

© 2021 г. С.П. ГРАЧЕВ (sergey@grachev.me),
А.А. ЖИЛЯЕВ (zhilyaev.alexey@gmail.com),
В.Б. ЛАРЮХИН (vladimir.larukhin@live.ru),
Д.Е. НОВИЧКОВ (dmitriy.novichkov@gmail.com),
В.А. ГАЛУЗИН (galuzin@.kg.ru)
(Самарский государственный технический университет),
Е.В. СИМОНОВА, канд. техн. наук (simonova@kg.ru)
(Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева),
И.В. МАЙОРОВ, канд. техн. наук (imayorov@kg.ru),
П.О. СКОБЕЛЕВ, д-р. техн. наук (petr.skobelev@gmail.com)
(Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара)

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СЛОЖНЫХ ЗАДАЧ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ¹

Формулируется постановка задачи адаптивного управления ресурсами предприятий в реальном времени. Приводятся примеры современных задач адаптивного управления ресурсами в различных областях применений, показывающие размерность и другие особенности решаемых задач. Формулируются требования к решению рассматриваемых задач и предлагаются общие принципы, повышающие адаптивность управления ресурсами. Проводится краткий анализ существующих подходов и показываются их ограничения. Предлагается новая методология решения рассматриваемых задач, дается обзор разработок и обсуждается первый опыт ее применения при создании интеллектуальных систем управления ресурсами. Показывается возможность решения экстремально сложных задач управления ресурсами за счет модифицированной на основе онтологий концепции сети потребностей и возможностей, в рамках которой расписание строится как «конкурентное равновесие» на виртуальном рынке унифицированной мультиагентной системы, настраиваемой на конкретное предприятие с использованием прикладных онтологий. Даются пример построения прототипа интеллектуальной системы управления ресурсами многоспутниковой группировки ДЗЗ и результаты ее экспериментальных исследований. Предлагается подход к оценке качества и эффективности разрабатываемых моделей и методов адаптивного построения расписаний при управлении ресурсами в реальном времени. Показываются перспективы дальнейшего развития подхода для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами.

¹ Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 20-37-90052).

Ключевые слова: задача адаптивного управления ресурсами, онтологии, мультиагентные технологии, интеллектуальные системы, сети потребностей и возможностей, виртуальный рынок, конкурентное равновесие, реальное время.

DOI: 10.31857/S0005231021110039

1. Введение

Новые потребности предприятий в повышении эффективности бизнеса в условиях современной сетевой экономики и стремительного прогресса компьютерных технологий приводят к появлению новых постановок задач управления ресурсами в сравнении с традиционными, которые было принято рассматривать в исследовании операций [1–3]. Одна из таких новых задач связана с переходом к управлению ресурсами в реальном времени, когда от самого момента времени принятия решения напрямую зависят качество и эффективность создания продукта или реализации оказываемой услуги.

Целый ряд таких задач появляется в связи с переходом к юбер-подобному управлению ресурсами в реальном времени, где есть высокая сложность, априорная неопределенность и турбулентная динамика изменений спроса и предложения, например, когда на предприятие часто приходят новые заказы с индивидуальными требованиями или подключаются и выходят из доступа ресурсы, уже запланированные заказы приостанавливаются или отменяются, изменяются или запускаются новые технологические процессы, меняются задачи, поставщики комплектующих и т.д.

Примеров предприятий, где рассматриваемая постановка задачи оказывается актуальна и значима, становится все больше: это он-лайн такси для пассажиров и перевозки грузов, заводы и фабрики, работающие по индивидуальным заказам, доставка товаров интернет-магазинов и т.п. Можно утверждать, что в связи с усиливающимися тенденциями «юберизации», т.е. с переходом к использованию разделяемых ресурсов и экономике реального времени, число таких задач будет продолжать расти.

В этих условиях традиционное «пакетное» планирование на большой горизонт времени, базирующееся, как правило, на классических методах математического программирования или разнообразных эвристиках и метаэвристиках, включая табу-поиск, муравьиные алгоритмы, генетическое программирование и др. [4–6], не дает существенного выигрыша, так как построенный план в условиях высокой неопределенности и динамики возникновения событий может существовать лишь короткое время и далее безвозвратно устаревает, а полное перестроение планов заново по каждому событию требует долгих вычислений, в ходе которых, в свою очередь, могут приходиться все новые события.

В этой связи становятся востребованными новые модели и методы адаптивного управления ресурсами в реальном времени, предназначенные для решения задач распределения, планирования, оптимизации, прогнозирования, согласования, мониторинга и контроля использования ресурсов по событиям,

без полного перестроения планов, а только той их части, которая прямо или косвенно задета событием.

При этом планирование ресурсов должно предполагать не столько «инкрементальное» изменение плана, когда новые заказы планируются на свободные ресурсы, добавляясь в открытые интервалы времени («в хвост») уже имеющихся в расписании заказов, сколько выявление и разбор конфликтов между ранее запланированными заказами при условии, что еще есть время для принятия таких решений.

Во втором разделе формулируется содержательная постановка задачи адаптивного управления ресурсами предприятий в реальном времени и рассматриваются примеры такого рода практических задач в различных сферах управления ресурсами. При этом показывается, что решение любой такой сложной задачи – это всегда поиск согласия или консенсуса между всеми участниками процессов управления. К числу таких участников следует относить не только людей, но и любые другие сущности: заказы и ресурсы, продукты и др., что во многом связано с развитием бережливой модели производства. Выделяются типовые критерии, предпочтения и ограничения, показывающие внутренний конфликтный характер решаемых практических задач и необходимость разработки методов и средств, позволяющих находить баланс интересов такого рода участников. Выявляются и показываются ограничения существующих методов и средств планирования и оптимизации, затрудняющих их практическое использование.

В третьем разделе проводится краткий анализ существующих подходов и формулируются их ограничения. Показывается эволюция представлений, моделей и методов планирования и оптимизации для построения оптимального плана в интересах одного центра (консонанс ценностей) к теории игр (конфликт ценностей) и сетевым рыночным моделям конкуренции и кооперации множества участников с юберизацией ресурсов (компромиссу ценностей). Формулируется задача создания интеллектуальных систем управления ресурсами (ИСУР), приходящих на смену классическим Enterprise Resource Planning (ERP) системам, для работы в условиях новой экономики.

В четвертом разделе обобщается методология решения рассматриваемых задач и дается обзор разработок ИСУР в Самарской школе мультиагентных систем. Прослеживается развитие предложенной в [7, 8] концепции сетей потребностей и возможностей, показываются поэтапное расширение состава основных классов агентов и переход к виртуальному рынку агентов со взаимными уступками и компенсациями, в рамках которого расписание строится как «конкурентное равновесие» (динамический останов). Приводятся требования к программной среде для реализации мультиагентных систем в составе ИСУР. Показывается опыт разработки ИСУР для различных применений, которые создавались как новые системы «с нуля».

В пятом разделе рассматривается возможность решения сложных задач управления ресурсами с использованием модифицированной, построенной на основе базовой онтологии управления ресурсами, концепции ПВ-сетей. Выделяются основные классы понятий и отношений в предметной области управ-

ления ресурсами, которые позволяют описывать особенности каждого предприятия, что в свою очередь позволяет создать унифицированную мультиагентную систему, настраиваемую посредством прикладных онтологий и онтологических моделей предприятий на каждое конкретное применение. Дается формализованное описание метода адаптивного построения расписания для решения сложных задач управления ресурсами, включая новые классы агентов, их целевые функции и протоколы переговоров.

В шестом разделе представлена структура инструментального комплекса для создания ИСУР, включающего базу знаний на основе онтологий для построения онтологических моделей предприятий и унифицированную мультиагентную систему для планирования, мониторинга и контроля исполнения планов.

В седьмом разделе рассматривается пример создания прототипа ИСУР для управления многоспутниковыми группировками дистанционного зондирования Земли. Показаны функции системы, представлены результаты моделирования для исследования качества и эффективности разработанного метода адаптивного планирования в сравнении с классическими и эвристическими методами. Обсуждаются особенности коллективного поиска агентами согласованных решений в ходе самоорганизации расписаний за счет выявления и разрешения конфликтов между агентами и проведения переговоров с взаимными уступками для достижения консенсуса.

В восьмом разделе по результатам проведенных компьютерных экспериментов делаются выводы и даются рекомендации по созданию и исследованию ИСУР для практических применений. Формулируется подход к оценке качества и эффективности моделей и методов адаптивного построения расписаний, который может стать основой расчета экономического эффекта по внедрению ИСУР.

В заключение показывается перспективы дальнейшего развития подхода для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами.

Результаты настоящего исследования впервые дают системное изложение и обобщают ранее полученные результаты, представленные в [7–13].

2. Задача адаптивного управления ресурсами предприятий в реальном времени

Управление ресурсами предприятия предполагает связанное решение задач организации деятельности, планирования и оптимизации ресурсов, обеспечения производственных процессов работы всем необходимым, мониторинга и контроля хода исполнения задач, а также развития предприятия [2, 14].

Рассмотрим примеры практических задач управления ресурсами в реальном времени, связанных с грузовыми перевозками и мобильными бригадами, машиностроительным производством, цепочками поставок и другими областями, чтобы характеризовать требования к управлению ресурсами и размерность пространства поиска решений.

— **Управление грузоперевозками:** от 500 грузовиков на дороге, 100 заказов приходит в день в заранее не известные моменты времени, горизонт поездок от одного до 30 дней и более, 5000 точек доставки, продолжительность обработки заказа 3–15 с, критерии: время и стоимость перевозки, комфортность водителей, равномерность нагрузки на машины и водителей, социальная справедливость, соблюдение режимов работы водителей, необходимость учета возможных задержек на погрузке или разгрузке и штрафов за опоздание, различные типы грузов и оборудования, требования возврата тары, время работы промежуточных складов и магазинов, порядок загрузки и центровка грузов в кузове, износ шин, наличие рекламных обязательств, качество услуг для потребителей, риски, прибыль компании.

— **Управление фабриками:** сборка двигателя самолета – 50 тыс. деталей, 30–40 цехов на предприятии, каждый цех – 150 рабочих и 300 единиц оборудования, ежедневно в цех поступает 10 новых заказов, одно сменно-суточное задание рабочего может включать до 100 операций, для обработки каждой деталесборочной единицы требуется от 10 до 300 технологических операций, горизонт стратегического планирования составляет 3–5 лет, оперативного планирования и диспетчеризации – от одного дня до 6 мес, план одного цеха может включать до 500 тыс. связанных задач, желаемое время обработки события – от 2 с до 5 мин, учет особенностей технологических процессов, компетенций и опыта рабочих, возможность усиления технологических операций за счет привлечения дополнительных рабочих, возникновение брака, наличие на складе комплектующих и материалов и т.д.

— **Управление цепочками поставок:** 5–7 фабрик в сети, 300 складов промежуточного хранения, сотни каналов транспортировки, 1000 магазинов, изменяющих свои заказы на горизонте в 7–10 дней, 10 000 товаров, движущихся в сети с разной скоростью, сотни и тысячи новых заказов, поступающих ежедневно, одно событие требуется обрабатывать от 20 с до 15 мин, горизонт планирования от 3 дней до 3 мес с критериями минимизации себестоимости производства заказов, включая стоимость производства, транспортировки и хранения, а также минимальных штрафов за отклонение от заданных сроков доставки с учетом изменяющегося прогноза продажи продукции.

— **Управление мобильными бригадами:** число событий в день: от 50 до 250 заявок, в среднем около 100 заявок; 43 бригады для обслуживания региона в 3,3 млн человек; горизонт планирования — 8–12 ч (длительность смены); требуемое время обработки события – до 1 мин; критерии принятия решений: максимизация количества устраненных аварий по заявкам при минимальном пробеге и простое, компетенция и оснащенность техникой бригады и др.

— **Управление грузопотоком Международной космической станции:** номинальный план полета рассчитывается на 6 мес (2 экспедиции), грузопоток и программа полета – на год, долгосрочная программа – на 3 года, используется 3500 типов грузов, в числе которых топливо, вода, продовольствие для космонавтов, приборы и оборудование для научных экспериментов, запасные инструменты и принадлежности, необходим учет состава экспедиций, типов грузов, норм потребления, объема складов на МКС и т.д. Критерия-

ми планирования являются своевременность доставки грузов, максимальное заполнение кораблей и т.п.

— **Управление оперативным движением поездов:** полигон Москва-Санкт-Петербург содержит 49 станций, 48 перегонов, 3500 блок-участков, в день проходит около 800 поездов; горизонт планирования – сутки, время начального планирования – не более 4 мин. План каждого поезда включает 40–50 крупных операций при ограничениях на число путей на станциях, по соблюдению интервалов движения, времени хода, продолжительности стоянок, разгона и торможения, а также приоритетов поездов, опасности грузов и др. В течение дня может произойти до 50 непредвиденных событий (поломки путей, задержки поездов и т.д.), обработка события – до 3 мин.

— **Управление проектами:** на подразделение в 150 инженеров в год может приходиться 25–40 проектов, каждый проект предполагает не менее 300–500 задач. В день на исполнителя поступает 2–5 новых задач и возникает от 5 до 20 событий: при задержке финансирования требуется маневр по проектам, больше времени отнимает согласование технической документации, уточняются задачи, подводят смежники и т.п. Горизонт планирования составляет от 2–3 мес до 3 лет, расписание может содержать около 10 000 связанных задач, требуемое время обработки события — от 2 с до 5 мин. Требуется учитывать приоритеты, трудоемкость задач и связи между ними, индивидуальный календарь каждого исполнителя, его производительность и опыт.

Ключевым этапом сквозного процесса управления ресурсами в реальном времени является адаптивное планирование, под которым в рамках разработанной методологии предлагается понимать не традиционное централизованное нахождение одного «глобально-оптимального» плана в интересах центра, а согласованную выработку и синхронизацию «по ситуации» (событиям) множества «локально-оптимальных» планов участников в их взаимодействии, с учетом того, что у каждого имеются свои собственные интересы, критерии принятия решений, предпочтения и ограничения.

Методология такого распределенного подхода может быть естественным путем распространена на интересы, предпочтения и ограничения не только людей, но и любых физических или абстрактных сущностей, таких как подразделения и предприятие в целом, заказы, станки и другое оборудование, грузовики, комплектующие и материалы и т.п. Можно, конечно, задать вопрос: “А зачем награждать «интересами» неживые сущности?” Ответ дан в методологии «бережливого производства» — нужна «забота» об эффективном использовании каждой такой сущности в производственной системе, чтобы постараться не допустить избытка, простоя или дефицита использования каждого ресурса.

Более того, опыт практического решения представленных выше сложных задач управления ресурсами показывает, что под «хорошим» планом следует понимать такое производственное расписание использования ресурсов, которое обеспечивает баланс интересов («консенсус») между участниками процессов управления в каждой конкретной ситуации с учетом актуального для

всех на этот момент состава и значений критериев, предпочтений и ограничений.

Такие собственные критерии, предпочтения и ограничения есть у заказчиков, финансистов, производственников, логистов, инженеров и рабочих, водителей и других сотрудников предприятия, для которых типичны следующие критерии:

- обеспечить качество выполнения работ;
- выполнить все заказы в срок;
- минимизировать себестоимость работ;
- минимизировать риски срыва заказов;
- обеспечить равномерность загрузки ресурсов;
- минимизировать стоимость исполнения заказов;
- гарантировать выплату зарплаты рабочим в конце месяца;
- вовремя выполнить ремонт оборудования и т.д.

Наличие участников со своими интересами делает рассмотренные задачи не только многокритериальными по своей природе, но и, по определению, конфликтными, причем одним из равных участников может быть и само предприятие («центр»), отстаивающий интересы объединенного «целого» в поиске компромисса с интересами отдельных частей.

3. Краткий анализ существующих подходов к решению сложных задач адаптивного управления ресурсами

Традиционные информационно-управляющие системы класса Enterprise Resource Planning (ERP) разработки таких известных компаний как SAP, BAAN, Oracle, 1C, Галактика и многих других хотя и называются системами планирования ресурсов предприятий, но в реальности остаются в основном учетными системами с весьма ограниченными возможностями пакетного планирования.

Под «капотом» указанных систем обычно используются известные зарубежные программы CPLEX, ILOG, MOSEK, Gurobi, Knitro, Xpress Optimizer и др., основанные на использовании классических моделей, методов и алгоритмов решения задач управления ресурсами. В большинстве таких систем считается, что заказы и ресурсы заранее известны и не изменяются в ходе вычислений, так что даже небольшое изменение ситуации вызывает необходимость полного пересчета планов с существенными затратами времени.

С ростом сложности решаемых задач бизнеса и в условиях динамического изменения спроса и предложения на рынке практическое использование классических методов и средств становится затруднительным вследствие ситуационного характера принимаемых решений по управлению ресурсами с учетом индивидуальных особенностей заказов и ресурсов, а также специфических предметных знаний, известных лишь исполнителям «на земле», и других требований участников процессов управления. Также не решают указанные выше проблемы и известные эвристические подходы, предназначенные для

поиска допустимого решения, такие как жадные алгоритмы локального поиска, генетические алгоритмы, муравьиная оптимизация и т.п. [4–6, 16–19].

Кроме того, до сих пор принято считать, что все сведения о предприятии и данные о его работе должны быть сосредоточены в центральном компьютере, где выполняются расчеты планов на основе заранее заданных и неизменяющихся заказов и ресурсов, а в результате должен быть создан один общий глобально-оптимальный план всего предприятия в целом. При этом предполагается, что обработка должна вестись в пакетном режиме на основе единственной целевой функции, обычно отражающей интересы центра (собственника), при ограничениях, задаваемых только в виде неравенств, расчет вариантов в течение десятков часов вполне приемлем, а исполнители только ждут указаний (отметим, что в ряде случаев требуется задать критерии работы исполнителей, причем ограничения могут задаваться таблично, в виде правил или алгоритмами).

Но на практике ситуация обычно совершенно другая – окружающие нас социально-технические системы становятся все более сложными и распределенными, причем «части» системы приобретают все большую автономность в принятии решений, т.е. изначально признается, что исполнители обладают собственными интересами и предпочтениями и главным принципом управления становится согласованное взаимодействие между всеми участниками процессов управления как по «вертикали», так и по «горизонтали».

Можно утверждать, что классические математические методы комбинаторной оптимизации и различных эвристик с точки зрения процессов принятия коллективных решений со многими участниками по-прежнему отвечают **модели консонанса** (единства) ценностей, в которой всем участникам присущи одни и те же критерии (ценности), в данном случае пусть сколько угодно сложная, но одна целевая функция, как это было, например, во времена Госплана СССР.

Этой модели противостоит модель принятия коллективных решений **в условиях конфронтации**, как, например, во время войны или спортивных состязаний, а также жесткой конкуренции, когда у каждого участника есть свои собственные ценности и кто-то из сторон в результате своих планов действий и взаимодействия обязательно должен выиграть, а кто-то проиграть, что находит выражение и реализуется в теории игр.

Однако в последнее время в бизнесе и технологиях на первый план выходят идеи **поиска согласия (консенсуса)**, которое может строиться как по горизонтали, так и по вертикали, в ходе выработки и согласования коллективных решений, когда у всех участников ценности могут быть разные, но в рамках диалога стороны могут выявлять и разрешать конфликты и находить компромиссы путем переговоров и взаимных уступок. Это отвечает требованиям растущей сетевой экономики с совместным использованием ресурсов (shared economy), что ведет к тотальной юберизации ресурсов.

В этой новой модели экономики и поиска согласия сочетаются возможности как конкуренции, так и кооперации заказов и ресурсов на рынке, что отражается в недавно появившемся термине «coopetition» (от англ.

«Competition» — конкуренция и «Cooperation» — кооперация, здесь их сочетание). Например, небольшие грузовые компании могут конкурировать друг с другом на рынке, но при поступлении большого заказа объединять свои ресурсы. Если одна из таких компаний, имея все грузовики на юге, неожиданно получает заказ на севере, где сосредоточены простаивающие грузовики другой компании, разумнее было бы разделить данный заказ со второй компанией и получить хотя бы 50% возможной прибыли, чем полностью потерять такой заказ. Тенденция перехода от одного «глобального» плана к «распределенному» множеству, причем непрерывно самосинхронизируемых планов, актуальна и для одного предприятия, где подразделения также имеют собственные интересы и планы. В условиях неопределенности и высокой динамики «оптимальные» производственные планы, построенные в центре управления крупного предприятия, оказываются нежизнеспособными уже на уровне цехов из-за неучтенных важных особенностей производственной ситуации, которая могла измениться в ходе расчетов, что требует ручной «доводки» планов на рабочих местах с участием экономистов и диспетчеров, мастеров и рабочих в цехах. Это совершенно не означает, что нет общего плана на уровне завода в целом — такой план просто имеет приблизительную точность, а точный план может быть собран на момент выдачи запроса на основе поступающих планов подразделений. Однако такой план в ту же секунду устареет — в подразделениях будут происходить новые события, вызывающие перестройку их планов и ресинхронизацию с другими.

Важным шагом в развитии моделей новой экономики является теория активных систем (ТАС) [20], развивающая идеи программно-целевого планирования, в рамках которой кроме «центра» свои интересы и свободу выбора могут иметь и «исполнители» на местах, например, при выполнении комплексных проектов. При этом исполнители стремятся к выбору таких своих состояний, которые являются наилучшими с точки зрения их предпочтений при заданных управляющих воздействиях центра, а управляющие воздействия, в свою очередь, зависят от состояний управляемых субъектов. Однако и в данном случае основные решения принимает центр, а горизонтальные переговоры между самими исполнителями для выработки решений не предусмотрены.

В этой связи наиболее перспективными для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами становятся модели и методы самоорганизации множества агентов при построении расписаний, где каждый агент сам принимает решения, но готов идти на переговоры и уступки ради общей цели или партнера. Такого рода модели должны предусматривать как вертикальные (центр-исполнители), так и горизонтальные (исполнитель-исполнитель) взаимодействия для достижения коллективного баланса интересов («консенсуса»).

На сегодня проблемы разработки и применения такого рода методов и средств остаются малоизученными, но являются весьма перспективными как для создания интеллектуальных систем управления ресурсами нового поколения, так и построения сетецентрических платформ и цифровых эко-систем

для решения задач управления ресурсами [20, 21]. Разработанные модели и методы могут найти применение и для решения других типов сложных задач: от проектирования сложных технических изделий до понимания текстов, распознавания образов или извлечения знаний.

В то же время проведенный анализ позволяет сформулировать следующие ключевые особенности и ограничения, затрудняющие применение классических методов комбинаторной оптимизации и различных эвристик:

- необходимо учитывать многочисленные особенности предметной области предприятия: заказов, задач и технологических операций, станков, рабочих и т.д.;

- требуется обеспечивать решение задач высокой размерности пространства решений (сотни ресурсов и тысячи заказов на большой горизонт планирования);

- каждый участник имеет множество индивидуальных предпочтений, ограничений и критериев, которые еще и могут изменяться с течением времени;

- планирование заказов редко осуществляется в пакетном режиме, но все чаще в «скользящем режиме», с наложением на исполнение уже построенных планов;

- при появлении непредвиденных событий (поломка ресурсов или приход новых заказов) все расписание не должно пересчитываться заново с «нуля», а требуется адаптивное перепланирование с разбором конфликтов;

- качество решений по управлению ресурсами зависит от момента времени и любые задержки сразу приводят к затовариванию, простоям или дефициту ресурсов;

- необходимо уметь ситуативно балансировать интересы, чтобы добиться взвешенного (гармоничного) решения, учитывающего интересы всех участников;

- необходимо уметь объяснить решение пользователю и дать ему возможность вмешаться в процесс планирования на любой стадии принятия решений;

- необходимо обеспечить пользователю возможность интерактивно исправить только часть расписания без полного пересчета и т.п.

Таким образом, для решения поставленной задачи требуется создание нового класса интеллектуальных систем управления ресурсами (ИСУР), которые реализуют цикл Деминга по управлению ресурсами, дополняя, а в перспективе и заменяя, менеджеров в этой роли [15].

В отличие от традиционных ERP систем ИСУР должны управляться целями, задаваемыми на основе критериев, предпочтений и ограничений, состав и важность которых у каждого участника могут меняться по ходу развития ситуации. Например, для предприятия в начале года наивысший приоритет имела прибыль от выполнения имеющихся заказов, а затем — крупный заказ важного постоянного клиента или более равномерная загрузка рабочих для

своевременной выплаты зарплаты, и такая смена критериев должна также вызывать адаптивное перепланирование ресурсов.

Эти системы призваны расширить и дополнить функции классических ERP систем, которые на сегодня выполняют лишь функции информационно-учетных систем, в редких случаях реально охватывая контур стратегического и оперативного управления.

4. Предлагаемая методология решения задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени

Рассмотренные задачи построения ИСУР вызывают растущий интерес исследователей и разработчиков интеллектуальных систем к альтернативным подходам, моделям и методам, продуктам и технологиям в исследовании операций. Начиная с 1980–1990 гг. можно отметить возрастание количества исследований, направленных на использование мультиагентных технологий для моделирования процесса поиска решений по построению расписаний во взаимодействии его участников [23–25]. В начале 2000-х годов были предприняты попытки применения мультиагентных технологий для перехода к распределенному решению задач управления ресурсами (от англ. Distributed Problem Solving). Данный подход основан на разделении исходной сложной задачи на несколько подзадач с последующим объединением полученных частных решений. В это же время был выполнен ряд исследований, в которых теория игр применялась к мультиагентным системам распределения ресурсов. В развитие существующих комбинаторных подходов в рамках направления по исследованию операций сформировалась целая новая область решения задач распределенной оптимизации в системах с ограничениями Distributed Constraint Optimization Problem (DCOP) [26]. Несмотря на то что при этом продолжает доминировать централизованный подход «сверху-вниз», в области планирования и оптимизации ресурсов разработаны распределенные модели, методы и алгоритмы с использованием мультиагентных технологий. К ним можно отнести методы Asynchronous Distributed Constraint Optimization (ADOPT), Optimal Asynchronous Partial Overlay (OptAPO), Distributed pseudo-tree optimization (DPOP), Asynchronous Backtracking (ABT), предназначенные для решения задач управления в системах, имеющих сетевую структуру, методы роевой оптимизации (Particle Swarm Optimization), в которых несколько иначе трактуется понятие «роя» агентов, и ряд других [27–29].

Однако предложенные подходы во многом остаются «централизованными» в то время, когда сами «исполнители» могли бы выявлять конфликты и договариваться между собой путем переговоров со взаимными уступками.

Переход к использованию моделей, методов и алгоритмов самоорганизации при построении расписаний был сделан в начале 2000-х годов в работах Самарской школы мультиагентных систем в связи с разработкой концепции сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей) [7–9]. Был предложен набор базовых классов и функций агентов ПВ-сети (в том числе агентов потреб-

ностей и возможностей), разработан набор методов взаимодействий агентов для формирования расписаний в виде «конкурентных равновесий» на виртуальном рынке системы, получаемых в ходе взаимных уступок и компенсаций, реализованы различные приложения по управлению ресурсами.

Суть разработанной мультиагентной технологии построения расписаний на базе концепции ПВ-сети состоит в формировании решения любой сложной задачи управления ресурсами в ходе конкуренции и кооперации агентов потребностей и возможностей на виртуальном рынке системы.

Например, в мультиагентной системе управления грузовыми перевозками роль потребностей могут играть заказы, которые ищут себе грузовики, но, в свою очередь, каждому грузовику требуются водитель и топливо, а водителю — ночлег и питание. Можно продолжить этот ряд и ввести новые потребности и возможности следующей степени детализации процессов согласованного принятия решений, например ввести потребности на техническое обслуживание и ремонт грузовиков, смену водителей с учетом наличия у них международных паспортов или подбор шин с учетом их пробега и состояния трассы для предстоящей поездки.

В качестве базовых агентов, согласно холоническому подходу PROSA, были выбраны агенты заказов, продуктов и ресурсов, штабной агент [30]. На этапе поиска потребностей и возможностей было предложено использовать протоколы аукционноподобных переговоров, построенные по типу Contract-net протокола [31, 32].

В 2009–2010 гг. были опубликованы две монографии [33, 34], которые обобщили первые результаты исследования моделей, методов и алгоритмов работы агентов на виртуальном рынке.

Модель виртуального рынка была сформулирована следующим образом: имеется множество агентов $A = \{A_i\}$, множество целевых функций агентов $C = \{C_i\}$, $i = 1, \dots, n$, где n – количество агентов, и набор задач T . Для любого набора задач T , функция $C_i(T)$ определяется как стоимость выполнения агентом A_i всех задач T . Первоначально каждый агент выбирает некоторый произвольный набор задач, для которого сумма всех расходов агентов не является минимальной, что приводит к неоптимальному распределению. Далее агенты вступают в переговоры с целью улучшения распределения, вследствие чего рано или поздно на виртуальном рынке устанавливается «конкурентное равновесие», которое считается решением задачи с минимальной стоимостью, так как ни одно другое решение не приведет к улучшению результата. Переговоры можно рассматривать как итеративный процесс взаимных уступок и перестановок, на каждом шаге которого агенты заключают «контракт» для обмена задачами и виртуальной валютой.

В [33] была доказана возможность получения глобального оптимума при использовании предлагаемого метода для решения задачи о назначениях и высказаны аргументы в пользу перспективности дальнейшего развития и применения этих методов при решении более сложных NP полных задач планирования и оптимизации. Был отмечен также ряд важных преимуществ данных моделей и методов в случаях, когда классические методы оказыва-

ются не применимы: простота и понятность для разработчиков, устойчивость к изменениям требований, возможность частичного адаптивного изменения планов, органичность распараллеливания и масштабирования и т.д.

В России эта же методология применяется для решения задачи о балансировке нагрузки в грид-сети вычислителей [35, 36]. На примере расчетов грид-сети из 1024 вычислителей показана возможность практического применения разработанных методов и алгоритмов в задачах большой размерности, причем в условиях действия помех, когда другие методы оказываются в принципе не применимы.

В ходе проведенных разработок был введен ряд новых классов агентов и для каждого агента — собственные функции удовлетворенности и бонусов-штрафов, регулирующих их эластичность при уступках для достижения баланса интересов. Например, цель заказа — максимально дешевое или быстрое исполнение, цель ресурса — максимальная загрузка, а цель продукта — меньше пролеживать, но в зависимости от ситуации приходится идти на компромиссы и разменивать стоимость на время и т.п.

В основе разработанной технологии, поддерживающей конкуренцию и кооперацию агентов, лежит возможность для агентов непрерывно, асинхронно и параллельно разрешать возникающие конфликтные ситуации, когда несколько заказов или задач претендуют на использование одного и того же ресурса или продукта (или наоборот), посредством предложения выплаты компенсаций за освобождение слота времени.

Получение компенсации позволяет уступающей стороне конфликта найти себе новое место без потери удовлетворенности или с минимально возможной потерей удовлетворенности при получаемой дополнительной сумме на счет для поиска вариантов улучшения своего состояния в будущем.

Методология построения мультиагентных ПВ-сетей в интеллектуальных системах управления ресурсами предполагает реализацию следующих принципов:

1. Автономность агентов, т.е. наличие у каждого экземпляра агента индивидуальных целей, критериев их достижения, предпочтений и ограничений, а также состояний, отражающих контекст ситуации.
2. Наличие у агента собственных сценариев, методов и средств для достижения целей, что может включать и более традиционные методы, например методы ветвей и границ или машинного обучения.
3. Наличие прямых взаимодействий агентов в виде переговоров на виртуальном рынке системы, в которых выявляются конфликты, ищутся и согласовываются варианты их разрешения путем взаимных уступок, в частности, за счет аукционноподобных протоколов.
4. Наряду с прямыми переговорами могут использоваться и косвенные, опосредованные через общую сцену, содержащую контекст ситуации и формируемое решение задачи построения расписания. При этом роль сцены как семантической сети состоит в том, чтобы фиксировать отношения между объектами предметной области, что позволяет использовать «топологию» такой сети для сокращения перебора вариантов и

быстрого выяснения того, с какими ближайшими локальными соседями следует разговаривать.

5. Наличие специальной среды, где каждый агент в любой момент времени может стать активным и старается улучшить свое состояние, реагируя на события и обладая проактивностью. В такой среде должен поддерживаться параллельный и асинхронный характер работы каждого экземпляра агента. В этих целях среда может предлагать диспетчер агентов и желтые страницы или «меш»-коммуникацию (от англ. mesh), без общего единого центра, где каждый агент может понять, с кем ему взаимодействовать, проводя локальный анализ отношений семантической сети.
6. Решение проблемы в виде искомого расписания выдается не в виде множества вариантов, полученных в ходе перебора вширь или вглубь и упорядоченных по убыванию значений единственной заданной целевой функции, но как одно, «наилучшее» в данной ситуации, рациональное решение, отражающее баланс целевых функций или интересов (консенсус) агентов участников, достигнутый в виде неупрощаемого «конкурентного равновесия» («динамического останова»), когда агенты продолжают работать, но больше ни один агент не может улучшить свое состояние так, чтобы при этом не ухудшить состояние других агентов и системы в целом.
7. Важной особенностью архитектуры построения системы является высокая «модульность» агентов, дающая возможность быстро дорабатывать логику отдельных агентов или вводить новые классы агентов, чтобы последовательно наращивать сложность системы для отражения сложности выявляемых разнообразных факторов, влияющих на качество услуг или эффективность предприятий.
8. Важной задачей развития мультиагентных ПВ-сетей является создание унифицированной мультиагентной системы, поддерживающей решение задач планирования ресурсов в различных предметных областях, и конструктора онтологий, позволяющего строить онтологические модели любых предприятий на основе базовой онтологии «Управление ресурсами» и прикладных онтологий для управления ресурсами в машиностроении, авиастроении, судостроении, приборостроении, микроэлектронике и т.д.

Новизной технологии является возможность адаптивно пересматривать решения, ранее принятые в ходе планирования, что в особенности важно для работы по событиям в режиме реального времени, в сравнении с обычной практикой first-in/first-out, когда, например, новые заказы размещаются инкрементально в свободные слоты времени на ресурсах, т.е. идет планирование в «хвост» расписания.

Более подробно разработанные модели и методы рассмотрены в [12].

Разработанный подход был впервые использован в 1999 г. при построении мультиагентной системы управления поставками деревянных частей для оформления салонов автомобилей класса «люкс» на фабриках компании

Фольксваген (Германия) и в дальнейшем к 2008 г. позволил создать первое поколение промышленных мультиагентных систем для управления танкерами (2002), консолидацией грузовых перевозок (2004), корпоративным такси (2006), рекламными баннерами (2008) и т.д.

В 2010 г. началась разработка нового инструментария, на базе которого были реализованы специализированные модели и методы построения ПВ-сетей, включая гибридную комбинацию классических и мультиагентных методов для управления контейнерными грузовыми перевозками — Full Truck Load (FTL) и частично заполненными грузовиками — Less Truck Load (LTL) (2010), движением поездов (2012), фабриками (2014) и проектами (2015), грузопотоком Международной космической станции (2016), мобильными бригадами (2017) и рядом других приложений.

В 2017–2020 гг. был сделан следующий шаг в развитии предлагаемого МАС подхода и предложены новые классы программных агентов для решения сложных задач управления производственными системами, в частности предложены агенты технологического процесса и каждой задачи, введена двухуровневая микроэкономика виртуального рынка, а также разработаны онтологический подход и структура унифицированной мультиагентной системы для настройки на специфику предметной области и бизнеса предприятий.

5. Формализация задачи и метода адаптивного планирования в интеллектуальных системах управления ресурсами предприятий

5.1. Онтологическая модель предприятия для настройки унифицированной мультиагентной системы на специфику предметной области предприятия

В целях настройки унифицированной МАС на специфику предметной области предприятия выделены основные концепты и построена базовая онтология управления ресурсами в форме семантической сети, состоящей из классов понятий и отношений, а также предложена методика построения онтологической модели цифрового двойника (ЦД) предприятия [37]. Общее определение онтологии имеет вид: $O = \langle C, R, \Phi \rangle$, где C – множество понятий, R – множество атрибутов и отношений (n -местных предикатов), Φ – множество функций семантической обработки (интерпретации), заданных на понятиях и отношениях. Онтологии все чаще используются при создании интеллектуальных систем [38–40], но для управления ресурсами требуемые онтологии не были известны. Для построения онтологических моделей предприятий предлагается использовать базовую онтологию управления ресурсами O_{plan} , в которой на основе анализа различных производственных задач выделены наиболее общие и повторно используемые понятия (табл. 1), в то время как детали, зависящие от предметной области, предложено специфицировать в прикладных онтологиях O_{domain} , расширяющих базовую:

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

Таблица 1. Основные понятия базовой онтологии управления ресурсами

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

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

В предлагаемой формализованной онтологии управления ресурсами C_{plan} заказы ($Order$) определяют количество и сроки создания продукта ($Product$), задачи ($Task$) задают необходимую последовательность действий для его получения и специфицируют необходимые для своего выполнения ресурсы ($Resource$):

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

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

$$\forall x \exists y (Order(x) \rightarrow Product(y) \wedge create(x, y)).$$

Продукты могут поступать на вход задачи, а также являться результатом ее выполнения, и в зависимости от роли в технологическом процессе их предложено декомпозировать на «Производимые» (*Produced Product*) и «Потребляемые» (*Consumed Product*). Между задачей и соответствующим видом продукта предложены отношения «производит» (*produce*) и «потребляет» (*consume*):

$$\begin{aligned} \forall x \exists y (ProducedProduct(x) \rightarrow Product(x) \wedge Task(y) \wedge produce(y, x)), \\ \forall x \exists y (ConsumedProduct(x) \rightarrow Product(x) \wedge Task(y) \wedge consume(y, x)). \end{aligned}$$

Множество задач предложено разбивать на подмножества: «Групповые» (*Group Task*) и «Атомарные» (*Atomic Task*). Задачи связаны между собой посредством отношений вложенности («является частью» – *part of*) и упорядоченности («следует за» – *follow*). Эти отношения позволяют агенту найти

Таблица 2. Базовые типы задач

Вид задачи		Параметры
Атомарная	Фиксированная длительность	Продолжительность задана фиксированной нормой времени
	Фиксированный объем работы	Продолжительность зависит от состава и характеристик используемых ресурсов и/или объема выпускаемого продукта
	Гамак	Выполняется строго между задачами предшественниками и задачами последователями
Групповая		Продолжительность «покрывает» интервалы выполнения дочерних задач

Таблица 3. Базовые типы ресурсов

Вид ресурса	Параметры
Преобразуемый	Тратится при выполнении задачи (в количестве, определенном ее требованиями), может быть восполнен согласно графику поставок
Обеспечивающий	Становится доступным для повторного использования в прежнем количестве сразу после завершения задач, на которые был выделен. Может иметь график зависимости располагаемого объема от времени.

предыдущую и следующую задачу для запроса о перемещении в расписании или сообщения о возникшей задержке в выполнении:

$$\begin{aligned}
 & \forall x, y (partOf(x, y) \rightarrow Task(x) \wedge Task(y)), \\
 & \forall x, y (follow(x, y) \rightarrow Task(x) \wedge Task(y)), \\
 & \forall x \exists y (GroupTask(x) \leftrightarrow Task(x) \wedge Task(y) \wedge partOf(x, y)), \\
 & \forall x (AtomicTasks(x) \leftrightarrow \neg GroupTasks(x)).
 \end{aligned}$$

В зависимости от способа определения длительности предложено атомарные задачи подразделять на задачи с фиксированной длительностью, с фиксированным объемом работ и на задачи вида «гамак» (табл. 2). Ресурсы обеспечивают выполнение задач, с точки зрения участия в технологическом процессе предложено подразделять их на преобразуемые и обеспечивающие (табл. 3).

Отношение «требует» (*require*) указывает типы ресурсов, необходимые для выполнения задачи. Для выбора вариантов выполнения задачи на различных ресурсах вводится понятие «Требование к ресурсам» (*Resource requirement*):

$$\forall x, y ((require(x, y) \rightarrow Task(x) \wedge (ResourceRequirement(y) \vee Resource(y))).$$

Продукты могут требовать размещения (*stored*):

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

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

$$R_{plan} = \{create, consume, produce, partOf, follow, require, stored\}.$$

Для работы с онтологиями управления ресурсами и построения баз знаний предприятий были выделены и реализованы в виде библиотеки средств агентов следующие функции семантической обработки (интерпретации) Φ :

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

В отличие от базовой онтологии управления ресурсами онтология предметной области может дополняться новыми элементами без необходимости последующего внесения изменений в состав и логику работы агентов. Для работы унифицированной МАС добавляемые новые понятия, атрибуты и отношения должны быть достижимы относительно базовых понятий, атрибутов и отношений при применении к ним функций семантической обработки Φ . Например, на уровне онтологии машиностроения в качестве продуктов рассматриваются детали (*Component*), сборочные единицы (*AssemblyElement*) и изделия (*FinalProduct*), в качестве задач – технологические процессы (*Process*) и операции (*Operation*), ресурсы представлены оборудованием (*Equipment*), оснасткой (*Tool*) и персоналом (*Employee*):

$$\begin{aligned} \forall x (Product(x) \rightarrow Component(x) \vee AssemblyElement(x) \vee FinalProduct(x)), \\ \forall x (Task(x) \rightarrow Process(x) \vee Operation(x)), \\ \forall x (Resource(x) \rightarrow Equipment(x) \vee Tool(x) \vee Employee(x)). \end{aligned}$$

На основе прикладной онтологии строится онтологическая модель предприятия:

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

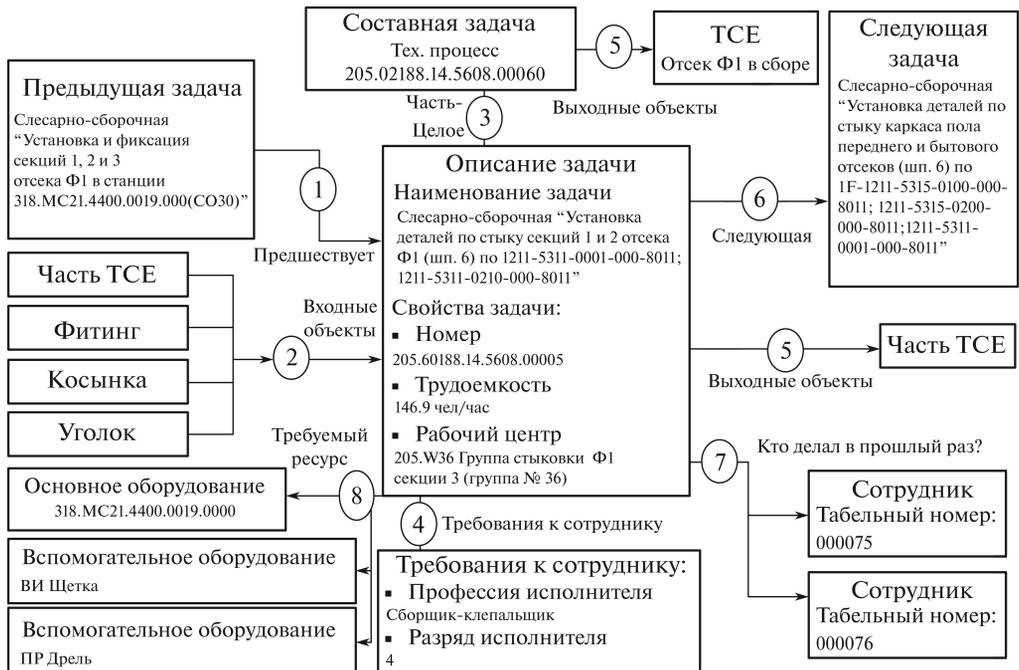


Рис. 1. Пример онтологической спецификации одной операции по сборке изделия (цифрами указаны отношения: 1 и 6 – «предыдущая/последующая задача», 2 и 5 – «вход/выход задачи», 3 – «часть/целое», 4 – «требует», 5 – «связана», 7 – «исполнитель»).

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

На основе онтологической модели строится сцена предприятия S , которая описывает состояние предприятия и содержит значения атрибутов всех экземпляров понятий и отношений онтологической модели предприятия для заданного момента времени t : $S = M(t)$. В результате применения предлагаемого подхода расписание работы предприятия представляется в виде семантической сети связанных между собой отношениями понятий (рис. 1), что позволяет не только учитывать специфику каждой задачи, но и использовать «топологию» расписания при принятии решений агентами, например, быстрее определять состав участников переговоров, существенно сокращая перебор вариантов и время вычислений.

Для создания ИСУР предложена методика, позволяющая формализовать знания предметной области в онтологии и на этой основе создавать онтологические модели предприятий. Она состоит в выполнении нижеследующих этапов:

1. Описать номенклатуру используемых и производимых продуктов или сервисов (сырья, полуфабрикатов, готовых изделий, сборочных единиц и др.).
2. Описать состав и структуру производственных ресурсов.
3. Задать технологические процессы получения продуктов, представляющие собой упорядоченный список задач (операций).
4. Определить критерии, предпочтения и ограничения для адаптивного планирования заказов на ресурсы предприятия при возникновении событий рассогласования плана и факта.
5. В качестве входных данных для такой модели могут подаваться перечень заказов, содержащих сведения об изготавливаемом продукте, его количестве и сроках выполнения, а также выделенные события (новый заказ, поломка станка, задержка исполнения задачи и т.д.).

В результате предприятию ставится в соответствие его онтологическая модель, отражающая текущее состояние его заказов и ресурсов, а также планы и показатели работы на любой горизонт времени, ограниченный сроками крайнего заказа.

5.2. Унифицированная мультиагентная система для управления ресурсами

Рассмотрим метод работы унифицированной мультиагентной системы управления ресурсами предприятий в составе ИСУР при переходе из текущего в новое состояние при появлении очередного события.

Состояние ИСУР предприятия S_{Π} предлагается определить композицией состояний $s_{i,i} = (1, n)$ объектов, участвующих в производственном процессе (заказов, продуктов, ресурсов и задач):

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

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

где: $model_i$ – онтологическая модель объекта; $plan_i$ – план работы объекта, kpi_i – показатели эффективности его работы. Если обозначить как S_{real} состояние реального предприятия, то необходимо, чтобы состояние реального предприятия и состояние его ИСУР в каждый момент времени k максимально совпадали:

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

где D – функция, показывающая степень различия онтологической модели, планов и показателей объектов ИСУР с реальным предприятием. Тогда при появлении нового события $Event^{(k)}$ в реальном предприятии его ИСУР должен максимально быстро перейти в новое состояние за счет переходного процесса по адаптивному перепланированию задач и ресурсов, задетых событием:

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

Таблица 4. Цели, предпочтения и ограничения основных классов агентов

Тип	Цели и предпочтения	Ограничения
Агент заказа	Быть выполненным с минимальной задержкой (c) и стоимостью (p): $Y_i = w_1 \left(1 - \frac{c}{c_{kp}}\right) + w_2 \left(1 - \frac{p}{p_{kp}}\right)$	Сроки, объем, предельная стоимость
Агент задачи: – групповой – атомарной	Быть выполненным на подходящем ресурсе в указанные сроки за минимальное время ($\tau_i = finish_i - start_i$): $Y_i = \begin{cases} 1, & \tau_i < \tau_{opt} \\ \frac{\tau_i - \tau_{kp}}{\tau_{opt} - \tau_{kp}} & \text{иначе,} \end{cases}$	Характеристики требуемых ресурсов и продуктов, сроки начала и окончания, взаимосвязи с другими задачами
Агент ресурса	Быть максимально загруженным, минимизировать простои и переналадки: $Y_i = \begin{cases} 0, & u_i < u_{kp} \\ \frac{u_i - u_{kp}}{u_{opt} - u_{kp}} & \text{иначе,} \end{cases}$ где u_i – утилизация ресурса i	Календарь работы, интервалы недоступности, правила обслуживания и переналадки, производительность
Агент продукта	Обеспечить свое хранение, минимизировать время между производством и потреблением (ϵ): $Y_i = 1 - \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{kp}}$	Требования по хранению, время поставки или производства, время потребления
Агент системы (предприятия в целом)	Выявление «узких мест» в расписании, управление активностью агентов системы, взаимодействие с внешними системами	Время, отводимое на планирование, глубина цепочек перестановок в расписании

где F – функция, адаптивно перестраивающая план работы предприятия в ответ на поступившее событие, которую и должна реализовывать МАС. Для решения поставленной задачи выделен модифицированный набор базовых объектов ПВ-сети и каждому такому объекту s_i поставлен в соответствие программный агент a_i , реализующий заданное для его класса поведение (табл. 4).

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

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

где: $y_{i,j}$ – компонент функции удовлетворенности по критерию $j = \overline{(1, M)}$, $w_{i,j}$ – весовой коэффициент, такой что $0 \leq w_{i,j} \leq 1$ и $\sum_{(j=1)}^M w_{i,j} = 1 \forall i$.

Для автоматизации принятия решений будем использовать виртуальный рынок ПВ-сети системы, на котором агенты заказов могут покупать время ресурсов, и решать конфликтные ситуации, когда несколько заказов или задач претендуют на использование одного и того же ресурса или продукта, посредством выплаты компенсаций за освобождение слота времени.

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

Функция удовлетворенности агента связывается с оценкой состояния объекта, а функция бонусов и штрафов – с возможностями агента перестроить расписание для удовлетворения своих интересов. Вид функций выбирается таким образом, чтобы приближение состояния агента к его идеалу показателей kpi_i повышало удовлетворенность и размер бонуса агента.

Агенты ресурсов дополнительно характеризуются функцией стоимости $W_i(plan_i, kpi_i)$, определяющей стоимость размещения задач. Модификация модели ПВ-сети связана с введением неоднородных классов агентов с собственными функциями удовлетворенности и функциями бонусов и штрафов, а модификация метода сопряженных взаимодействий позволяет использовать онтологическую модель предприятия в работе унифицированной МАС, в которой для каждого экземпляра объекта модели будут создаваться собственные экземпляры агентов для анализа ситуации, планирования ресурсов и контроля их использования (рис. 2):

1. В соответствии с текущим состоянием ИСУР S_{Π} создаются экземпляры агентов заказов, ресурсов и продуктов, которые получают разрешение от агента системы начать активность.
2. Агент активного заказа a_k считывает из базы знаний технологический процесс изготовления связанного с ним продукта и порождает агентов задач, соответствующих технологическому процессу и его дочерним операциям, связанных между собой отношениями вложенности и очередности.
3. Агент задачи верхнего уровня проверяет наличие используемых при выполнении задачи продуктов, оценивает требования по ресурсам и подбирает их комбинацию на основе оценки своей продолжительности.
4. Процедура поиска вариантов размещения включает анализ требуемых ресурсов, сопоставление требований задач и возможностей ресурсов, согласование времен доступности всех ресурсов, выбор лучшей комбинации исполнителей на основе метода ветвей и границ.
5. По мере подбора ресурсов определяется множество заказов $\{a_i \mid i \neq k, plan'_k \cap plan_i \neq \emptyset\}$, мешающих размещению на выбранных ресурсах (конфликтное множество), что определяет направленный характер проводимого перебора и существенно сокращает число вариантов.

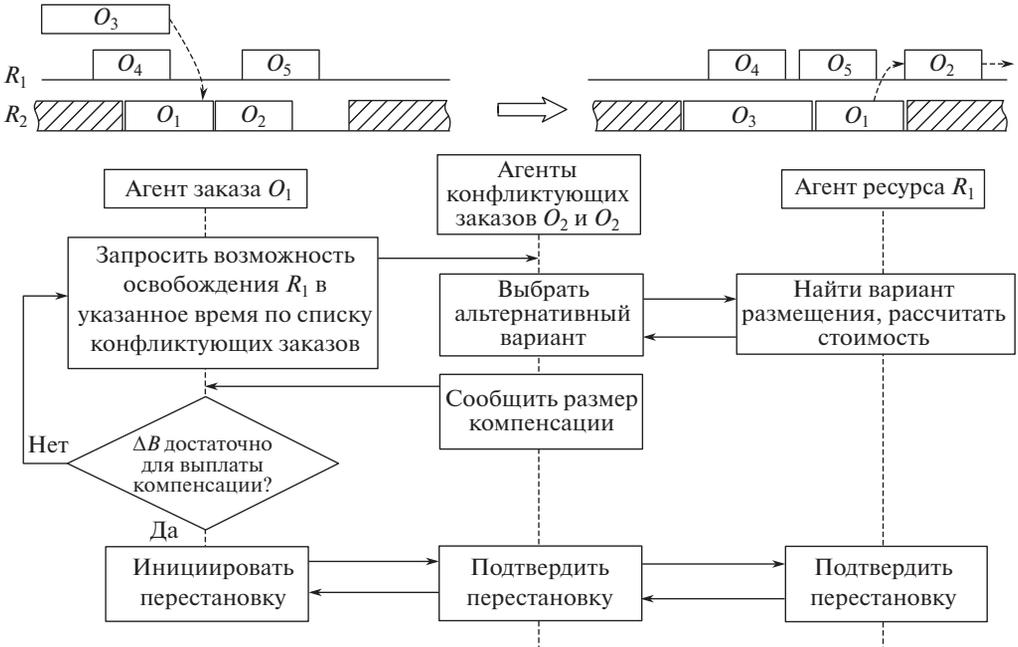


Рис. 2. Фрагмент протокола переговоров по разрешению конфликтов.

6. После выбора варианта размещения агент групповой задачи отправляет запрос на планирование агентам дочерних задач.
7. Агенты дочерних задач рекурсивно проводят поиск вариантов размещения с учетом установленных родительской задачей ограничений. Результаты планирования сообщаются агенту родительской задачи верхнего уровня, который уточняет свое размещение или предлагает задачам найти другое размещение.
8. Агент верхней задачи сообщает агенту заказа о выбранном размещении.
9. Агент заказа предлагает конфликтующим заказам найти себе другое место в расписании, сообщив потери, которые им пришлось понести, по сравнению с базовым (отправным для текущей версии плана) вариантом расписания (рис. 1). В результате определяется цепочка перестановок, рассчитываются потери агентов ΔB_i , которых затронули изменения. Цепочка перестановок успешна, если агент заказа может компенсировать потери конфликтующим заказам благодаря достигаемому приросту функции бонусов и штрафов ΔB_k :

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

В этом случае изменение утверждается, иначе – ищутся другие варианты.

10. Агент заказа проверяет наличие связанных с ним отношением «Производится» продуктов и оповещает их агентов о сроках поставки на склад.

11. Процесс завершается, если вышло время, отводимое на построение расписания, или достигнуто условие «конкурентного равновесия» (**консенсуса**), которое состоит в том, что для любого агента a_k больше не находится такого изменения плана работы $plan'_k$, которое привело бы к приросту удовлетворенности ΔY_k и, как следствие, увеличению значения функции бонусов и штрафов ΔB_k , что смогло бы компенсировать суммарные потери остальных агентов a_i , затронутых этим изменением и нашедших другой вариант размещения $plan'_i$, минимизирующий их потери и согласующийся с ранее принятыми изменениями:

$$\Delta B_k + \sum_{i \neq k}^n \Delta B_i < 0 \quad \forall k.$$

12. По достижению консенсуса ИСУР приостанавливает свою работу, выдает построенный новый план исполнителям и переходит в режим ожидания новых событий.

Существенным фактором, снижающим вычислительную сложность алгоритма, является использование направленного поиска вариантов перестановок при адаптивной перестройке расписания, при котором взаимодействие происходит в основном между конфликтующими заказами.

6. Инструментальный комплекс для создания ИСУР

Для автоматизации процессов построения ИСУР разработаны функции и архитектура комплекса инструментальных средств. В состав комплекса включен конструктор онтологий (КО) и баз знаний (КБЗ) предприятия (включает как классы, так и экземпляры понятий), конструктор сцен, унифицированная МАС управления ресурсами в реальном времени, очередь сообщений и средства взаимодействия с пользователем (рис. 3).

Основное назначение КО – построение, редактирование и хранение базовой и прикладных онтологий, а также предоставление программного доступа к этим данным. КБЗ предназначен для формирования онтологических моделей предприятий на основе онтологии выбранной предметной области.

Унифицированная МАС управления ресурсами обеспечивает создание и настройку виртуального мира агентов под заданную онтологическую модель каждого предприятия. На основе онтологической модели в виртуальном мире ИСУР предприятия создаются экземпляры классов агентов для каждой сущности конкретного предприятия (заказа, станка, технологии, изделия, сотрудника и т.д.) и обрабатываются события, поступающие через очередь событий из мира реального предприятия. Основными функциями унифицированной МАС являются адаптивное перепланирование расписания выполнения заказов с достижением нового консенсуса агентов по каждому событию, а также последующий мониторинг и контроль их исполнения. Исходные данные, результаты перепланирования и показатели работы МАС размещаются в сцене

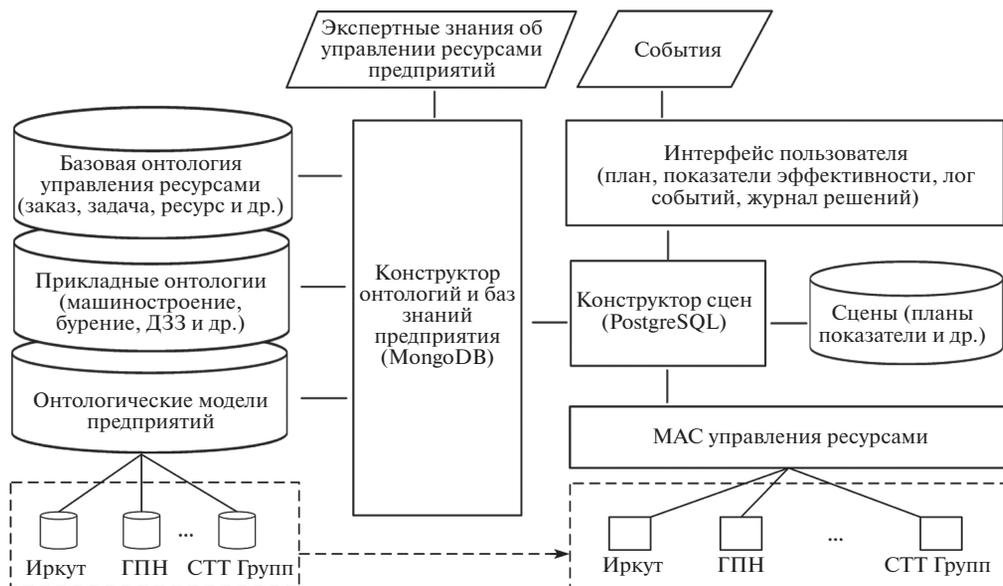


Рис. 3. Структура инструментального комплекса создания ИСУР.

мира агентов, которая содержит массивы данных истории, текущего состояния и планов работы ИСУР, показатели эффективности.

Веб-интерфейс пользователя включает в себя набор визуальных компонентов для задания исходных параметров и визуализации результатов.

При загрузке онтологической модели предприятия создается виртуальный мир агентов ИСУР, содержащий экземпляры основных агентов, и сцену (набор массивов) данных, отражающую параметры состояния объектов предприятия.

В любой момент времени ИСУР предприятия может быть скопирована в отдельную версию для перехода к режиму моделирования «Что будет, если...?», чтобы предсказать реакцию ИСУР на события, которые ожидаются, но пока еще не случились (приход нового крупного заказа, ввод в действие новых ресурсов, смена технологических процессов и т.д.).

Разработанный комплекс был использован для решения прикладных задач управления ресурсами:

- агрегатно-сборочного производства самолетов МС-21 для ОАО «Иркут»;
- сборочного производства грузовых электромобилей для ООО «ТРА»;
- бурения нефтедобывающих скважин для ООО «Газпромнефть-Ямал»;
- выращивания посевов растений для ОАО «Рассвет»;
- целевого применения группировки КА ДЗЗ для «СТТ-Групп».

Исследование применения разработанного комплекса показало существенное снижение сложности и трудоемкости разработки ИСУР. При этом для каждого созданного ИСУР оценивался объем изменений, вносимых в базовую

Таблица 5. Результаты применения комплекса для создания ИСУР предприятий

Задача	Число классов понятий и отношений			Кол-во агентов	Время на разработку (чел/м)	
	O_{plan}	O_{domain}	М		БЗ	МАС
Сборка грузовиков	61	89	382	>520	1	2
Бурение скважин	61	89	382	>520	1	2
ЦД посевов	61	42	236	>100	1	1
Группировка КА	61	112	304	> 450	1	4

онтологию, а также объем доработок основных классов агентов под задачу (табл. 5).

Представленные данные показывают, что базовая онтология управления ресурсами O_{plan} оказалась построена из примерно 60 классов основных понятий и отношений. Прикладные онтологии расширяют состав понятий и отношений примерно в 2–3 раза. Онтологические модели предприятия, включающие экземпляры, имеют от 236 до 925 экземпляров. Именно эти модели и загружаются в ИСУР, позволяя автоматически создать требуемое число агентов. Трудоемкость доработки унифицированной ИСУР для каждого из указанных применений составила в среднем 2–3 мес, что по экспертным оценкам позволяет в 3–4 раза сократить сроки и стоимость создания ИСУР в сравнении с традиционным подходом.

7. Пример построения ИСУР для решения прикладной задачи

7.1. Постановка задачи для управления спутниковой группировкой ДЗЗ

Рассмотрим применение разработанного подхода для создания ИСУР управления многоспутниковой группировкой космических аппаратов (КА) для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В основе управления группировкой КА лежит задача адаптивного планирования полетных операций по заказам на съемку объектов ДЗЗ, поступающим в заранее не известные моменты времени, или по событиям неисправностей КА или каналов связи, также возникающим в заранее не известные моменты времени. Пусть задана упрощенная модель космической системы (КС) для решения задач ДЗЗ, представляющая собой совокупность двух сегментов: космического комплекса и наземного комплекса. Космический комплекс выполняет функции получения и передачи информации, наземный комплекс – функции приема-передачи и обработки передаваемой информации. Космический комплекс состоит из множества КА $S = s_i, i = \overline{1, L}$. Каждый КА s_i характеризуется набором элементов орбиты и параметрами установленного на нем бортового оборудования. Наземный комплекс представлен множеством наземных станций приема информации

(НСПИ) $G_R = \{g_r\}, r = \overline{1, R}$. Каждая станция g_r характеризуется географическим местоположением и параметрами установленной антенны. Для НСПИ и КА могут быть указаны ограничения в виде графика работы и интервалов недоступности. КС должна обеспечить выполнение множества заявок на съемку точечных и площадных объектов наблюдения (ОН) $O = \{o_p\}, p = \overline{1, P}$. Для заявки на съемку o_p может быть указан ее приоритет pr_p (заявка с низким приоритетом не должна мешать оптимальному расположению более высокоприоритетной заявки) и множество ограничений: момент времени, до которого необходимо получить снимки t_{pnd}^e , коэффициент баланса между оперативностью и качеством получаемой информации c_p (задается в диапазоне от 0 до 1), минимальное и желаемое линейное разрешение полученного снимка $\min R_p$ и $\max R_p$. В рассматриваемой модели КС КА выполняет две операции:

– съемка некоторой области sa_jshoot_j , характеризующаяся интервалом выполнения $t_j^{shoot} = [t_j^{shootStart}, t_j^{shootEnd}]$ и углом крена КА $sAngle_j$;

– проведение сеанса связи КА с НСПИ с целью передачи полученных данных на Землю $drop_j$, характеризующегося интервалом выполнения $t_j^{drop} = [t_j^{dropStart}, t_j^{dropEnd}]$.

НСПИ в свою очередь выполняет одну операцию – получение данных с КА $receiv_j$, характеризующуюся интервалом выполнения $t_j^{receive} = [t_j^{receiveStart}, t_j^{receiveEnd}]$.

Для реализации космической съемки ДЗЗ на основе заявок, поступающих от потребителей, требуется сформировать комплексный план выполнения операций на заданный горизонт планирования, составленный в соответствии с критерием минимизации времени доставки снимков потребителям, а также максимизации их качества. Таким образом, целевая функция системы имеет вид: $t_j^{receiv} = [t_j^{receivStart}, t_j^{receivEnd}]$.

$$OF = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^N OF_k \rightarrow \max,$$

$$OF_k = c_k F_1^k + (1 - c_k) F_2^k \rightarrow \max,$$

$$F_1^k = \frac{t_k^{end} - t_k^{dropEnd}}{t_k^{end} - t_k^{start}},$$

$$F_2^k = \begin{cases} \frac{\min R_k - r_k}{\min R_k - \max R_k}, & \text{если } r_k \geq \max R_k \\ \frac{r_k}{\max R_k} & \text{иначе,} \end{cases}$$

где

OF – целевая функция системы,

OF_k – целевая функция k -й задачи,

N – количество запланированных съемок,

F_1^k – оценка критерия оперативности получения информации для k -й задачи,

F_2^k – оценка критерия качества полученного снимка для k -й задачи,

t_k^{start}, t_k^{end} – горизонт планирования для k -й задачи,

r_k – фактическое линейное разрешение полученного снимка для k -й задачи.

Примем, что на полученное решение накладывается ряд ограничений:

- выполнение условия наблюдаемости между КА и ОН при съемке;
- наличие радиовидимости между КА и НСПИ при передаче результатов съемки;
- наличие свободного места в бортовом запоминающем устройстве (ЗУ) КА;
- выполнение условия приоритезации заявок;
- согласованность последовательности моментов времени проведения операций;
- КА и НСПИ могут одновременно выполнять не более одной операции.

7.2. Функциональные возможности прототипа ИСУР для решения задач ДЗЗ

Разработанный прототип системы предназначен для составления и адаптивного перестроения локально-оптимального плана выполнения задач по съемке точечных и площадных районов средствами группировки КА при заданных критериях эффективности и технических характеристиках КА и НСПИ, принятой модели обстановки и внешней среды, а также для моделирования КС при изменении ее состава и конфигурации.

Система обеспечивает следующие основные функции:

- загрузка исходных данных о составе и параметрах элементов КС;
- загрузка заявок на съемку точечных и площадных ОН;
- составление локально-оптимального плана работы КС (группировки КА и НСПИ) при заданном составе технических характеристик;
- адаптивное перестроение локально-оптимального плана работы КС по событиям, изменяющим характеристики КС (состав КА и НСПИ, технические характеристики систем КА и НСПИ, добавление ограничений работы КА и НСПИ, изменение критериев планирования), изменяющим исходные данные по съемке точечных и площадных районов;
- визуальное моделирование процесса выполнения заявок ДЗЗ, приема и передачи данных на наземные станции;
- формирование графиков и диаграмм, отображающих результаты планирования;
- выгрузка полученного локально-оптимального плана работы КС.

Система создается для эксплуатации в профильных подразделениях Центра управления полетами (ЦУП) и обеспечения поддержки принятия решений по планированию использования группировки КА.

7.3. Экспериментальные исследования ИСУР для решения задач ДЗЗ

Для проведения экспериментальных исследований и оценки степени пригодности разработанной системы к решению задачи управления группировками КА в реальном времени использовалась модель КС, в состав космического комплекса которой входит группировка из 30 идентичных КА, а наземный комплекс системы представлен сетью из 10 НСПИ. Моделировался случайный поток заявок на съемку объектов ДЗЗ, и результаты планирования подвергались автоматизированной обработке с участием экспертов. Эксперименты проводились на персональном компьютере с центральным процессором Intel Core i7-3770 (4 ядра/8 потоков, 3.4ГГц) и оперативным запоминающим устройством 8Гб под управлением операционной системы Windows 10.

7.3.1. Анализ хода и результатов планирования в ИСУР для ДЗЗ

В данном исследовании производился сбор статистической информации с целью оценки качества полученного расписания и анализа хода его построения. На ее основе построены ряд графиков и гистограмм. На рис. 4 изображены графики с историей изменения значения текущей и предельной целевой функции системы с момента начала планирования, при помощи которых можно оценить отклонение текущего значения целевой функции (ЦФ) системы от ее максимально возможного значения:

$$\lim OF = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^N OF_k(i\omega_k),$$

где

$\lim OF$ – максимально возможная ЦФ системы, M – общее число задач, N – число рассмотренных задач, $(i\omega_k)$ – вариант размещения, расположенный в точке глобального оптимума ЦФ k -й задачи.

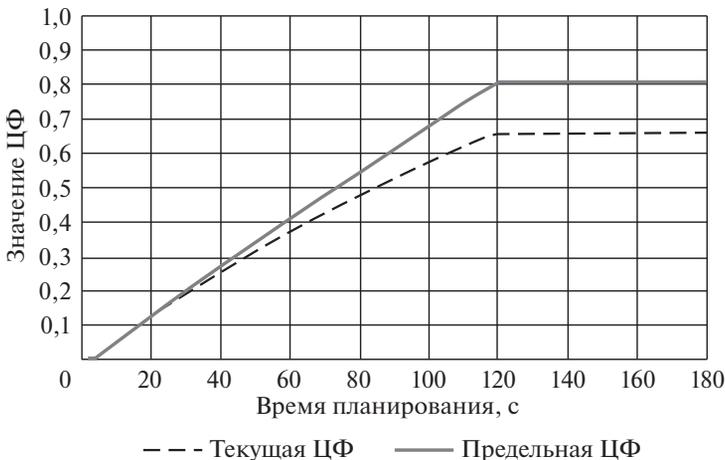


Рис. 4. Графики изменения значения текущей и предельной ЦФ в ходе планирования.

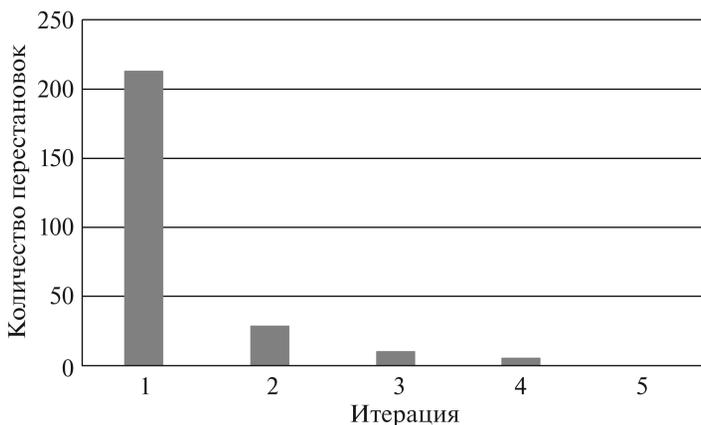


Рис. 5. Число перестановок задач на каждой итерации проактивного планирования.



Рис. 6. Распределение числа вариантов размещения задач лучше текущего, на котором она запланированы.

На рис. 5 изображена диаграмма распределения числа вариантов размещения задач лучше текущего, на котором они запланированы, т.е. вариантов размещения, найденных в ходе планирования, для которых ЦФ задачи больше ее текущего значения, но на которых задача не смогла разместиться в результате конфликтов с другими задачами. Из анализа данной диаграммы видно, что около 1200 задач запланированы на наиболее подходящем для них ресурсе, а более половины оставшейся части задач расположены в 30% лучших вариантов, что говорит об относительно «хорошем» качестве построенного плана.

Столбиковая диаграмма распределения числа перестановок задач на каждой итерации проактивного планирования (рис. 6) демонстрирует его быструю сходимость, так, число перестановок уже на второй итерации планирования меньше числа перестановок на первой итерации в 7 раз.

*7.3.2. Исследование адаптивности получаемого
в ИСУР расписания ДЗЗ*

В данном исследовании оценивалась способность метода к адаптации расписания по «разрушающим» событиям, в частности по выходу из строя одного из КА.

В качестве исследуемого параметра здесь рассматривалось время, затраченное на перепланирование, и качество полученного расписания. Для этого была проведена серия из 10 экспериментов, в ходе которых вначале планировалось выполнение 3000 заявок на съемку ОН, сгенерированных случайным образом по равномерному закону распределения. После того как все заявки были успешно размещены в расписании, из системы исключался один из КА и измерялись время, затраченное на перестроение расписания, изменения значения ЦФ системы и количество запланированных заявок. Результаты экспериментов представлены в табл. 6.

Результаты эксперимента показывают, что выход из строя одного из КА привел к резкому падению значения ЦФ системы в среднем на 0,1 и необходимости поиска новых вариантов размещения для 409 заявок. В ходе перестроения расписания на другие КА было перепланировано 403 заявки, что составляет 98% от числа заявок, которые были запланированы на удаленный КА. В результате восстановления расписания значение ЦФ повысилось до 0,69, что меньше исходного всего на 0,04.

Среднее время перепланирования при этом составило около 9 с.

Таким образом, применение мультиагентного подхода при планировании позволяет оперативно, гибко и эффективно парировать возникновение внешних событий, приводящих к изменению условий решаемой задачи.

Таблица 6. Результаты экспериментов по исследованию способности системы к адаптации расписания

№	Время перепланирования, с	После выхода из строя КА		После перестроения расписания	
		Кол-во распланированных заявок	ЦФ	Кол-во перепланированных заявок	ЦФ
1	9	422	-0,11	418	0,07
2	8	379	-0,10	371	0,04
3	10	468	-0,11	465	0,08
4	11	411	-0,10	406	0,07
5	9	407	-0,11	396	0,06
6	10	425	-0,11	422	0,09
7	7	397	-0,11	395	0,06
8	8	388	-0,10	376	0,05
9	8	377	-0,07	372	0,05
10	9	419	-0,10	417	0,06

7.3.3. Анализ эффективности в сравнении с алгоритмами планирования, основанными на традиционных методах оптимизации

В данном исследовании проводился анализ эффективности разработанного метода в сравнении с алгоритмами планирования, основанными на традиционных методах оптимизации, таких как алгоритм имитации отжига, алгоритм Late Acceptance Hill Climbing и алгоритм Tabu Search, по качеству полученного расписания и временным затратам, необходимым на его составление.

В ходе исследования проведена серия экспериментов, в которых количество заявок на съемку ОН изменялось от 100 до 20 000. При этом измерялось время, затраченное на составление плана, и значение ЦФ системы.

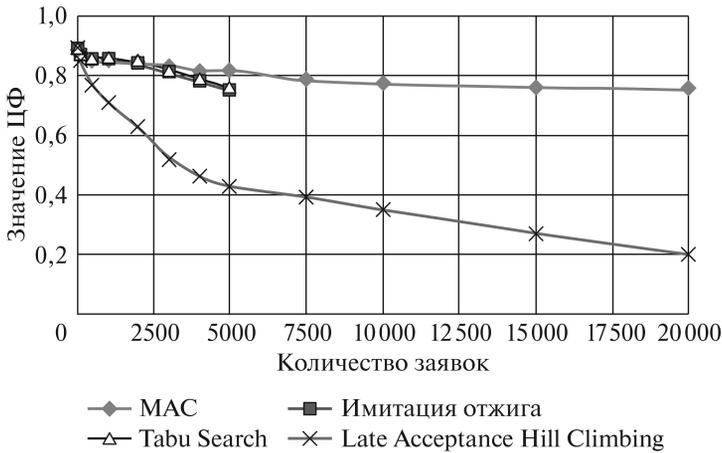


Рис. 7. Число перестановок задач на каждой итерации проактивного планирования.

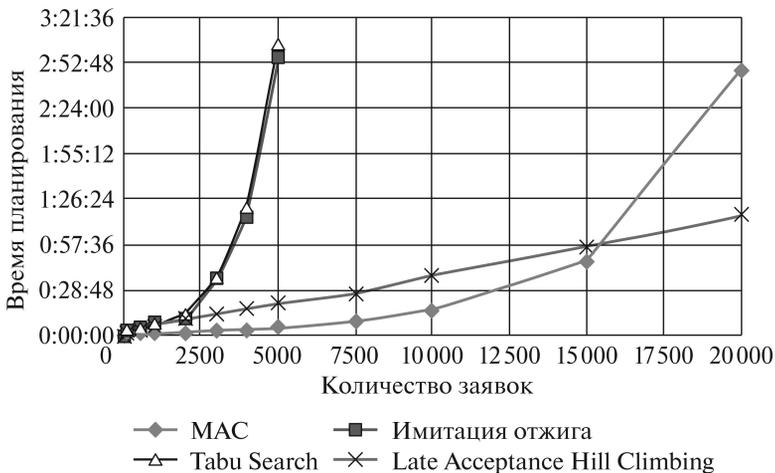


Рис. 8. График зависимости времени планирования от количества заявок.

По результатам проведенных экспериментов построены графики зависимости значения ЦФ системы (рис. 7) и времени планирования (рис. 8) от количества заявок для различных алгоритмов планирования. Для алгоритма имитации отжига и алгоритма Tabu Search результаты получены лишь до 5000 заявок на съемку, так как далее наблюдался экспоненциальный рост времени их работы и потребляемых ресурсов.

Результаты экспериментов показывают, что в данном случае уже на задачах малой размерности ДЗЗ для группировки КА предлагаемый мульти-агентный метод не уступает традиционным эвристическим алгоритмам, а с ростом числа заявок демонстрирует более высокую скорость построения расписания без потери в качестве, продолжая работать там, где классические методы уже работают плохо или вообще не работают.

8. Выводы по результатам

При разработке любых новых методов и средств управления ресурсами традиционно возникает ряд вопросов: “А чем отличается метод? При каких условиях следует его применять? Как новый метод дополняет существующие решения? Что с чем сравнивать и при каких условиях? Какой выигрыш получается в результате и т.д.?”

Ответы на эти вопросы не всегда очевидны и в ходе проведенных исследований по оценке качества и эффективности работы ИСУР по сравнению с классическими и эвристическими системами был выявлен ряд особенностей, которые могут рассматриваться как довольно характерные для разработки и внедрения всего класса рассматриваемых интеллектуальных систем принятия решений в реальном времени:

— Оценка качества и эффективности результатов работы традиционных методов пакетного планирования и оптимизации ресурсов, когда все заказы и ресурсы известны заранее и не меняются в ходе вычислений, в сравнении с адаптивными методами ИСУР, работающими по событиям в реальном времени. Напрямую сделать такое сравнение часто затруднительно, так как традиционное решение оптимизирует одну целевую функцию, а предлагаемый подход в ИСУР позволяет искать баланс интересов между многими функциями. В этих целях критерии принятия решений, предпочтения и ограничения всех участников должны быть сопоставимы, но в ИСУР много больше число участников, принимающих решения, которые при этом еще и должны быть согласованы. В любом случае пользователям важно понимать, насколько далеко получаемое решение ИСУР от глобального «оптима», предлагаемого имеющимися методами как «лучшее решение». Но главная проблема состоит в том, что для адаптивных методов качество и эффективность решения зависят от самого момента времени получения события и той ситуации, которая сложилась на этот момент в группировке КА, цехе машиностроительного предприятия, парке грузовиков и т.д. В следующий момент ситуация может измениться и может быть востребовано уже другое решение, а решение, выработанное в этом моменте, может уже в следующую минуту быть не лучшим

и даже может не быть применимым вовсе, что требуется учитывать в оценке и выводах.

— Учет семантики предметной области в ИСУР выражается в возможности вводить «на лету» (без перепрограммирования) новые понятия и отношения предметной области, в терминах которых формулируются критерии, предпочтения и ограничения всех участников; при сравнении различных методов целесообразно показать, какова будет трудоемкость встраивания в систему новых критериев, предпочтений и ограничений предметной области. Учет семантики предметной области позволяет на практике сразу отсекал лишние варианты и повышать «разумность» получаемых решений для конечных пользователей.

— Кроме качества и эффективности решения, для такого рода систем важно сравнивать возможности масштабирования решения с ростом размерности решаемой задачи. Здесь важно не только число обрабатываемых заказов, но сама возможность привлечения дополнительного числа вычислительных ресурсов и использования возможностей естественного распараллеливания задачи на современных серверах.

— При сравнении и выборе методов важно показывать, что предлагаемые адаптивные методы виртуального рынка, где переговоры как аукционы идут параллельно и асинхронно, позволяют формировать решение итерационно, причем можно управлять процессом вычислений, включая качество и скорость вычислений, используя механизмы «направляемой самоорганизации» («управляемого хаоса»), в зависимости от желаемых показателей, наиболее приоритетных событий или заданного интервала времени, отведенного на принятие решений.

— Благодаря переговорам, в ходе которых выявляются причины отказов агентов, предлагаемые ИСУР потенциально могут быть способны к «преодолению ограничений» в случае, когда решение не находится в заданных условиях, а также для выработки рекомендаций получения допустимого рационального результата в условиях даже полного отсутствия решения.

— Важнейшим аспектом сравнения обсуждаемых методов является трудоемкость разработки и развития ИСУР, понятность и удобство работы с создаваемыми моделями и методами как для опытных разработчиков методов планирования и оптимизации, так и, в особенности, для новичков-программистов, с целью оперативной доработки системы под специфические и постоянно изменяющиеся условия решения задачи или новые применения.

— Работа методов должна анализироваться и сравниваться в условиях растущей сложности, неопределенности и динамики изменений в среде, связываемой с постоянным желанием пользователей внести все большее число факторов в принятие решений.

— Несомненным преимуществом методов, использующих онтологии предметной области, является устойчивость к ошибкам в наборах исходных данных, так как в реальном времени у пользователей нет времени на анализ таких ситуаций.

— Важно обеспечивать пользователям объяснение найденных решений и возможность удобной интерактивной доработки расписаний совместно с пользователем, изменения им любых частей расписания по своему усмотрению, добавления новых, еще не формализованных, факторов.

Указанные особенности должны обеспечивать более рациональный выбор современными предприятиями применяемых методов и средств для управления ресурсами и разработку комплексных подходов к оценке эффективности внедрений систем искусственного интеллекта.

9. Заключение

До настоящего времени не предложено единого подхода к созданию ИСУР для решения сложных NP полных задач многокритериального адаптивного управления ресурсами в реальном времени.

Разработанная методология построения ИСУР на основе мультиагентной технологии может рассматриваться как один из возможных практических подходов к решению такого рода задач, который не дает глобального оптимума, но позволяет на общих принципах находить приближенные локально-оптимальные решения в приемлемые сроки для повышения эффективности ресурсов предприятий и создавать такие системы в относительно короткие сроки.

Областью применения разработанной технологии в ИСУР являются сложные задачи управления ресурсами, где требуется перестраивать связанные между собой планы работы многих исполнителей по различным событиям, возникающим в заранее не известные моменты времени, причем «здесь и сейчас», в реальном времени. При отсутствии неопределенности и динамики и наличии заранее известных и неизменяющихся потоков заказов и пулов ресурсов предлагаемые методы и средства могут комбинироваться с классическими и эвристическими подходами, что позволяет создавать гибридные ИСУР.

Повышение качества решения поставленных сложных задач в ИСУР по сравнению с традиционными методами связывается с переходом от поиска глобального оптимума одной целевой функции системы к поиску баланса интересов всех участников бизнеса в каждой конкретной ситуации, причем как людей (заказчиков, исполнителей и партнеров), так и любых физических или абстрактных сущностей, также наделяемых своими интересами (предприятие в целом, грузовик, заказ, станок или другое оборудование и т.д.).

Эффективность решения поставленной задачи обеспечивается переходом при создании ИСУР от последовательного комбинаторного перебора вариантов к параллельным и асинхронным переговорам агентов всех участников с собственными целевыми функциями, что позволяет агентам взаимно сужать размерность поиска вариантов решений непосредственно в ходе разрешения конфликтов, а решению сложной задачи – фактически, самоорганизовываться в ходе последовательных улучшений.

Предложенные модели, методы и средства создания ИСУР адаптивного управления ресурсами в реальном времени могут стать основой открытой инструментальной платформы для решения задач указанного класса с целью сокращения трудоемкости, сроков, стоимости разработки и эксплуатации такого рода систем.

Перспективы развития направления связываются с созданием ИСУР как интеллектуальных киберфизических систем, а также построением цифровых экосистем ИСУР масштаба крупного предприятия и даже отрасли для поддержки цепочек кооперации предприятий при решении сложных производственных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taha X.* Введение в исследование операций. М.: Изд. дом «Вильямс», 2005.
2. *Новиков Д.А.* Классификации систем управления // Проблемы управления. 2019. № 4. С. 27–42.
3. *Лазарев А.А., Гафаров Е.Р.* Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: Изд-во МГУ, 2011.
4. Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis / Leung J. (Ed.). Chapman & Hall, 2004.
5. *Vos S.* Meta-heuristics: The State of the Art // Local Search for Planning and Scheduling / Nareyek A. (Ed.). Germany: Springer-Verlag. 2001.
6. *Pinedo M.* Scheduling Theory, Algorithms, and Systems. Springer. 2008.
7. *Скобелев П.О.* Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автометрия. 2002. № 6. С. 45–61.
8. *Виттих В.А., Скобелев П.О.* Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // АиТ. 2003. № 1. С. 177–185.
Vittikh V.A., Skobelev P.O. Multiagent Interaction Models for Constructing the Needs-and-Means Networks in Open Systems // Autom. Remote Control. 2003. V. 64. No. 1. P. 162–169. <https://doi.org/10.1023/A.1021836811441>
9. *Виттих В.А., Скобелев П.О.* Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. № 2. С. 78–87.
10. *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.
11. *Skobelev P.* Bio-Inspired Multi-Agent Technology for Industrial Applications. Multi-Agent Systems – Modeling, Control, Programming, Simulations and Applications / Faisal Alkhateeb F., et al. (Eds.). Austria: InTech Publishers, 2011. P. 495–522.
12. *Rzevski G., Skobelev P.* Managing Complexity. London-Boston: WIT Press, 2014.
13. *Skobelev P.* Towards Autonomous AI Systems for Resource Management: Applications in Industry and Lessons Learned // Y. Demazeau et al. (Eds.). Proceedings of the 16th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems (PAAMS 2018). 2018. LNAI 10978. P. 12–25.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-94580-4_2

14. *Мескон М., Альберт М., Хедоури Ф.* Основы Менеджмента / пер. с англ. М.: Дело, 1997.
15. *Деминг Э.* Менеджмент нового времени: Простые механизмы, ведущие к росту, инновациям и доминированию на рынке / пер. с англ. М.: Альпина Паблишер. 2019.
16. *Merdan M., Moser T., Sunindyo W., Biffi S., Vrba P.* Workflow scheduling using multi-agent systems in a dynamically changing environment // *J. Simulation*. 2012. Vol. 7(3). P. 144–158.
17. *Deng L., Lin Y., Chen M.* Hybrid ant colony optimization for the resource-constrained project scheduling problem // *J. Syst. Engineer. Electron*. 2010. Vol. 21. Issue 1. P. 67–71.
18. *Jaberi M.* Resource Constrained Project Scheduling Using Mean Field Annealing Neural Networks // *Int. J. Multidisciplin. Sci. Engineer*. 2011. Vol. 2. No. 7. P. 6–12.
19. *Zhang H., Xu H., Peng W.* A Genetic Algorithm for Solving RCPSP // *International Symposium on Computer Science and Computational Technology (ISCST '08)*. 2008. Vol. 2. P. 246–249.
20. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Теория активных систем: состояние и перспектива. М.: Синтез, 1999.
21. *Ivanyuk V., Abdikayev N., Patshenko F., Grineva N.* Network-Centric Methods Management // *Management Science*. М.: Financial University under the Government of Russian Federation. 2017. Vol. 7(1). P. 26–34.
22. *Chigani A., Jamed D., Bohner S.* Architecting Network-Centric Software Systems: A Style-Based Beginning // *31st IEEE Software Engineering Workshop (SEW '07)*. P. 290–299. <https://doi.org/10.1109/SEW.2007.95>
23. *Wooldridge M., Jennings N.* Intelligent agents: Theory and practice // *The Knowledge Engineering Review*. 1995. Vol. 10(2). P. 115–152.
24. *Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В.* Многоагентные системы // *Новости искусственного интеллекта*. 1998. № 2. С. 64–116.
25. *Пантелеев М.Г., Пузанков Д.В.* Интеллектуальные агенты и многоагентные системы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016.
26. *Pearce J., Tambe M., Maheswaran R.* Solving multiagent networks using distributed constraint optimization // *AI Magazine*. 2008. 29(3).
Available from: <http://teamcore.usc.edu/papers/2008/K-optimality>
27. *Modi P.J., Shen W., Tambe M., Yokoo M.* ADOPT: Asynchronous distributed constraint optimization with quality guarantees // *Artificial Intelligence Journal*. 2005. 161 (1–2). P. 149–180.
28. *Petcu A.* A class of Algorithms for Distributed Constraint Optimizations. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. IOS Press. 2009. 194(1).
<https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-3942>
29. *Evolutionary Multiobjective Optimization Theoretical Advances and Applications*. Abraham A., Jain L. C., Goldberg R. (Eds.). Springer. 2005.
<https://doi.org/10.1007/1-84628-137-7>
30. *Brussel H., Wyns J., Valckenaers P., et al.* Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA // *Computers in Industry*. 1998. No. 37. P. 255–274.
31. *Sandholm T., Lesser V.* Issues in Automated Negotiation and Electronic Commerce: Extending the Contract Net Framework – In *Proc. of the First International Conference on Multiagent Systems (ICMAS-95)*. 1995. P. 328–335.

32. *Sandholm T., Lesser V.* Leveled-commitment contracting: a backtracking instrument for multiagent system // AI Magazine. 2002. Vol. 23(3). P. 89–100.
33. *Shoham Y., Leyton-Brown K.* Multi-agent systems: Algorithmic, Game Theoretic and Logical Foundations. Cambridge University Press. 2009. Available from: <http://www.masfoundations.org>
34. *Easley D., Kleinberg J.* Networks, Crowds, and Markets: Reasoning about a Highly Connected World. Cambridge University Press. 2010. Available from: <http://www.cs.cornell.edu/home/kleinber/networks-book/>
35. *Amelina N., Fradkov A., Jiang Y., Vergados D.* Approximate Consensus in Stochastic Networks With Application to Load Balancing // IEEE Transactions On Information Theory. 2015. Vol. 61. No. 4. P. 1739–1752.
36. *Ivanskiy Y., Amelina N., Granichin O., et al.* Optimal Step-Size of a Local Voting Protocol for Differentiated Consensus Achievement in a Stochastic Network with Cost Constraints // IEEE Conference on Control Applications (CCA). 2015. P. 1367–1372.
37. *Жиляев А.А.* Онтологии как инструмент создания открытых мультиагентных систем управления ресурсами // Онтологии проектирования. 2019. Т. 9. № 2(32). С. 261–281.
38. *Minhas S.* Ontology Based Environmental Knowledge Management – A System to Support Decisions in Manufacturing Planning // 6th International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development. 2014. P. 397–404.
39. *Järvenpää E., Siltala N., Hylli O., Lanz M.* The development of an ontology for describing the capabilities of manufacturing resources // Journal of Intelligent Manufacturing. 2019. Vol. 30. P. 959–978.
40. *Хорошевский В.Ф.* Проектирование систем программного обеспечения под управлением онтологий: модели, методы, реализации // Онтология проектирования. 2019. Т. 9. № 4. С. 429–448.
41. *Rojko A.* Industry 4.0 Concept: Background and Overview // International Journal of Interactive Mobile Technologies. 2017. Vol. 11(5). P. 77–90.
42. *Leitao P., Karnouskos S., Ribeiro L., et al.* Smart agents in industrial cyber-physical systems // Proc. IEEE. 2016. Vol. 104(5). P. 1086–1101.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 27.10.2020

После доработки 15.05.2021

Принята к публикации 30.06.2021