

УДК 519.7:65.012.122

# НА ПУТИ К АВТОНОМНЫМ СИСТЕМАМ: ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ

**П.О. Скобелев**

*Институт проблем управления сложными системами РАН*  
Россия, 443060, Самара, Садовая, 60  
E-mail: [skobelev@kg.ru](mailto:skobelev@kg.ru)

**И.В. Майоров**

*Институт проблем управления сложными системами РАН*  
Россия, 443060, Самара, Садовая, 60  
E-mail: [imayorov@smartsolutions-123.ru](mailto:imayorov@smartsolutions-123.ru)

**О.И. Лахин**

*ООО «НПК «Разумные решения»*  
Россия, 443013, Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201  
E-mail: [lakhin@smartsolutions-123.ru](mailto:lakhin@smartsolutions-123.ru)

**В.Б. Ларюхин**

*Самарский государственный технический университет*  
Россия, 443100, Самара, Молодогвардейская, 244  
E-mail: [vl@kg.ru](mailto:vl@kg.ru)

**Е.В. Симонова**

*Самарский национальный исследовательский университет*  
Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, д.34  
E-mail: [simonova@smartsolutions-123.ru](mailto:simonova@smartsolutions-123.ru)

**Ключевые слова:** сложность, искусственный интеллект, автономные системы, адаптивность, управление ресурсами, мультиагентные технологии, сети потребностей-возможностей, самоорганизация, экономика реального времени.

**Аннотация:** Анализируется сложность современного управления ресурсами, связанная с большим разнообразием отдельных критериев, предпочтений и ограничений, взаимозависимостью всех операций и т. д. Дается обзор существующих методов и инструментов планирования ресурсов предприятий, определяются основные требования к управлению ресурсами. Обсуждается концепция автономных систем искусственного интеллекта для адаптивного управления ресурсами на основе мультиагентной технологии. Показывается мультиагентная модель виртуального рынка и обсуждается метод разрешения конфликтов и поиска консенсуса для адаптивного управления ресурсами. Представлены результаты внедрения ИИ-решений и определены перспективы развития подхода для адаптивного управления ресурсами.

## 1. Введение

Растущая сложность современной экономики связана с возросшей неопределенностью и динамикой спроса и предложения вследствие непредвиденных событий [1]. Эта проблема требует нового типа промышленных решений для управления ресурсами, которые должны поддерживать высокий уровень адаптивности для повышения эффективности [2]. Одно из возможных решений проблемы – применение автономных систем искусственного интеллекта (ИИ), работающих непрерывно и способных самостоятельно принимать решения, обеспечивая распределение ресурсов, планирование, оптимизацию, координацию и контроль результатов в режиме реального времени.

В статье представлены практические результаты решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в промышленности с использованием систем ИИ, основанных на мультиагентной технологии. Показывается, что данное направление разработок ведет к повышению автономности ИИ систем, работающих на достижение поставленных целей и самостоятельно осуществляющих адаптивную корректировку планов при возникновении непредвиденных событий.

В разделе 2 статьи проанализирована сложность современного управления ресурсами и показаны ограничения существующих моделей, методов и инструментов для поддержки растущей сложности и адаптивности бизнеса. В разделе 3 рассмотрена концепция автономной системы искусственного интеллекта для адаптивного управления ресурсами на основе виртуального рынка агентов и метод решения конфликтов с помощью многоитерационных аукционов, а также архитектура автономных ИИ решений для адаптивного управления ресурсами. Примеры разработанных ИИ решений представлены в разделе 4, демонстрируя рост эффективности в повышении ресурсов до 15-40%. В заключении обобщены преимущества разработанных решений и изложены перспективы развития подхода.

## 2. Сложность современного управления ресурсами

Основными факторами сложности, типичными для рассматриваемых систем управления ресурсами, являются: большое количество ежедневных заказов, ресурсов, продуктов и задач, многоцелевое управление ресурсами (максимизация качества обслуживания, минимизация затрат и времени доставки, максимизация прибыли и др.), задачи, требующие разрешения конфликтов и согласования интересов, индивидуальный подход к заказам и ресурсам, взаимозависимости между процессами и задачами, специфика выполнения заказов, таких как разделяемые заказы или альтернативные процессы и использования ресурсов, включая общие ресурсы, повторно используемые или потребляемые ресурсы, восстановление ресурсов, общие затраты и т. д. [3].

Однако, одной из наиболее важных задач для таких приложений во всех областях является адаптивность, определяемая как способность достигать заданных целей в условиях частого возникновения непредсказуемых событий.

Традиционные методы и инструменты планирования и оптимизации ресурсов, основанные на линейном, динамическом программировании или программировании в ограничениях, разработаны для пакетного режима, где все заказы и ресурсы известны заранее и не изменяются в реальном времени [4]. В результате в этой области управления ресурсами предприятий (ERP) классические пакетные планировщики, предлагаемые SAP, Oracle, Manugistic, i2, ILOG, J-Log и другими компаниями, по-прежнему доминирующими на рынке, в основном для начального распределения ресурсов, причем возможности пользователя интерактивно вносить изменения очень ограничены.

Однако сложность и высокая динамика бизнеса приводят к тому, что традиционные, централизованные, иерархически организованные, последовательные методы и алгоритмы комбинаторного поиска, а также эвристики или метаэвристики [5] не могут эффективно решить проблему адаптивного управления ресурсами с приемлемым качеством и в течение требуемого времени.

Поиск вариантов для принятия решений остается очень трудоемким, а результаты часто просто неосуществимы или несопоставимы с человеческими решениями.

### **3. Новые модели и методы для адаптивного управления ресурсами: от оптимизации – к консенсусу**

В последнее десятилетие были разработаны новые подходы, модели и методы распределенного решения задач для планирования и оптимизации ресурсов на основе мультиагентной технологии.

Одним из наиболее эффективных подходов для решения различных сложных задач можно считать «Виртуальный рынок» (ВР) [6, 7], который получил теоретическую основу в 2009-2010 гг., но применялся в разработках мультиагентных систем для управления ресурсами уже с 1999 г. [9, 10].

Виртуальный рынок – экономический подход, базирующийся на «contract-net» протоколах Сандхольма. Идея виртуального рынка в мультиагентной системе основана на постоянном взаимодействии агентов спроса и предложения, поддерживаемом различного видами протоколов контрактной сети. Для каждого Агента  $A_i$  вводится функция  $C_i$ , такая что для любого набора задач  $T$ ,  $C_i(T)$  есть стоимость выполнения Агентом  $A_i$  всех задач  $T$ . Каждый агент стартует с некоторого произвольного начального набора задач, что дает неоптимальное распределение в том смысле, что сумма всех расходов агентов не является минимальной. При этом агенты начинают переговоры, которые улучшают распределение, что приводит рано или поздно к установлению «конкурентного равновесия» на виртуальном рынке, когда ни одно другое решение не может улучшить результат, что и считается решением задачи с минимальной стоимостью. Переговоры строятся как итеративный процесс взаимных уступок и перестановок, причем каждый шаг есть «контракт» между агентами, позволяющий агентам обмениваться задачами и деньгами. Было показано, что такие простые аукцино-подобные схемы в ряде случаев дают полностью оптимальное решение.

В развитие этого подхода, для решения различного рода сложных задач управления ресурсами, была предложена концепция сети потребностей и возможностей (ПВ-сети), в которой было существенно расширено число используемых классов агентов и введены методы переговоров с компенсациями при уступках [9-10]. Решение любой сложной проблемы также формируется здесь как конкурентное равновесие или консенсус агентов, который не может быть улучшен в процессе вычислений, но дополнительно вводятся функции удовлетворенности каждого агента и бонусов-штрафов.

В наших мультиагентных проектах мы использовали аналогичный подход к разработке программного обеспечения, начиная с 1999 года, обнаружив основные положительные черты таких алгоритмов в первом мультиагентном прототипе для управления цепочками поставок заводов Volkswagen. В следующий период разработанная мультиагентная технология была усовершенствована в соответствии с концепцией колониальных систем, в которой были представлены агенты продуктов, ресурсов, заказов и штабной (PROSA) [8]. Развивая нашу технологию, мы сделали следующий шаг в детализации агентов и представили бизнес-процессы и задачи агентов, которые формируют ПВ-сети как самоорганизующиеся расписания с проактивностью агентов. Для агентов

ПВ-сетей было предложено несколько методов виртуального рынка для адаптивного принятия решений, основанных на функциях удовлетворенности и бонусов-штрафов, чтобы обеспечить большую гибкость и эффективность решений [9-11].

В процессе самоорганизации агенты ПВ-сети сначала выбирают лучшие бесплатные варианты, а затем разрешают конфликты до тех пор, пока система не будет сбалансирована, и ни один из вариантов не сможет улучшить общую целевую функцию системы. Этот процесс отражает то, как опытные менеджеры и диспетчеры обычно формируют сложные расписания, разрешая конфликты и находя баланс между конфликтующими интересами всех сторон, участвующих в принятии решений. Формализованная постановка задачи и более детальное описание метода приведены в [12].

Построенные на этой основе интеллектуальные системы начали разрабатываться как автономные ИИ-решения для кибер-физического управления ресурсами [13] (рис. 1).

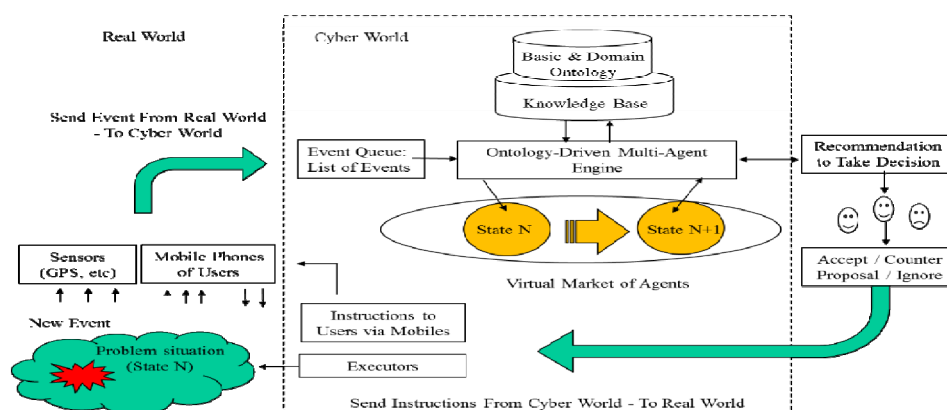


Рис. 1. Кибер-физическая архитектура адаптивной системы управления ресурсами.

В такого рода системах интегрируются как управляющие, так и вычислительные и коммуникационные компоненты, которые дополняются моделью самого предприятия, что стало принято называть в последние годы «цифровым двойником» предприятия.

## 4. Индустриальные приложения

В период 2000-2008 гг. было разработано около 15 промышленных прототипов и промышленных мультиагентных систем для адаптивного управления ресурсами (Таблица 1). На следующем этапе подход к промышленным приложениям был кардинально пересмотрен, и в 2010-2017 годах было разработано новое поколение решений как продукты/услуги (Таблица 2).

**Таблица 1.** Первое поколение промышленных приложений на основе проектов.

Клиент	Проект	Результаты и ценность для клиента
Tankers International	Составление расписания морских танкеров для одного из крупнейших флотов нефтяных танкеров с очень большой вместимостью судов (VLCC), состоящих из более чем 40 судов и представляющих чуть менее 10% мировой вместимости морских танкеров.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сокращение простоя танкера на три дня в год.</li> <li>• Принимая во внимание стоимость холостых пробегов на танкер и в день, для 40 танкеров экономия обеспечила возврат инвестиций (ROI) менее чем за шесть месяцев.</li> <li>• Сокращение задержек при поставках нефти и, как следствие, штрафов за задержку.</li> <li>• Знания по работающим танкерам впервые были собраны и формализованы в машиночитаемом формате.</li> <li>• Диспетчерам предоставляются варианты планирования и стоимость доставки во время телефонного разговора с клиентом.</li> <li>• Планировщику обычно требуется от нескольких секунд до нескольких минут для завершения анализа.</li> </ul>
Addison Lee	Планирование такси для 2000 автомобилей, оборудованных GPS, в Лондоне для 13000 ежедневных заказов	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Общее количество обработанных заказов увеличилось на 7% за первый месяц при том же количестве ресурсов.</li> <li>• 98,5% всех заказов были распределены автоматически без помощи диспетчера.</li> <li>• Количество потерянных заказов было уменьшено до 3,5 (до 2%).</li> <li>• Количество холостых пробегов сократилось на 22,5%.</li> <li>• Увеличение прибыльности: + 4,8%.</li> <li>• Время сбора заказов: на 40% быстрее.</li> </ul>
GIST	Консолидация грузов для грузовых автомобилей с использованием кросс-доков и транспортной сети	<ul style="list-style-type: none"> <li>• До: 2 оператора работали в течение одного дня, чтобы составить расписание для 200 грузов / После: 8 минут на 200 заказов.</li> <li>• До: день планирования 1 для дня 3 / После: день планирования 1 для дня 2 и даже день 1 для дня 1.</li> <li>• До: нет поддержки транспортных соединений и консолидаций в режиме реального времени / После: планирование с обратными рейсами и консолидациями.</li> <li>• До: ручная процедура планирования / После: 4 часа для планирования 4000 заказов с помощью кросс-доков и возможность динамического добавления новых заказов (несколько секунд для одного заказа).</li> </ul>
Avis (UK)	Планирование аренды автомобиля для одной из дочерних компаний в Великобритании (250 автомобилей / 30 водителей), в т.ч. мойка и заправка автомобилей, вывоз и доставка и т. д.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Обработка 15-20 бронирований на станцию с около 80-120 событиями в час, включая новые заказы, поступлений событий со смартфонов водителей и от веб-пользователей.</li> <li>• 90% всех выполненных решений было принято за 20-30 минут до установления расписания исполнения;</li> <li>• Количество событий, приводящих к значительной реорганизации графика в день (уровень турбулентности) ~ 40%.</li> <li>• Сокращение просроченных поставок – 10%.</li> </ul>
City Sprint	Курьеры / Сервис медицинской лаборатории	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сокращение задержек при заказе, холостых пробегов и расхода топлива;</li> <li>• Возможность оптимизировать парк транспортных средств.</li> </ul>
Channel Four	Размещение баннеров на сайтах	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сокращение сложности перераспределения баннеров – 15%.</li> <li>• Повышение эффективности рекламы – 5-10%.</li> </ul>

**Таблица 2.** Второе поколение промышленных приложений на основе продуктов/услуг.

Продукт	Клиент	Результаты и ценность для клиента
Smart Aerospace	Ракетно-космическая корпорация «Энергия»	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Действует система для 8 диспетчеров и 120 других пользователей для подачи топлива, воды, продуктов питания и т. д.</li> <li>• Ускорение планирования полетов в 4-5 раз.</li> <li>• Моделирование наихудших сценариев для оценки рисков.</li> </ul>
Smart Trucks	Prologics, Lorry, Monopoly, Trasko, Trans-Terminal, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Увеличение количества заказов – до 3-5%;</li> <li>• Сокращение просроченных поставок – до 5%;</li> <li>• Повышение эффективности использования ресурсов – 5-10%.</li> </ul>
Smart Factory	ТяжМаш, Axion-Holding, Airbus, Иркут, АвиаАгрегат, Кузнецов	<p>Axion-Holding:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Увеличение производительности цеха – 5-10%.</li> <li>• Экономия на одном цехе по производству инструментов составляет 7 человеко-месяцев в месяц.</li> </ul>
Smart Field Services	Самарская Газовая Компания, Волгоградская компания водоснабжения, Far East Service Company	<p>Samara Gas Company:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Сокращение времени реакции – до 5-7 раз.</li> <li>• Повышение эффективности обслуживания – до 40% (12 заказов в день вместо 7 в прошлом).</li> </ul>
Smart Internet Deliveries of Food	Instamart (Москва)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сокращение времени сборки заказа на 15%.</li> <li>• Сокращение задержек при доставке клиентам на 22%.</li> </ul>

Продукт	Клиент	Результаты и ценность для клиента
Smart Supply Networks	Lego (Chicago outlets), Coca-Cola (Germany), Siberian Coal Mining, “Газпромнефть”	Lego (US): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Увеличение доходности – до 18%.</li> </ul> Coca-Cola, Germany: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Увеличение сроков доставки заказов – до 7%.</li> <li>• Экономия на транспорте – до 20%.</li> </ul>
Smart Projects	Ракетно-космическая корпорация «Энергия», Министерство экономи- ки Самарской области	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Полная прозрачность проектов: от годовых планов доставки в контактах – до ежедневных планов отделов и сотрудников.</li> <li>• Сокращение расходов – 5-10%</li> <li>• Увеличение количества проектов, реализованных в рамках бюджета и в срок – на 15%.</li> </ul>
Smart Railways	РЖД (регионы Москвы, Санкт-Петербурга и Сибирь-Байкал)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сокращение задержек железнодорожного поезда – до 15-25%.</li> <li>• Более быстрая реакция на события – в 2-3 раза.</li> <li>• Увеличение скорости поездов по Байкальскому полигону – до 3-5%.</li> </ul>

В указанных приложениях прослеживается главная тенденция такого рода ИИ разработок для управления ресурсами (парком грузовиков, цехом машиностроительного предприятия и т.д.) – повышение уровня автономности ИИ решений, где компьютер постепенно берет на себя все больше функций в режиме «ко-пилота», а человек участвует в согласовании решений или вынуждает систему их полностью пересматривать, сообщая проходя путь от «попадания» всего лишь в 5-10% от всех решений на начальном этапе – до 75-90% в итоге отработки логики принятия решений.

## 5. Заключение

Автономные ИИ-решений для управления ресурсами предприятия открывают новые возможности для повышения качества и эффективности бизнеса. Разработанные промышленные приложения ИИ систем управления ресурсами доказывают, что мультиагентная технология обеспечивает возможность решения сложных задач управления ресурсами в условиях высокой неопределенности.

В качестве следующего шага планируется создание «систем систем» мультиагентных планировщиков для решения экстремально сложных задач управления ресурсами.

Статья подготовлена на основе материалов научных исследований в рамках Госбюджетной темы ИПУСС РАН «Разработка и исследование методов и средств аналитического конструирования, компьютерного представления знаний, вычислительных алгоритмов и мультиагентных технологий в задачах оптимизации процессов управления сложными системами».

## Список литературы

1. Capitalizing on Complexity? Insights from the Global Chief Executive Officer Study, IBM, USA (2010). Available from: <[http://www-01.ibm.com/industries/government/ieg/pdf/CEOstudy\\_2010\\_GovernmentFocus.pdf](http://www-01.ibm.com/industries/government/ieg/pdf/CEOstudy_2010_GovernmentFocus.pdf)>. [8 February 2018].
2. Skobelev P., Trentesaux D. Disruptions Are the Norm: Cyber-Physical Multi-Agent Systems for Autonomous Real-Time Resource Management // Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, Springer, 2017. P. 87-294.
3. Rzevski G., Skobelev P. Managing complexity. London-Boston: WIT Press, 2014.
4. Leung J.: Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis. Chapman & Hall, CRC Computer and Information Science Series, 2004.
5. Stefan V. Meta-heuristics: The State of the Art. Local Search for Planning and Scheduling // Nareyek, A. (eds.) ECAI 2000 Workshop. Germany, August 21, 2000. Springer, 2001. P. 1-23.
6. 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/>. [30 January, 2018].

7. Shoham Y., Leyton-Brow K. Multi-agent systems: Algorithmic, Game Theoretic and Logical Foundations, Cambridge University Press, 2009.
8. Brussel H.V., Wyns J., Valckenaers P., Bongaerts L. Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA // Computer in Industry. 1998. Vol. 37, No. 3. P. 255-274.
9. Skobelev P. Open multi-agent systems for decision-making support // Avtometriya. 2002. No. 6. P. 45-61.
10. Skobelev P., Vittikh V. Models of Self-organization for Demand-Resource Networks // Automation and Remote Control. 2003. No. 1. P. 177-185.
11. Vittikh V., Skobelev P. The compensation method of agents interactions for real time resource allocation // Avtometriya. 2009. No. 2. P. 78-87.
12. Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management // Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry, Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos (Ed.). Elsevier, 2015. P. 207-230.
13. Leitão P., Colombo A., Karnouskos S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges // Computers in Industry. 2016. Vol. 81. P. 11-25.