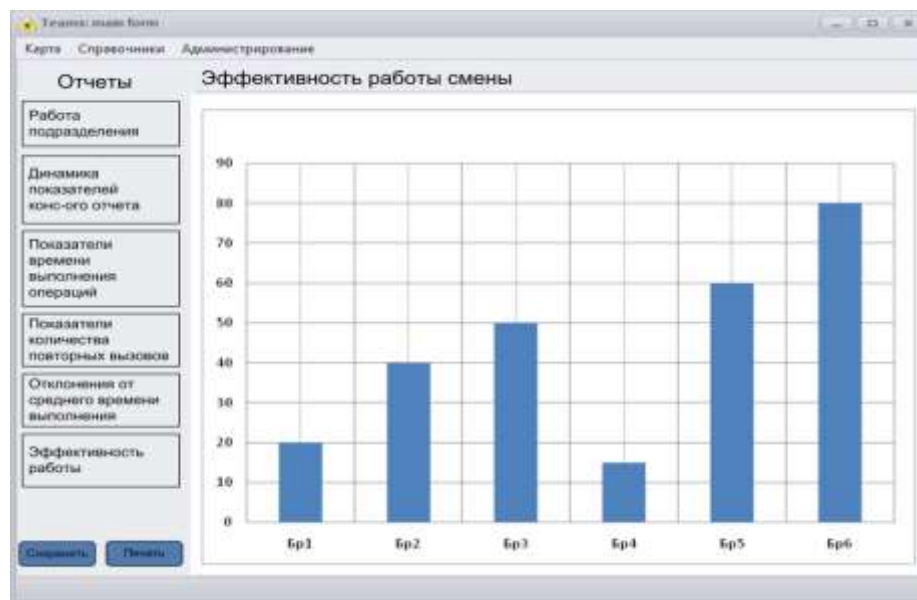


Рисунок 17.15. Отчеты по эффективности бригад

На начальном этапе внедрения система встретила серьезное сопротивление со стороны специалистов и рабочих бригад, но все противоречия были сняты, когда повышение эффективности работы бригад было напрямую связано с начислением премий в увязке с ростом компетенций.

Такой подход еще раз показывает, что внедрение разработанных систем должно изначально увязываться с ростом знаний и умений специалистов и решением вопросов мотивации работников по достигаемым результатам.

## Результаты

Использование адаптивного планировщика для обработки поступающих заявок в реальном времени позволило достичь повышения продуктивности обслуживающих бригад на 40%, поскольку каждая бригада газовой службы в настоящее время выполняет в среднем 12 задач в день вместо прежних 7 в день [2].

Кроме того, разработанный планировщик позволяет операторам, техническим специалистам, диспетчерам и руководству компании в любой момент времени получать четкую картину

работы всех бригад, включая не только отображение позиции бригады на карте, но собственно план работы бригады на выбранном горизонте времени, а именно, какая бригада над какой задачей работает и где сейчас находится; текущий прогресс выполнения задач для каждой бригады; количество заявок, которые еще не обслужены; текущая продуктивность каждого отдельно взятого специалиста службы и каждой обслуживающей бригады, а также предприятия как в целом, так и по удельным затратам на каждую операцию.

Важные результаты, которые отмечались заказчиком по результатам внедрения, включают:

- сокращение времени реакции на непредвиденные события;
- повышение заинтересованности и продуктивности работы бригад;
- поддержка гибкого планирования в реальном времени;
- сокращение трудоемкости и числа ошибок диспетчеров;
- сокращение времени обучения новых диспетчеров.

Мультиагентная система «Smart Field Service» на международной выставке «Soft-Tools - 2011» получила приз «Продукт года» в номинации «Самый технологичный Стартап года».

## Список литературы

1. Дязитдинова А. Р., Иващенко А. В., Кожевников С. С., Ларюхин В. Б., Очков Д. С., Скобелев П. О., Царев А. В. Мультиагентное управление ресурсами автоматизированной диспетчерской ремонтных бригад // Труды XIII Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара. 22-25 июня 2011 г. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. – С.443-450.
2. С.В. Блинов, В.Е. Сердюк, Г.В. Онищенко, П.О. Скобелев, В.Б. Ларюхин, Д.С.Очков, А.В. Царев, В.А. Тomin. Мультиагентная система управления мобильными бригадами для Средневолжской газовой компании // Труды XIV Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах", Самара, 22-25 июня 2012г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. – С. 741-745.

# ГЛАВА 18: Адаптивное управление проектами НИОКР

## Проблема

Современные подходы к организации процессов управления на промышленных предприятиях характеризуются переходом от традиционных иерархических – к сетевым структурам, в которых квалифицированные специалисты могут принимать участие одновременно во многих командах по проектам [1-3].

Эти особенности по нашим оценкам в последнее время оказываются весьма характерны и для аэрокосмической промышленности (Таблица 18.1).

Таблица 18.1. Оценка объема сложности проектов в аэрокосмической промышленности

Классы изделий (на примере ОАО РКК «Энергия»)	Количество задач в проекте
Космическая система Дистанционного Зондирования Земли (ДЗЗ) (без КА)	более 3000
Космический аппарат (КА) ДЗЗ	около 3940
Наземный комплекс управления	более 1100
Центр управления космической системой	более 1000
Стационарный наземный комплекс приема и обработки изображений	более 250
Мобильный наземный комплекс приема и обработки изображений	более 300
Учебно-проектный центр	более 220

Проекты научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР) образцов новой техники в аэрокосмической промышленности всегда отличает сложность, уникальность, индивидуальный подход к каждому изделию, высокая степень инноваций, особые требования к надежности и т.д.

Проблема планирования таких проектов для российских предприятий становится особенно актуальной и значимой в связи с обострением конкуренции в аэрокосмической отрасли, где все больший объем рынка получают предприятия США и Европы, Китая и других стран. Для комплексных проектов эксплуатации сложных изделий, как, например, Международная космическая станция, управление проектами представляет еще большую сложность, поскольку отличается многофункциональностью изделий, большим числом поставщиков, высокими требованиями к точности и т.д.

Кроме того, важнейшей особенностью таких проектов является динамика, связанная с непредвиденными событиями, изменяющимися планами, к числу которых могут относиться запуск нового проекта, замены в команде специалистов, пересмотр требований, поступление данных испытаний и т.д. Эти события приводят к необходимости оперативно вовлекать новые или перераспределять имеющиеся ресурсы, что усложняет и затрудняет принятие решений и требует применения специальных подходов, методов и средств для согласованного перераспределения ресурсов в проектах.

При этом по данным Standish Group, даже по более простым проектам только 32% являются успешными, 44% являются спорными, например, имеющими перерасход средств, превышение бюджета, другие недостатки, а 24% являются провальными.

Вместе с тем, в классической постановке задачи управления проектами до сих пор доминирует иерархический подход, и всем участникам предписывается «оптимальный» план действий «сверху», но сами участники команды проекта «снизу», со своими индивидуальными мнениями, предпочтениями и ограничениями, оказываются вне рассмотрения. Также



предполагается, что все задачи и ресурсы априори известны и не меняются с течением времени, хотя реально приходится постоянно иметь дело с непредвиденными событиями, нарушающими планы, которые требуют немедленной реакции в реальном времени для возврата к заданным срокам.

В существующих на сегодняшний день системах для управления проектами (Microsoft Project, PrimaVera, Windchill и многие другие) методы и средства для согласованного оперативного распределения задач по ресурсам в реальном времени отсутствуют в принципе, поскольку эти системы работают в пакетном режиме и задачи автоматически назначаются сотрудникам без какого-либо диалога и согласования.

Решение проблемы требует применения специальных подходов, моделей, методов и средств для оперативного распределения ресурсов в реальном времени «на лету» для успешного исполнения работ.

Нашим первым заказчиком на адаптивное управление проектами стало одно из крупнейших в мировой космонавтике предприятий, которое одновременно выполняет целый ряд важных проектов в общем наборе ресурсов.

## Решение

Для решения проблемы была разработана мультиагентная система для поддержки принятия решений по оперативному распределению ресурсов в проектах, позволяющая в рамках директивных планов-графиков выполнять согласованное планирование задач и ресурсов «снизу», давая творческий простор исполнителям для поиска альтернативных вариантов реализации [4-5].

При этом руководители подразделений не теряют «рычаги» управления, а наоборот, получают большие возможности в автоматическом событийном распределении задач по сотрудникам, планировании и оптимизации процессов выполнения работ, опережающем прогнозировании хода проектов для разрешения проблемных ситуаций.

Общая структура разработанной системы, ориентированная на разбор конфликтов между задачами и ресурсами при появлении непредвиденных событий, представлена на рисунке 18.1.

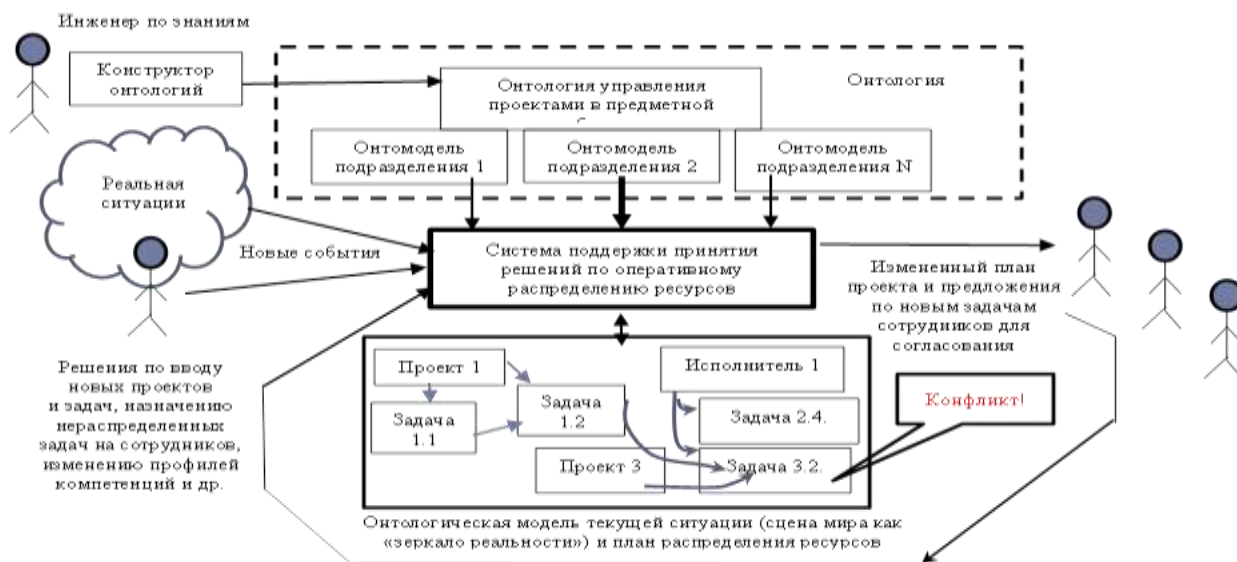


Рисунок 18.1. Общая структура системы адаптивного управления проектами

Разработанная система была в дальнейшем существенно доработана для внедрения в РКК «Энергия» [6-7].



## Виртуальный Мир

Виртуальный Мир системы представлен следующими основными агентами, показанными в таблице 18.2.

Таблица 18.2. Основные классы агентов в Виртуальном мире системы

Агент	Тип	Цели и задачи	Ограничения
Агент задачи	Агент потребности	Оказаться выполненной в указанные сроки, с максимальным качеством, минимальной стоимостью и риском, поиск ресурсов, решение конфликтов	Для выполнения требуется свободный ресурс (исполнитель) желаемой специализации и квалификации
Агент исполнителя	Агент возможности	Быть максимально загруженным и успешно выполнить все запланированные задачи, ищет задачи и решает конфликты	Длительность работы (например, 8-часовой рабочий день), квалификация, стоимость
Агент подразделения	Агент возможности	Равномерная загрузка исполнителей, выделение новых исполнителей, выявление и расшивка «узких мест» и расчет показателей, изменение стратегий нижним агентам	Временные факторы и ограниченные ресурсы
Агент проекта	Агент потребности	Выполнить все задачи в срок и как можно дешевле, быстро и с высоким качеством	Задачи обладают взаимосвязями и другими ограничениями

Все решения по построению планов проектов принимаются на основе переговоров агентов по следующей модели: Агенты задач отправляют сообщения Агентам Исполнителей с требуемыми навыками, предлагая им принять участие в выполнении задачи и определяя сроки работы. Доступные Агенты Исполнителей отправляют свои предложения по выполнению задач. Агенты Задач предлагают участие в проекте агентам Исполнителей, которые выслали лучшие предложения.

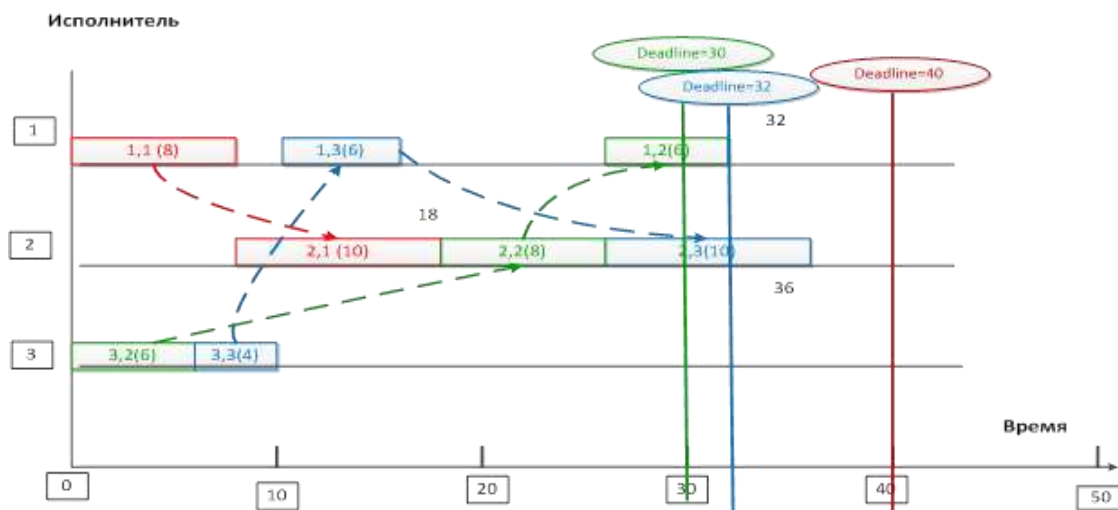


Рисунок 18.3. Пример распределения задач между исполнителями

В разработанной модификации метода сопряженных взаимодействий на первой стадии (бесконфликтного планирования) задачи проектов «обтекают» занятые места в расписании и располагаются друг за другом. Проекты заполняют своими задачами свободные слоты

времени соответствующих ресурсов. Отдельные проекты показаны здесь разным цветом (Рисунок 18.3). Штриховыми стрелками показан порядок связанных подзадач. Число под последней подзадачей каждого проекта означает текущее время завершения задач каждого проекта.

На второй стадии (проактивность) в дело вступают неудовлетворенные агенты заказов и ресурсов, которые пытаются улучшить свое положение.

Решения о распределении сотрудников между задачами проекта принимаются с учетом таких критериев, как минимизация стоимости и времени завершения, повышение качества работы за счет использования наиболее опытных исполнителей и минимизация выявленных рисков (Рисунок 18.4).

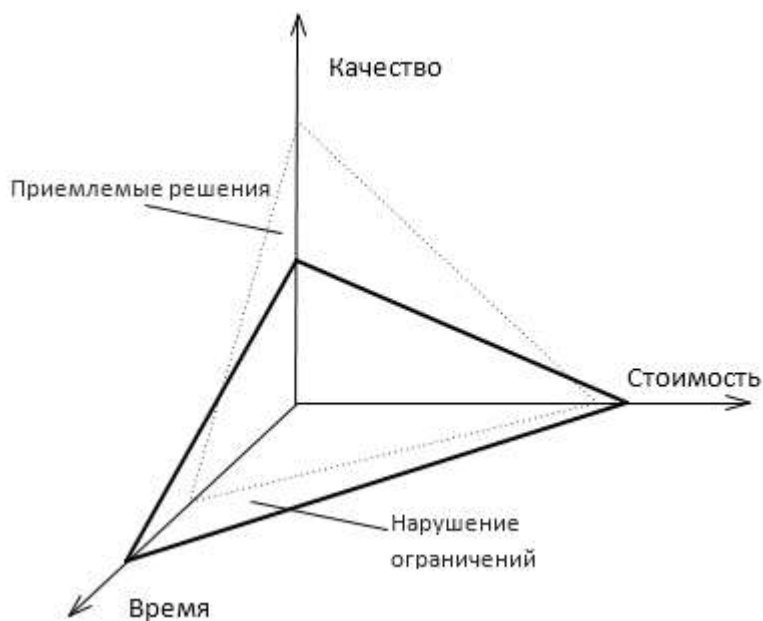


Рисунок 18.4. Решения о распределении задач на сотрудников принимаются с учетом многих критериев

При появлении новой задачи создается новый Агент Задачи, который смотрит онтологию на предмет компетенций исполнителей, которых требуется привлечь, после чего ищет таких специалистов в сцене. Затем этот Агент контактирует с Агентами Исполнителей, приглашая их принять участие в проекте.

При этом после начального размещения задач по ресурсам включается фаза проактивности, позволяя Агентам Исполнителей, недовольным результатом предыдущего планирования, улучшить свое положение.

При этом сотрудники предприятия могут одновременно участвовать в нескольких проектах, являясь разделяемыми ресурсами нескольких проектов.

### Соединяя виртуальный и реальный миры

В архитектуре разработанной системы имеется серверная компонента, включающая сервер приложения и базы данных, а также виртуальный мир, представляющий модель реального мира.

Взаимодействие с реальным миром осуществляется посредством АРМов руководителя и исполнителей проекта, которые могут коммуницировать по событиям с пользователями.

## Интерфейс пользователя

Пример экрана в интерфейсе пользователя разработанной системы, показывающего план работы по проекту, представлен на рисунке 18.5.

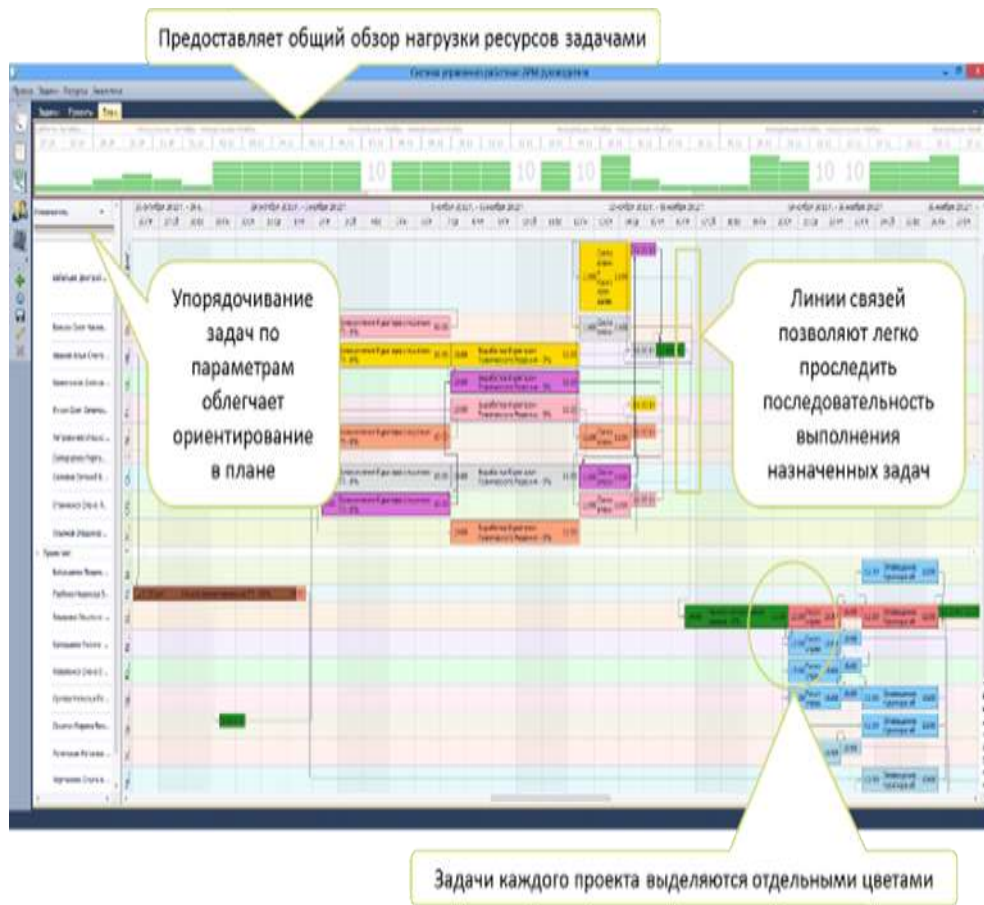


Рисунок 18.5. Диаграмма Гант-Чарт для представления списка задач по проекту

На рисунках 18.6 – 18.7 представлены примеры отчетов по ходу выполнения проектов для руководства проектов.

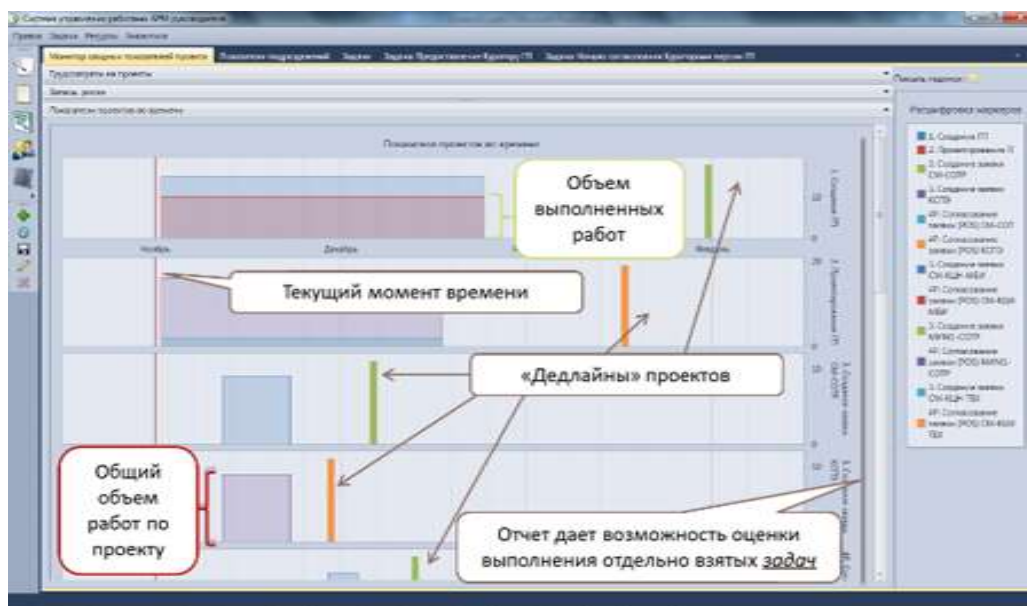


Рисунок 18.6. Диаграмма Гант-Чарт для представления список задач по проекту

Ключевым компонентом является АРМ пользователя-исполнителя задач проекта, посредством которого осуществляется взаимодействие пользователей с системой и согласованное принятие решений по выбору исполнителей и срокам начала и завершения задач (Рисунок 18.8), а также ввод непредвиденных событий со стороны пользователей.

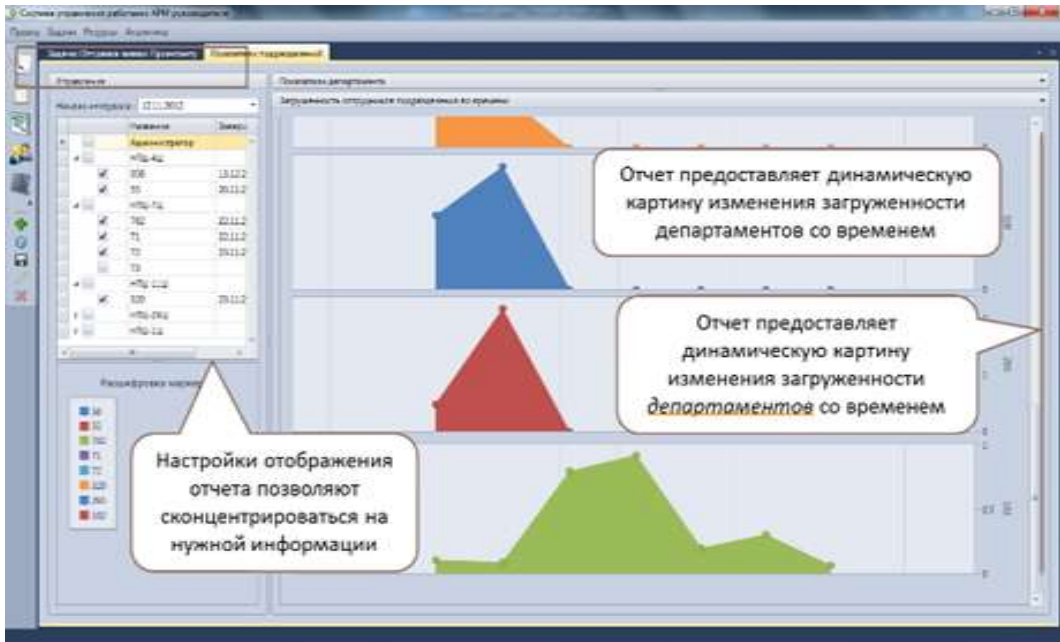


Рисунок 18.7. Диаграмма Гант-Чарт для представления список задач по проекту

The screenshot displays a task management interface. On the right, a detailed view for a specialist in department 73 shows a list of tasks with their planned start and end times and deadlines. On the left, a dialog box is open, showing a task and a confirmation prompt.

**Task List (Right Panel):**

- Task 1: По плану с 07 декабря 17:00 по 13 декабря 10:00. Срок - 31 января
- Task 2: По плану с 20 декабря 10:00 по 21 декабря 10:00.
- Task 3: По плану с 21 декабря 10:00 по 24 декабря 12:00.
- Task 4: По плану с 24 декабря 12:00 по 25 декабря 15:00.

**Dialog Box (Left Panel):**

Здравствуйте, [Имя] [Фамилия] [Отчество]!

Я задача «[Название задачи]». Можете ли вы рассмотреть возможность встроить меня в свой план с 15 октября 08:01 по 17 октября 08:01? Срок - 1 февраля

Buttons: , ,

Рисунок 18.8. Список текущих задач по всем проектам у исполнителя

Агент новой задачи, предварительно назначенной на исполнителя, вступает здесь в прямой диалог с исполнителем, уточняя сроки начала и завершения задачи, а также возможные риски [9].

Если предлагаемые исполнителем сроки выполнения задачи не устраивают систему, то может быть сделан аналогичный запрос к другому исполнителю, что создает конкуренцию между исполнителями в борьбе за задачи, каждая из которых при этом приносит исполнителю дополнительную оплату по проекту.

Таким образом, предлагаемый подход поддерживает поэтапный переход предприятий к управлению по результатам.

## Результаты

Разработанная первая система адаптивного управления проектами была запущена в опытную эксплуатацию в ОАО «РКК «Энергия» в 2014 году [10].

Первые результаты внедрения позволяют сделать следующие предварительные оценки эффективности применения системы:

- увеличение производительности участников проекта - от 10% до 15%;
- сокращение трудоемкости и числа сотрудников, необходимых для оперативного планирования, мониторинга и координации - в 3-4 раза;
- сокращение времени отклика на непредвиденные события - в 2-3 раза;
- увеличение числа проектов, завершенных в рамках заявленных бюджетов и сроков - от 15% до 30%;
- значительный рост мотивации членов проекта;
- возможность увеличить число параллельно выполняемых проектов без увеличения количества дополнительных работников;
- сокращение рисков нарушения сроков проектов – от 15 до 25%.

Дальнейшее развитие системы предполагает переход к многоуровневой сетевидной «системе систем» для планирования масштабных проектов и p2p взаимодействию адаптивных планировщиков подразделений и проектов.

## Список литературы

1. Vittikh V.A., Skobelev P.O. Developing of Multi-Agent System for the Decision Making Process for Companies with Networking Organisation. // Proceedings of XVI IMACS World Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulations, Lausanne, August 21-25, 2000. – P. 526.
2. Rzevski G.A., Skobelev P.O., Korablin M.A. Multi-Agent Models of Networked Organisations // Proc. of Intern. Workshop «New Models of Business: Managerial Aspects and Enabling Technology», School of Management of Saint Petersburg State University, Russia, June 28-29, 2001. – P. 46-49.
3. Rzevski G, Skobelev P, Batishchev S, Orlov A.A. Framework for Multi-Agent Modelling of Virtual Organisations. In Camarinha-Matos, L M and Afsarmanesh, H (eds), Processes and foundations for Virtual Organisations, Kluwer Academic Publishers, 2003. –P. 253-260. IFIP TC5/WG5.5 4th IFIP Working Conference on Virtual Enterprises, PRO-VE 2003; Lugano; Switzerland; 29 October 2003 through 31 October 2003. Volume 134, 2004, Pages 253-260.
4. V.A. Vittikh, V.B. Larukhin, P.O. Skobelev, A.V. Tsarev. Actors, Holonic Enterprises, Ontologies and Multi-Agent Technology // V. Marik, J.I. Martinez, P. Skobelev (Eds.): Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2013), August 26 - 28, 2013, Prague, Czech Republic. – HoloMas 2013, LNAI 8062. – P. 13-24, 2013. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013. <http://www.springerlink.com/content/978-3-642-40089-6/>. DOI: 10.1007/978-3-642-40090-2.
5. S.Kozhevnikov, V.Larukhin, P.Skobelev. Smart Enterprise: Multi-Agent Solution for Holonic Enterprise Resource Management // Proceedings of the 12th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science 2013 (ICIS 2013), Toki Messe, June 16-20, 2013, Niigata, Japan. – P. 111-116.

6. А.Л.Феоктистов, Е.М.Клейменова, П.О. Скобелев, И.А. Сюсин, В.А. Ларюхин, А.В.Царев, Е.В. Симонова. Разработка принципов построения многоуровневой мультиагентной системы для управления проектами НИР и ОКР РКК «Энергия» // Труды XIV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 22-25 июня 2012г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. – С. 718-723.
7. Е.М.Клейменова, П.О. Скобелев, В.Б. Ларюхин, И.В.Майоров, Д.С.Косов, Е.В. Симонова, А.В.Царев, А.Л. Феоктистов, Е.В. Полончук. Мультиагентная технология адаптивного планирования для управления проектами НИР и ОКР в аэрокосмических приложениях // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. №5. – С. 58–63.
8. Е.М.Клейменова, П.О. Скобелев, В.Б. Ларюхин, Д.С. Косов, Е.В. Симонова. Разработка и использование онтологии интеллектуальной системы управления проектами НИР и ОКР. – Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки». 2013. № 2 (38).– С. 18–25.
9. Е.М.Клейменова, А.Л. Феоктистов, П.О. Скобелев, В.Б. Ларюхин, И.В.Майоров, Е.В. Симонова, Е.В. Полончук. Метод оценки рисков в мультиагентной системе управления проектами НИР и ОКР в реальном времени // Информационно-управляющие системы. – 2013. №2(63). – С. 29-37.
10. Е.М.Клейменова, П.О. Скобелев, В.Б. Ларюхин, И.В.Майоров, Д.С.Косов, Е.В. Симонова, А.В.Царев, А.Л. Феоктистов, Е.В. Полончук. Интеллектуальная система «Smart Projects» для оперативного управления ресурсами в проектах НИР и ОКР в реальном времени // Информационные технологии. – 2013. №6. – С. 27–36.



# ЧАСТЬ 3 – ДОРОГА В БУДУЩЕЕ

## ГЛАВА 19: Концепция и идеи

### Переход от персональных - к бизнес-приложениям

На рубеже веков мы стали свидетелями появления множества новых разработок в области информационных технологий (ИТ) для индивидуального использования.

Нельзя не замечать стремительный рост числа и уровня возможностей мобильных телефонов, планшетов и прочих переносных устройств, интеграцию Интернета и телевидения с помощью таких устройств как Apple TV, ставшее уже повсеместным голосовое общение в сети Интернет через Skype, появление таких глобальных социальных сетей как Facebook, YouTube и Twitter, возникновение непрерывно развивающихся поисковых систем, таких как Google, программных средств для обмена и хранения фотографий, видео и музыки, а также многих других приложений.

За короткий промежуток времени достижения в области ИТ радикально изменили наше общество и стиль нашего общения, сам процесс формирования сообществ по интересам.

Если на мгновение задуматься, то ведь это поистине удивительно, что уже больше половины жителей Земли используют Интернет.

Компания Apple стала одной из самых влиятельных компаний в мире только потому, что вовремя поняла важность ориентации на потребителей.

Но что будет в дальнейшем?

*Мы предполагаем, что фокус ИТ-инноваций сместится от индивидуальных приложений, рассчитанных на общение и развлечение, к приложениям коммерческим, административным и инженерным.*

Движущей силой этого процесса будет служить непрерывное повышение сложности глобального Интернет-ориентированного рынка.

Количество предприятий, которые используют Интернет, чтобы продавать или покупать товары, инвестировать или наращивать капитал и, в частности, продавать или покупать услуги, основанные на знаниях, будет также продолжать расти.

В результате, дальнейший рост объема и динамики мирового рынка выведут непредсказуемость спроса и предложения на новый уровень, на котором все большее число предприятий и организаций будут приходить к осознанию того, как важно уметь управлять сложностью и адаптироваться «на лету».

Так на какие же сферы деятельности будет обращено основное внимание инноваций в ближайшем будущем?

Наиболее вероятно, что это будут *Интернет вещей, Цифровое Предприятие, Умный Город и Умная Логистика.*

А какая компания получит наибольшее влияние на рынке, став лидером в отрасли и победит компанию Apple? Но не будем гадать.

Понятно, что скорее всего придет новая компания, которая к настоящему времени уже осознала важность этого нового направления и уже сосредоточилась в своей работе на продуктах и услугах для цифрового предприятия, умного города, интернета вещей и умной логистики.

Рассмотрим некоторые из возможных идей дальнейшего развития интеллектуальных систем адаптивного управления ресурсами в реальном времени для работы в указанных сферах.

## Интернет Вещей

Основной замысел Интернета вещей состоит в том, чтобы для начала с помощью электронных меток подключить к Интернету все физические объекты, полезные для бизнеса и личного пользования.

Например, транспортные ресурсы (такие как легковые автомобили, грузовики, поезда, вагоны, тракторы, суда, самолеты, вертолеты, конвейеры, тележки и т.д.), фабрики, заводы, цеха, станки, роботы, склады, полки, торговые точки, продукты, товары, узлы, комплектующие, поддоны, упаковки и бытовую технику.

Будучи подключенными к Интернету, данные вещи смогут показывать свое текущее состояние: включен или выключен, где находится и т.д.

Одновременно, появится возможность дистанционно управлять вещью, например, поднимать ворота гаража и включать кондиционер при подъезде к дому.

При этом возможность сохранять историю вещи позволит начать прогнозировать ее поведение, например, выходы из строя из-за использования ресурса.

Но самое интересное должно случиться дальше, когда вещи смогут начать планировать свою работу и координировать свои решения между собой.

Появится возможность для общения вещей друг с другом без участия человека:

- Груз сможет попросить складского робота загрузить его на выбранный грузовик для перемещения к месту назначения.
- Автомобиль на автострате сможет попросить впереди идущую машину разрешения сомкнуться при помощи электроники в единый автопоезд или узнать от едущего навстречу автомобиля о сложной ситуации на трассе.
- Авиалайнер сможет попросить другой самолет скорректировать маршрут, чтобы избежать возможного столкновения.
- Грузовик сможет сообщить техническому сервису на маршруте следования, что проколол колесо и нуждается в новой шине.

Мы убеждены, что со временем на смену простым электронным меткам, прикрепленным к вещам, придут и встроенные процессоры с программными агентами, которые станут переговариваться с другими агентами, размещенными на веб-серверах.

Сами вещи смогут получать напрямую запросы о том, какие требуются от них услуги, и далее распределить потребности по возможностям.

И, несомненно, эти переговоры будут проходить в реальном времени.

Ожидается, что к 2020-му году число вещей, подключенных к Интернету и обладающих уникальными электронными идентификаторами, вырастет до 30 миллионов.

Но как показывает опыт любых инноваций, после первого всплеска в развитии устройств для подключения вещей к Интернету быстро наступит определенное разочарование от эффективности использования подключенных ресурсов.

И к этому моменту времени нужно быть готовыми предложить интеллектуальные системы адаптивного управления Интернет-вещами в качестве личных или бизнес-ресурсов.

Покажем, как эти новые идеи Интернета Вещей могут быть применены к наиболее интересным и перспективным направлениям деятельности в цифровом мире.

## Цифровое Предприятие

С дальнейшим ростом сложности глобального Интернет-рынка, предприятия и организации будут более активно развивать адаптивные бизнес-процессы.

В этих целях будут появляться интеллектуальные системы нового поколения, реализующие концепцию «Цифровое Предприятие», в котором не только будет автоматизирована рутинная

ERP или PLM работа, но и все основные бизнес-процессы принятия решений будут протекать на сервере.

Чтобы повышать свою адаптивность, эти системы должны будут по определению использовать Базы Знаний, построенные на онтологиях.

Большое конкурентное преимущество первыми получают те, кто научится извлекать знания из накопленных больших массивов данных и текста.

Такая концепция «Цифрового Предприятия», безусловно, еще пока совсем нова и неточно определена, но будет очень активно развиваться в ближайшие годы.

Главный результат внедрения концепции «Цифрового Предприятия» будет состоять в том, чтобы помочь реформировать традиционные корпорации с присущими им устаревшими жесткими бизнес-моделями функционирования.

И такое изменение станет революционным – предприятия смогут получать дополнительную прибыль, выводя на аутсорсинг производства материалов и товаров, храня и обрабатывая данные в «облаке» на сервере.

Наиболее важным будет внедрение этой концепции для предприятий, где важнейшую роль играет интеллектуальная работа.

Рассмотренные выше подходы, решения и технологии могут заложить основу для создания интеллектуальных систем управления предприятиями нового поколения.

## Адаптивность и инновации

Распределение кадровых, финансовых, материальных и других ресурсов будет осуществляться в реальном времени, движимое появлением непредвиденных событий. Здесь придется к месту адаптивная стратегия, описанная в Главе 2. Бизнес-процессы будут разрабатываться адаптивными, а их надежность и эффективность будет развиваться инновациями.

## Онлайн доступ к ресурсам

Кадровые, физические, финансовые и интеллектуальные (знания) ресурсы будут доступны авторизованным пользователям онлайн вне зависимости от их места расположения (в офисе, дома, в дороге) или средства доступа, будь то настольный компьютер, ноутбук, планшет или смартфон, чтобы перестраивать планы по запросам пользователей «на лету» в реальном времени.

## Адаптивные вебсайты

Каждый посетитель вебсайта имеет свои интересы и требования, однако им всем приходится иметь дело с единообразным представлением содержимого сайта. Будут появляться новые интеллектуальные сайты, которые будут вступать в диалог с каждым посетителем и адаптироваться под их предпочтения. В этих целях для каждого посетителя может быть создан Личный Агент, который уточняет предпочтения посетителя в ходе переписки на языке по его выбору. После чего Личный Агент узнает из онтологии сайта о том, как лучше действовать для данного конкретного типа пользователя и проводит переговоры с Агентами содержимого сайта о том, как адаптировать представление материалов веб-страницы наиболее удобным для посетителя образом. Посетители, сделавшие запрос или покупку, на сайте получают новые связи, которые помогут агентам более точно понимать «образ» клиента и предлагать им новые продукты и услуги. Такие клиенты получают привилегированный статус, что позволит Агентам постоянно заботиться об удовлетворении их интересов и обнаруживать и предоставлять информацию о товарах, которая недоступна другим пользователям.

## Информационные технологии как услуга

Данные будут храниться в облаке, а средства обработки информации и управления ресурсами будут разрабатываться и приобретаться в индивидуальном наборе как веб-ориентированные услуги (сервисы).

## Распределенная организация

Организационная структура будет выстраиваться как сеть самостоятельных подразделений с собственными счетами и отчетами о прибылях и убытках, которые будут соревноваться и сотрудничать друг с другом как бизнес-центры. Сети компаний будут самоорганизовываться для адаптации к изменчивым условиям рынка посредством изменения связей и/или узлов организационной сети, переходя от конкуренции – к кооперации (и наоборот) в зависимости от решаемых задач.

## Согласованное принятие решений

Все заинтересованные стороны, затронутые каким-либо конкретным решением одного из участников, будут участвовать в процессе принятия решений.

## Акцент на приобретение знаний

Интернет Вещей повысит нагрузку на центры сбора и обработки данных, чтобы помочь предприятиям извлекать знания из их данных. Поскольку Интернет расширяется, и предприятия продолжают оцифровывать все, что попадает в поле их интересов, будут накапливаться огромные массивы информации в цифровом виде. Самыми актуальными темами «Цифрового Предприятия» по-прежнему будут "Большие данные" и "Облака", но с новым акцентом на динамический интеллектуальный анализ данных и текстов для выявления новых знаний.

## Безопасность

Задача обеспечения устойчивого развития предприятий будет все чаще требовать способности быстро обнаруживать атаки по любым направлениям бизнеса с использованием тех же методов распознавания образов, что и в системах обнаружения и приобретения знаний.

В будущем, электронные преступления, хулиганство (спам и сетевой вандализм), терроризм и кибервойны будут набирать обороты и станут реальной угрозой для предприятий и администраций.

Это вызовет новую волну разработки методов и средств защиты и сделает «Цифровые Предприятия» более устойчивыми.

Новые более сложные интеллектуальные системы защиты предприятий будут похожи на иммунные системы, защищающие наш организм от инфекций.

## Умный Город

Существует огромный разрыв между современным городом, как он есть, и «Умным Городом», который также может быть построен на основе Интернета вещей.

Просто за счет координации управления услугами, которые в настоящее время никак не связаны между собой, и перемещения оказываемых услуг в Интернет, можно будет добиться значительной экономии бюджета городских администраций, а также уменьшения загрязнения окружающей среды.

В то время как концепция «Умного Города» может толковаться по-разному сторонами, стремящимися построить первый прототип, наше внимание направлено исключительно на управление городскими ресурсами, и, в частности, на управление знаниями как особым городским ресурсом.

В любом случае «Умному Городу» потребуется цифровая инфраструктура, и она должна содержать следующие элементы:

### Адаптивное управление городскими услугами

Нет никаких сомнений в том, что за счет внедрения рассмотренных выше адаптивных подходов, следующие городские услуги могут предоставляться более эффективно для горожан:

- обслуживание зданий: уборка, отопление, кондиционирование, вентиляция и связь;
- обслуживание городских районов: уборка улиц, вывоз мусора, содержание улиц и зданий;
- обслуживание города в целом: водопровод, газ и электроэнергия, связь и канализация;
- транспортный поток и др.

Очевидно, что всеми этими услугами придется управлять в реальном времени, причем согласованно, для чего потребуются «рои планировщиков», которые смогут сотрудничать друг с другом без централизованного управления сверху.

При этом адаптивные планировщики распределения ресурсов по потребностям будут доступны в качестве одной из новых услуг.

### Городское Облако и Городская Сеть

Все наиболее важные, требуемые для принятия решений, данные будут постепенно собираться в «Городском Облаке».

Доступ горожан к услугам, базирующимся на размещенных в этом облаке данных, будет осуществляться через «Городскую Сеть» и веб-услуги.

Потребуются интеллектуальные системы для адаптивного управления сервисами, соответствующими Умному Городу.

Наглядным примером такого сервиса может стать интеллектуальный транспорт, который может помочь планировать на лету не только движение автобусов и трамваев или такси, но и работу бригад скорой помощи, полиции и пожарных.

А еще – новые возможности совместного использования автомобилей (car-sharing), что позволит дольше сохранять экологию.

Примеры подобных решений были нами разработаны для управления грузовыми перевозками и мобильными газовыми бригадами.

Рассмотрим ниже и другие возможные применения.

### Умная парковка

Все места на уличных и крытых парковках будут подключены к Интернету и смогут сообщать о своей доступности. Клиенты, которые хотят забронировать место для парковки, могут посылать свои требования на соответствующие веб-сайты. Здесь Агенты Клиентов и Парковок начинают переговоры о выделении парковочных мест с учетом времени бронирования и других индивидуальных требований, чтобы обеспечить наилучшее распределение для всех.

### Умное отопление, кондиционирование и вентиляция больших зданий

Цель заключается в разработке интеллектуальной системы, способной значительно снизить потребление энергии в зданиях за счет прогнозирования объемов потребляемой энергии с учетом следующих факторов:

- Прогноз погоды.
- Тепловые характеристики здания.
- Модели эксплуатации здания.

Основными компонентами такой системы будут являться: *База Знаний*, которая содержит знания о тепловых характеристиках здания и политике потребления энергии; *Модуль Прогноза погоды*, который получает прогнозы погоды и информацию о фактической температуре воздуха снаружи здания и использует соответствующую информацию для контроля потребления энергии; *Модуль Эксплуатации*, который получает прогнозы эксплуатации здания и информацию о его фактическом использовании, и извлекает соответствующую информацию для контроля потребления энергии; *Интеллектуальный Контроллер*, который принимает решения по включению и отключению энергии на основании прогноза погоды, моделей эксплуатации здания и его тепловых характеристик; *Интерфейс*, который предоставляет инструкции для переключения энергии соответствующим исполнителям и позволяет ответственным контролировать работу системы.

Первый прототип такой системы, реализованной для метро в Амстердаме, показал возможность экономить около 25% потребляемой электроэнергии.

## Умная Логистика

Современные логистические предприятия несут огромные потери из-за порожних пробегов и загрязнения окружающей среды.

На наш взгляд, имеется огромный потенциал в том, чтобы обеспечить координированную работу логистических компаний без какой-либо централизации, которая представляется невозможной, учитывая сложность рынка.

Но что делать, если у одной компании все грузовики на юге, а важный клиент просит забрать груз на севере, а у другой компании все наоборот?

Почему бы этим двум логистическим компаниям, будучи конкурентами на других заказах, не обратиться к сотрудничеству в этой ситуации?

Решение в том, чтобы временно предоставить часть своих ресурсов конкуренту, образуя так называемые разделяемые сети ресурсов (Shared Networks) – при этом возможно потеряв часть прибыли, но не упустив клиента.

В этой связи мы ожидаем увидеть развитие всемирной распределенной цифровой инфраструктуры логистики, которая будет использоваться логистическими фирмами, чтобы не только конкурировать, но и сотрудничать друг с другом.

## Логистическая цифровая инфраструктура

Ключевыми элементами такой инфраструктуры, позволяющей решать рассмотренные выше проблемы, являются:

- *Выделенные логистические веб-сервисы*, которые собирают, отображают и распределяют запросы на перевозку.
- *Адаптивные планировщики*, индивидуально предоставляемые логистическим компаниям и организациям в качестве веб-ориентированных услуг, и составляющие расписания передвижения товаров и людей.
- *Интернет Вещей*, обеспечивающий связь с логистическими ресурсами, в том числе, связь между собой клиентов, заказов, грузовых автомобилей, поездов, кораблей, участков трасс, заправочных пунктов и т.д.

Логистические веб-сервисы предназначены для приема запросов на транспортировку от компаний и частных лиц, отображения этих запросов и управления мультиагентными системами, осуществляющими переговоры между агентами потребностей и агентами возможностей.

Адаптивные планировщики распределяют грузы на различные виды транспорта (то есть дороги, железные дороги, авиационный и водный транспорт), изначально основываясь на

прогнозах и адаптируясь в режиме реального времени, в соответствии с изменениями в спросе, а также отклонениями от маршрута.

Адаптивные планировщики распределяют транспорт по участкам дорог, участкам ж/д линий и водным путям рек, каналов и морей.

### Умные посылки

Посылки с запасными частями для ремонта самолетов могут содержать в своих электронных метках информацию об их размере, весе, содержании, назначении и сумме, которую им разрешено потратить на транспортировку и хранение.

Все эти вещи будут подключены к Интернету, и их отправители могут в любой момент путешествия изменить инструкции об их назначении.

Если в ходе доставки место назначения, куда требовалось доставить запчасти, изменилось, Агенты Посылок заново обсудят новые транспортные схемы напрямую с Агентами Авиакомпаний и внесут плату за дополнительное время хранения, если таковое потребуется. При этом договорившись с Агентами Складов, приняв во внимание возможное изменение тарифов и согласовав с Агентами Авиакомпаний банки и счета для перевода средств.

Другой пример в том, что продукт питания, оказавшийся при транспортировке на жарком солнце больше определенного времени, может пожаловаться заказчику и будет переведен в состояние «некондиционного товара», который может быть возвращен производителю или продан со скидкой.

Это в свою очередь позволит поставщику приобрести знание о возможных новых требованиях к транспортировке для обеспечения качества и сохранности товара.

### Умное обслуживание самолетов

Многочисленные датчики, встроенные в важные элементы конструкции самолетов, могут непрерывно собирать информацию об их работе и, в случае обнаружения опасного износа элемента, загружать эту информацию в Интернет.

Устройство обслуживания, находящееся в пункте прилета самолета, контролирует данные, поступающие с датчиков самолета через Интернет. Если обнаруживается потребность в ремонте или замене компонентов, устройство обслуживания активирует Агента Самолета. Агент осведомляется в онтологии о том, что нужно делать, и начинает переговоры с соответствующими Агентами Ресурсов, которые вырабатывают расписания для сервисных инженеров, инструментов и запасных частей, чтобы обеспечить их присутствие в соответствующем месте, когда воздушное судно совершает посадку и будет доступно для ремонта.

Перечисленные выше примеры интеллектуальных систем нового поколения могут уже в ближайшем будущем стать полноценными проектами и коммерческими продуктами с многочисленными применениями.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая вам книга рассказывает нашу историю выполненных реальных проектов по управлению сложными системами, которая позволяет нам сделать следующие главные выводы:

1. Сложность мира, в котором мы живем и работаем, непрерывно возрастает, что проявляет себя и в растущем числе и увеличивающемся разнообразии новых потребностей и возможностей.

Для достижения успеха и грядущего процветания в этих новых условиях мы должны научиться *управлять сложностью*, что предполагает высокую открытость для включения во внешние самоорганизующиеся системы с целью противостояния растущей *внешней сложности* и развитие собственных способностей к самоорганизации для *усиления внутренней сложности своей структуры с целью преодоления ограниченности имеющихся ресурсов*.

Как показывают наши исследования, лучший способ преодоления негативных последствий роста сложности и, наоборот, использования открывающихся новых позитивных возможностей, которые несет увеличивающаяся сложность окружающего мира, состоит в том, чтобы стать более адаптивным и научиться более быстро, гибко и эффективно распределять свои ресурсы в соответствии с изменяющимися потребностями и возможностями в реальном времени.

Первым шагом к такой адаптивности является смена самого образа нашего мышления для того, чтобы чувствовать себя более комфортно в условиях неопределенности, легко решаться на эксперименты и использование метода «проб и ошибок» в познании окружающего мира, позитивно воспринимать и легко принимать наилучшее из возможных решений в текущий момент времени, а не искать бесконечно долго недостижимое «глобально-оптимальное» решение (при этом не забывая обеспечивать возможность позже изменить любое принятое решение), понимать смысл и ценить силу самоорганизации и эволюции в развитии окружающих нас сложных систем, признать для себя необратимость мирового развития и непредсказуемость его результатов.

Но прежде всего, развивать в себе умение находить возможности там, где прочие видят лишь опасность и риски.

2. Чтобы справиться с растущей сложностью окружающего мира любой организации и индивидууму нужно предпринимать шаги по разработке собственной *стратегии адаптации*, а затем и проектированию и реализации *интеллектуальных систем адаптивного распределения, планирования и контроля ресурсов в реальном времени*.

Адаптивность в современном понимании требует непрерывного мониторинга изменений в окружающей среде, оперативной реакции на непредвиденные события, динамического прогнозирования изменений потребностей и возможностей на рынке, принятия обоснованных решений по планированию ресурсов и постоянного соотношения плана и факта, причем в режиме реального времени, и потому совершенно невозможна без применения новых интеллектуальных информационных технологий.

3. Наиболее подходящей технологией для построения интеллектуальных систем адаптивного управления ресурсами является мультиагентная технология, позволяющая создавать самоорганизующиеся и эволюционирующие системы.

Ключевые вопросы в управлении сложностью при адаптации поведения системы - это *разрешение конфликтов путем переговоров*, а не за счет использования глобальной оптимизации с комбинаторным перебором, *ситуативная реакция* на события в реальном времени, а не ожидание момента полного накопления данных для пакетной обработки, а также постоянное *проактивное улучшение* существующих решений.



В доказательство этих выводов мы постарались в этой книге дать большое число практических примеров решения сложных проблем для самых разных по своей сфере деятельности предприятий, которым требовалась быстрая помощь в борьбе с растущей сложностью, и которые в результате стали более адаптивными и смогли повысить свою эффективность, чем внесли самый важный, причем наиболее объективный вклад в доказательство правильности нашей теории.

Наша книга оказалась построенной не на каких-либо известных нам заранее «готовых» теоретических знаниях, хотя теория сложных систем И.Пригожина всегда вдохновляла нас на исследования и разработки, а представляющей вам наш практический опыт и знания, с большим трудом «добытые в полях» не в обычной работе по научным грантам, а над конкретными промышленными проектами.

В ходе этой работы мы сами вынуждены были постоянно адаптивно искать разумный баланс для поддержания равновесия в очень жестких условиях: с одной стороны, нами, как учеными, двигали научное любопытство и исследовательская жажда познания новых принципов в науке о сложности, а с другой, выступая как предприниматели и менеджеры проектов, мы всякий раз должны были разрабатывать заказчикам наши системы в рамках отведенного бюджета и сроков.

Возможно, это и стало одной из наиболее важных причин, позволивших в короткие сроки приобрести новые знания о том, как управлять сложностью, применимые на практике в столь различных приложениях.

Мы очень надеемся, что каждый из вас, наших читателей сможет на практике использовать знания из этой книги и начать разрабатывать свои собственные интеллектуальные системы для адаптивного управления ресурсами, создавая новую историю проектов по управлению сложными системами, *Вашу историю*.

## Материалы в помощь

Кратко о мультиагентных технологиях - в видеосюжете Программы «Технопарк» на канале «Россия 24» (15 мин): <http://www.youtube.com/watch?v=qhCmbBU3jkU>.

Подробности нашей истории разработок можно найти в статье Ирика Имамудинова «Организация мыслящего роя» в журнале «Эксперт» (ноябрь 2014): <http://expert.ru/expert/2014/48/organizatsiya-myislyaschego-roya/>.

Видео-лекцию (1 час) о наших разработках можно найти на сайте Открытой технологической академии Агентства стратегических инициатив: <http://otacademy.ru/videos/petr-skobelev>.

# Примеры мультиагентных систем

## МАС в космосе и энергетике

Назначение клиент /	Разработчик	Предметная область	Применение
Аэрокосмические спутники NASA	NASA	Управление запросами спутников	Промышленность
Aerogility	LostWax	Интеллектуальная поддержка принятия решений	Моделирование
Энергетическое прогнозирование в Турции	KKK Per. Bsk.	Прогнозирование потребности в энергии	Моделирование
Энергетическая Комиссия Калифорнии	AESC, Acronymics	Координирование и планирование	Промышленность
Крупный городской район	Rockwell	Очистка воды	Моделирование

## МАС в логистике

Назначение клиент /	Разработчик	Предметная область	Применение
Air Liquide America	NuTech	Оптимизация логистики	Промышленность
Southwest Airlines	BiosGroup	Оптимизация работы наземных служб	Промышленность
ABX Logistics	Whitestein	Оптимизация транспорта в реальном времени	Промышленность
MAST	Rockwell	Динамическая маршрутизация товаров	Моделирование, экспериментальная модель
MAS-RFiD	University of Castilla-La Mancha	Управление логистикой	Моделирование
MASDIMA	TAP, LIACC	Адаптация работы авиалинии	Экспериментальная модель

## Примеры Европейских MAC проектов

Название	Краткое описание
GRACE InteGration of pRocess and quAlity Control using multi-agEnt technology ( <a href="http://www.grace-project.org/">www.grace-project.org/</a> )	Управление сборочными процессами и контролем качества на примере робототехнической линии по производству стиральных машин.
IDEAS Instantly Deployable Evolvable Assembly Systems ( <a href="http://www.ideas-project.eu/">www.ideas-project.eu/</a> )	Разработка адаптивных систем, устойчивых к сбоям.
COSMOS COSt-driven adaptive factory based on MOdular Selfcontained factory units (EU ref. 246371)	Адаптивное управление заводом на примере сборки турбин ветряков.
COLLIS.EUS Soft Collaborative Intelligent Systems (FP7 ref. 255425)	Разработка агентов и техники мягких вычислений для робототехнических систем.
CONET Cooperative Objects Network of Excellence ( <a href="http://www.cooperating-objects.eu/">www.cooperating-objects.eu/</a> )	Развитие агентов для беспроводных сенсорных сетей.

## Учебные пособия по теме

1. Андреев В. В., Минаков И. А., Пшеничников В. В., Симонова Е. В., Скобелев П. О. Основы построения мультиагентных систем. Учебное пособие. Часть 1. Самара. 2005. – 114 с.
2. Андреев В. В., Минаков И. А., Пшеничников В. В., Симонова Е. В., Скобелев П. О. Основы построения мультиагентных систем. Учебное пособие. Часть 2. Самара. 2007. – 151 с.
3. Симонова, Е.В. Разработка мультиагентных приложений с использованием платформы JADE / Е.В. Симонова, П.О.Скобелев, И.А.Сюсин // Учебное пособие. – Самара: ИУНЛ ПГУТИ, 2013. – 82 с.
4. Симонова Е. В., Скобелев П. О. Мультиагентная система решения задачи о расстановке восьми ферзей. Методические указания. Самара: ПГУТИ, 2010. – 33 с.
5. Абрамов Д. В., Андреев В. В., Симонова Е. В., Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для принятия решений в задачах динамического распределения ресурсов. Учебное пособие. Самара. ПГУТИ. 2008. – 290 с.
6. А.В.Иващенко, А.Н. Лада, Е.В.Симонова, П.О.Скобелев. Мультиагентная технология управления мобильными ресурсами в режиме реального времени / // Учебное пособие. – Самара: ПГУТИ, 2011. – 180 с.
7. Андреев М. В., Иващенко А. В., Симонова Е. В., Скобелев П. О., Царев А. В. Автоматизация адаптивного управления производством на промышленном предприятии / Учебное пособие. – Самара: ПГУТИ, 2009. – 184 с.
8. Е.В. Симонова, П.О. Скобелев, И.В. Майоров, Я.Ю. Шепилов, Д.Н. Казанская. Интеллектуальная система управления производственным цехом машиностроительного предприятия. // Учебное пособие. – Самара: ИУНЛ ПГУТИ, 2015. – 183 с.

## Лабораторные работы по теме

1. Изучение Swarm Intelligence на примере мира муравейника.
2. Мультиагентная система решения задачи о расстановке восьми ферзей.
3. Мультиагентная система для решения задач логистики.
4. Мультиагентная система извлечения знаний из данных с использованием метода кластеризации.
5. Мультиагентная система понимания смысла текста на естественном языке.
6. Изучение механизмов принятия решений при динамическом распределении ресурсов.
7. Разработка мультиагентных приложений с использованием платформы JADE.
8. Мультиагентная система управления производственным цехом машиностроительного предприятия.

По вопросам получения дополнительных материалов просим Вас обращаться по адресу:

ООО «НПК «Разумные решения»

443013, Россия, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 17,

Бизнес центр «Вертикаль», 12 этаж, офис 1201.

Тел./факс: +7 (846) 279-37-85

[info@smartsolutions-123.ru](mailto:info@smartsolutions-123.ru)

# Контрольные вопросы для самопроверки

## Основы новой концепции управления предприятиями

1. Объясните, в чем суть новой концепции управления и почему современные процессы принятия решений в компаниях характеризуются как «конец менеджмента»?
2. Приведите 10 основных отличий новых предприятий от классической бюрократии.
3. Что такое «сложные системы»?
4. Приведите примеры сложных систем.
5. Является ли самолет или его двигатель сложной системой?

## Проблема управления ресурсами для новых предприятий

1. Какие модели, методы и алгоритмы планирования ресурсов вы знаете, в чем их разница?
2. Какие компании, программные продукты и веб-сайты по планированию вы знаете?
3. В чем особенности классической постановки задачи управления ресурсами?

## Мультиагентные технологии

1. Какова история развития мультиагентных технологий?
2. Объясните, в чем смысл мультиагентных технологий для решения сложных проблем?
3. Дайте определение мультиагентной системы. В чем отличия свойств мультиагентных систем от традиционных систем?
4. Дайте определение программного агента. Определите свойства интеллектуальных агентов.
5. Поясните принципы работы агентов в мультиагентной системе для решения сложных проблем на примере планирования, понимания текстов, извлечения знаний, распознавания образов или других.
6. Какие области применения мультиагентных систем Вам известны?
7. В чем отличие мультиагентных технологий от объектного программирования?
8. Какие крупные проекты мультиагентных систем вы знаете?
9. Каким будет следующий шаг за «мультиагентным программированием»?

## Сети потребностей и возможностей

1. Что такое сеть потребностей и возможностей (ПВ-сеть)?
2. Приведите примеры ПВ-сетей для управления цехами фабрик, грузовиками или другими ресурсами.
3. Поясните различные типы микроэкономики агентов (1-го и 2-го рода).
4. В чем аналогия процессов принятия решений в мультиагентной системе планирования с нелинейной термодинамикой И. Пригожина?

5. Покажите возможность расширения ПВ-сети без перепрограммирования.
6. Какова архитектура и цикл работы мультиагентной системы для управления ресурсами?
7. Дайте пример расчетов и переговоров агентов по методу компенсаций (на любом примере по грузовикам, фабрикам или любом другом).

### **Семантический Интернет**

1. Что такое Интернет 3.0 (Semantic Internet)?
2. Назовите главные цели разработки и применения онтологий.
3. Какие языки представления знаний и редакторы онтологий вы знаете?
4. Постройте пример онтологии, модели и сцены для сборочного цеха фабрики.
5. Дайте примеры использования онтологий при планировании сменно-суточных задач рабочих или для управления проектами по проектированию спутников.
6. Дайте примеры правил индуктивных обобщений, которые можно генерировать «на лету» из опыта, например, для планирования рабочих (по базе данных)?
7. Какие методы автоматического обучения из опыта для пополнения онтологий вы знаете?

### **Сетецентрические системы**

1. Что такое сетецентрическая система?
2. Поясните горизонтальные и вертикальные переговоры на примере сетецентрической системы планирования завода.
3. Дайте примеры переговоров планировщиков в сетецентрической системе грузовых перевозок.

### **Интернет вещей**

1. Что такое Интернет вещей?
2. Дайте примеры и пояснения, как реализовать Интернет вещей для «умного дома» нового поколения (на примере кондиционера, холодильника и др.).
3. Какова роль агентов в Интернете вещей?

## Краткая справка об авторах



**Профессор Георгий Александрович Ржевский** – известный ученый, предприниматель и консультант (гражданин Великобритании, место постоянного проживания – город Лондон).

Георгий Александрович в настоящее время является почетным профессором Открытого университета Великобритании.

Имеет множество публикаций в сфере искусственного интеллекта, проектирования сложных систем и мультиагентных технологий, является председателем программных комитетов многих крупных международных научных конференций.

Руководил большим количеством аспирантов и выступал в качестве наставника для студентов и аспирантов курсов на многих факультетах университетов Великобритании. Выполнял оценку кандидатских диссертаций на докторскую степень (PhD) для ряда Американских университетов, включая Стэмфорд в Огайо и Техасе; экзаменовал более 30 кандидатов на докторскую степень в университетах Британии и за её пределами, включая университет Кембриджа, Имперский Колледж, Лондонскую Школу Экономики, Королевский Колледж Искусств, Открытый Университет, университеты Кардифф и Сингапура, а также Национальный Университет Ирландии.

В Открытом университете Георгий Александрович первым запустил в Англии в программу высшего образования дистанционные курсы по интеллектуальной мехатронике, его кафедра постоянно получала максимальные оценки в крупнейших британских исследованиях RAE (Research Assessment Exercises).

Был главным редактором в журнале «Искусственный интеллект в инженерии» престижного научного издательства Elsevier.

До 1999 года Георгий Александрович являлся также директором Центра разработок интеллектуальных систем, который финансировался грантами правительства Великобритании и промышленных компаний.

В честь Георгия Александровича в Открытом университете была учреждена Лаборатория исследований сложных систем имени проф. Г. А. Ржевского, ныне ведущая работы в широком диапазоне задач, включая аэрокосмические приложения, двигателестроение, робототехнику и другие.

Георгий Александрович был приглашенным профессором (visiting professor) в Лондонской школе экономики, университете Брунеля в Западном Лондоне, университете города Ухань в Китае, государственном университете прикладных наук в Кельне и университете Моратува города Коломбо в Шри-Ланке.

В настоящее время является приглашенным профессором в Самарском аэрокосмическом университете им. акад. С.П.Королева, где является научным руководителем Лаборатории управления сложными системами в аэрокосмических приложениях.

Наряду с научной и образовательной деятельностью, является основателем группы предприятий Multi-Agent Technology Group, специализирующихся на разработке и внедрении промышленных мультиагентных систем для таких отраслей, как логистика, электронная коммерция, понимание текста и семантический поиск и другие.

Совместно с д.т.н. Петром Олеговичем Скобелевым сотрудничает уже более 20 лет в области мультиагентных систем, имеет ряд совместных международных патентов на мультиагентные системы для логистики, извлечения знаний и понимания текстов.

В течение ряда лет читал курс лекций по технологическим, экономическим, социальным и культурным последствиям развития глобальных Интернет сетей для аспирантов Лондонской Школы Экономики.

На протяжении всей своей научной карьеры работал в качестве консультанта для ряда известных крупных компаний, государственных администраций и ЕС по различным вопросам, связанным с передовыми информационными технологиями, в частности, был советником ИТТ Communications в Лондоне, Антверпене и Париже; ICL Computers в Манчестере; IBM в Лондоне; Philips в Эйндховене.

Георгий Александрович начал свою академическую карьеру в Великобритании в Политехническом университете Кингстона, где он был профессором, основателем и руководителем направления информационных систем.

В Кингстоне он разработал новые курсы для студентов и аспирантов, направленные на объединение дисциплин информационных технологий (ИТ) и Бизнеса и возглавил успешный научно-исследовательский центр компьютерного производства. Центр работает до сих пор в тесном сотрудничестве с ведущими высокотехнологичными компаниями, в том числе ICL, Xerox, IBM и многими другими.

Георгий Александрович Ржевский – русский по происхождению, родом из князей Ржевских, основателей города Ржев, род которых напрямую восходит к Рюриковичам и князю Владимиру, крестившему Русь.

Его семья была вынуждена эмигрировать из России в 1918 году и поселилась в Сербии, где он родился в 1932-м и в последствии получил образование в Белградском университете. Уже в молодом возрасте он был приглашен возглавить новое конструкторское бюро инженеров в Белграде. Под его руководством бюро быстро выросло в крупную организацию, реализующую крупные энергетические инженерные проекты. В возрасте 29 лет стал главным конструктором сетей электрификации всех железных дорог в Югославии.

Георгий Александрович переехал в Великобританию в 1960-х, где он прошел курс повышения квалификации в аспирантуре в Имперском Колледже, после чего поступил на работу в Кингстонский университет.

В настоящее время ведет активную научную, технологическую и предпринимательскую деятельность, преимущественно в Англии, США и Европе, выступает в роли консультанта компаний, читает лекции по приглашению университетов.





**Скобелев Петр Олегович** (1960 года рождения) – вице-президент РКК «Энергия» по ИТ (с 2015 г.), специалист в области теории сложных систем и мультиагентных технологий, основатель Самарской научной школы мультиагентных систем, доктор технических наук, учредитель и руководитель Группы компаний «Генезис знаний» (до 2014 г.), автор более 150 научных работ, 4 книг, изданных в Великобритании и Германии, 7 учебных пособий, 25 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, 3-х изобретений в Великобритании и США.

В 1983 г. окончил КуАИ - Куйбышевский авиационный институт (ныне Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П.Королева) по специальности «Автоматизированные системы управления», был Ленинским стипендиатом, получил диплом с отличием. В 1983 г. поступил на работу в Самарский филиал Физического института РАН, где участвовал в создании лаборатории моделирования и автоматизации лазерных систем и прошел путь от инженера до старшего научного сотрудника.

В 1986 г. защитил в КуАИ кандидатскую диссертацию в области технических наук по LR(k)-грамматикам и автоматам с магазинной памятью для построения проблемно-ориентированных языковых процессоров для управления сложными техническими экспериментами с использованием принципов искусственного интеллекта и функционального программирования (Lisp, Рефал, FP).

В 2001 г. перешел на работу в Институт проблем управления сложными системами РАН, где участвовал в создании лаборатории интеллектуальных систем. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию по мультиагентным системам для оперативной обработки информации в процессах принятия решений по управлению ресурсами предприятий по специальности 05.13.01 «Системный анализ и управление в промышленности».

С началом Перестройки в СССР активно занялся предпринимательской деятельностью.

В 1990 году создал компанию «АртЛог», в которой была разработана первая в России отечественная серия мультимедиа учебников, энциклопедий и справочников для персональных компьютеров, с применением методов и средств математического моделирования, 3D графики и анимации. Серия включала более 50 наименований мультимедиа-дисков, в том числе, мультиагентную обучающую систему по физике для средней школы (кинематика-механика-оптика), мультимедиа-энциклопедию о Самаре на трех языках «Самара: культура провинции», компьютерные учебники для инженеров по датчикам давления, температуры, ускорений, вибраций и удара, изданные массовыми тиражами в Германии и Англии, обучающие мультимедиа-системы для безработных граждан по заказу Самарского центра занятости, Министерства труда РФ и Всемирного банка, учебно-справочные системы для Федерального Фонда социального страхования и других организаций.

В 1997 году создал научно-производственную компанию «Генезис знаний», сумевшей выиграть федеральный конкурс Министерства экономики и торговли РФ и заложить основу в построении электронного правительства Самарской области (e-Правительства). Разработанная и внедренная в Министерстве здравоохранения и социального развития первая очередь мультиагентной системы для управления регионом в социальной сфере на основе социальных паспортов и пластиковых карт жителей Самарской области получила Золотую медаль конгресса инноваций и изобретений «Эврика» в Брюсселе в 2003 году и была выдвинута на Государственную премию Правительства России в 2007 году. В настоящее время система обслуживает население Самарской области через сеть из более чем 200 Интернет киосков, размещенных в Самарской области.

В 2000 году в Великобритании, совместно с проф. Открытого университета Г.А.Ржевским и зарубежными инвестиционными фондами, создал компанию Magenta Technology, Ltd (г. Лондон), в которой были разработаны и выведены из лабораторий для промышленного внедрения первое поколение мультиагентных систем управления ресурсами транспортных предприятий для таких крупных зарубежных компаний как Tankers International, Addison Lee, Avis, GIST и ряд других. Для управления рекламными Интернет кампаниями на базе компании Magenta Technology в 2008 году создана компания Maxifier (Великобритания, Лондон), успешно поставляющая продукты для таких крупных информационных агентств мира, как Channel Four и другие. В 2008 году, в связи с принципиальными расхождениями с топ-менеджментом в видении совместного бизнеса, вышел из Совета директоров и покинул пост Директора по технологиям.

В 2010 году создал научно-производственную компанию «Разумные решения», целиком специализирующуюся на разработке мультиагентных технологий, которая за короткий период с 2010 по 2013 год прошла путь от небольшой группы единомышленников в 5-7 человек – до команды в 150 человек.

В 2011 году Торгово-промышленной палатой Самарской области компания признана победителем конкурса «Лучшая компания 2011 года», а в 2012 – конкурса «Лучшая инновационная компания». Бизнес-журналом «Дело» в 2012 году Скобелев П.О. признан «Инноватором эпохи» в Самарской области по итогам работы за последние 20 лет. Правительством Самарской области компания признана «Лучшей ИТ компанией Самарского региона» и получила премию журнала «Эксперт» в 2013 г.

В рейтинге TechУспех 2013, проведенном АИРР и РВК при участии всемирно известной компании «PricewaterhouseCoopers», компания признана одной из самых инновационных (2-ое место в ТОП-10) и быстрорастущих компаний России (5 место в ТОП-10). Телеканалом Россия24 в программе «ТехноПарк» снят видеосюжет о мультиагентных продуктах и технологиях компании: [http://www.youtube.com/watch?feature=player\\_embedded&v=qhCmbBU3jkU](http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=qhCmbBU3jkU).

В 2014 НПК «Разумные решения» стала лауреатом Национальной премии в области предпринимательства «Золотой Меркурий», проводимого Торгово-промышленной палатой России, в номинации «Лучшее инновационное предприятие - экспортер на международном рынке».

Ведущий научный сотрудник ИПУСС РАН и профессор СГАУ, САМГТУ и ПГУТИ, где руководит группой аспирантов. Член редколлегии журнала «Онтологии проектирования» и эксперт в IEEE Man, Machine and Cybernetics. Part C. Industrial Applications Springer Verlag (Германия), входит в программные комитеты ряда международных конференций в России, Англии, Германии, Чехии, Японии и других стран.

В 2011 г. выбран членом Международного Технического Комитета по промышленным агентам - The IEEE Technical Committee on Industrial Agents (<http://www.tcia.ieee-ies.org/>), а с 2012 г. является членом Российской ассоциации искусственного интеллекта (РАИИ) <http://www.raai.org/>.

Имеет медали ВДНХ и Конгресса инноваций в Брюсселе, является лауреатом Премии Администрации города Самара за лучшее произведение в области искусства, науки и технологий (1996) и лауреатом Губернской премии Правительства Самарской области в сфере науки и техники (2001).

В конце 2014 года принял предложение руководства ОАО «РКК «Энергия» стать вице-президентом по ИТ и создать инновационный ИТ-центр корпорации для управления ресурсами предприятия в реальном времени.