

# РАЗРАБОТКА БАЗЫ ЗНАНИЙ ДЛЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**А.В. Галицкая**

*Самарский государственный технический университет*  
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: an14215@yandex.ru

**В.А. Галузин**

*Самарский федеральный исследовательский центр РАН*  
Россия, 443100, Самара, Студенческий переулок, 3А  
E-mail: vladimir.galuzin@gmail.com

**Ключевые слова:** база знаний, онтология, мультиагентные технологии, планирование, управление ресурсами, логистика.

**Аннотация:** Рассматривается задача управления мобильными ресурсами логистических компаний. Для решения задачи планирования операций логистических процессов предлагается подход на основе применения баз знаний и мультиагентных технологий. Мир агентов логистической компании задается классами агентов заказов, технологических процессов и операций, используемых ресурсов, грузов, оборудования и других сущностей. Решение задачи формируется в ходе конкуренции и кооперации экземпляров указанных агентов системы до наступления консенсуса. Настройка конфигурации мира агентов мультиагентной системы под бизнес-процесс разных логистических компаний осуществляется с помощью онтологий и онтологических моделей, что позволяет, в определенных пределах, вводить новые параметры в процессы принятия коллективных решений агентами без перепрограммирования. Обсуждаются перспективы развития подхода и возможности его практического применения для управления группировками беспилотных грузовиков и другими мобильными ресурсами.

## 1. Введение

В последние годы резко возросла электронная коммерция в Интернет-магазинах, что привело к активному развитию сервисов логистических компаний, в том числе сети курьерских служб.

Так в 2022 году число задействованных во всех видах доставки курьеров в России превысило 1 млн. человек [1].

Увеличение объемов заказов и числа мобильных ресурсов приводит к увеличению количества потенциально возможных вариантов доставок с использованием различных маршрутов, и, соответственно, числа альтернативных вариантов доставки ресурсами [2]. Из-за клиентских ограничений на временное окно получения или сбора заказа дополнительно появляется задача устранения конфликтов между доступностью ресурсов и окнами доставки клиентам.

Описанная задача относится к классу VRP-задач, являющимися NP-сложными [3], вычислительная сложность которых экспоненциально зависит от размера входных данных. При этом число заказов становится столь велико, что не только вручную, но и

автоматически, на основе известных методов планирования или имитационного моделирования, получать адекватные планы, учитывающие индивидуальные особенности заказов и ресурсов, не представляется возможным.

Существующие к настоящему времени решения, такие как ERP-система SAP ERP ECC [4], 1С: Предприятие 8. Управление автотранспортом [5], AXELOT: TMS [6], ОПТИМУМ ГИС [7] в основном опираются на эвристики, ранее апробированные на классических задачах распределения ресурсов.

Главными их недостатками являются детерминированность и сложность учета быстроменяющихся условий, потеря адекватности расписаний с течением времени, что сильно затрудняет их использование на практике, а также слишком простая схема добавление заказов в хвост расписания (первый пришел – первый ушел), без рассмотрения возможностей встроить новый заказ в расписание за счет выявления и разрешения конфликтов и перепланирования уже ранее размещенных заказов.

Одним из способов преодоления данных ограничений является применение онтологий и мультиагентных технологий, которые на данный момент уже зарекомендовали себя на практике в различных промышленных решениях [8].

## 2. Постановка задачи

Кратко сформулируем постановку задачи планирования мобильных ресурсов на примере работы курьерской службы, которая состоит из:

- Набора ресурсов  $R = \{r_i\}$ ,  $i=1, I$ , где  $I$  – количество ресурсов. Каждый ресурс  $r_i$  характеризуется грузоподъемностью  $capacity_i$ , скоростью передвижения  $speed_i$ , ставкой за пройденный километраж  $rate_i$ , перечнем специальных возможностей (профессия, компетенции, оснащение и т.д.)  $p_i^k$ ,  $k=1, K$ , где  $K$  – количество возможностей  $i$ -ого ресурса. Для ресурсов могут быть указаны интервалы их недоступности  $resConstraint = \{resConstraint_i^s\}$ ,  $s = 1, S$ , где  $S$  – количество ограничений для  $i$ -го ресурса.
- Набора заказов  $O = \{o_j\}$ ,  $j=1, J$ , где  $J$  – количество заказов. Каждый заказ характеризуется ценой  $cost_j$ , весом  $weight_j$ , точкой сбора и точкой доставки, ограничением по времени выполнения  $t_j = [t_j^{start}; t_j^{end}]$ . Заказы поступают в систему в заранее неизвестные моменты времени.
- Набора техпроцессов (ТП)  $P = \{p_n\}$ ,  $n=1, N$ , где  $N$  – количество ТП. ТП представляет собой последовательность связанных операции  $p_n = \{p_{nm}\}$ ,  $m = 1, M$ , где  $M$  – количество операций в  $n$ -ом ТП. Для каждой операции заданы требования к исполнителям  $req_{nm}^q$ ,  $q=1, Q$ , где  $Q$  – количество требований для  $m$ -ой операции  $n$ -ого ТП.
- Графа дорог региона доставки, описывающего транспортную инфраструктуру и ее основные параметры, такие как название дороги, вес (уровень) ребра, разрешенная скорость, разрешенное направление движения, количество полос (в прямом и обратном направлении), разрешенные виды транспорта (легковой, грузовой автомобиль, мотоциклы, пешеходы и т.д.) и другие.

Необходимо найти для заказов интервалы выполнения операций ТП  $Tv = \{t_{vm}\}$ ,  $t_{vm} = [t_{vm}^{start}; t_{vm}^{end}]$ ,  $v= 1, V$ , где  $V$  – количество запланированных заказов.

При этом требуется обеспечить согласованное планирование поступающих заказов, выявляя и разрешая конфликты с уже ранее запланированными заказами и

перераспределяя их между курьерами с целью повышения эффективности курьерской службы.

Целевая функция заказа направлена на получение максимальной прибыли по его выполнению:

$$OF_v = cost_v - salary_v$$

$$salary_v = \sum_{m=1}^M rate_i * S_m$$

где  $V$  – количество запланированных заказов,  $salary_v$  – расходы на оплату труда по выполнению  $v$ -ого заказа,  $S_m$  – пройденный километраж при выполнении  $m$ -ой операции  $v$ -ого заказа

Задача состоит в том, чтобы разработать метод адаптивного планирования, оптимизации и контроля расписаний мобильных ресурсов с целью обеспечения максимальной прибыли компании, обладающей группой мобильных ресурсов.

Требуется учесть возможные непредвиденные события недоступности ресурсов, прихода новых или отзыва имеющихся заказов, задержки выполнения заказов, поломки ресурсов и т. д.

### 3. Предлагаемый подход

Настоящая работа использует методологию решения сложных задач, получившая название «Эмерджентный интеллект» [8], предлагающую набор онтологически-настраиваемых мультиагентных моделей, методов и алгоритмов коллективного принятия согласованных решений за счет переговоров с уступками и взаимными компенсациями агентов при разборе конфликтов между заказами и ресурсами.

Предлагаемый подход является дальнейшим развитием этих исследований и разработок, продолженных в [9], в которых база знаний на основе онтологий использовалась для настройки интеллектуальной системы управления производственными ресурсами.

В основе разработки подхода лежит базовая онтология управления – это предметно-независимая онтология, встроенная в основные классы агентов.

В базовой онтологии выделены наиболее общие и повторно используемые понятия в области предметно-независимого управления ресурсами:

- Заказ – задача по предоставлению услуги, характеризующаяся сроками выполнения.
- Продукт – объект, поступающий на вход или являющийся результатом выполнения задачи.
- Задача – групповая или атомарная работа, выполнение которой необходимо для получения продукта или предоставления услуги.
- Ресурс – средство, необходимое для выполнения задачи.

Базовая онтология может расширяться для различных предметных областей в прикладных онтологиях, например, сборочного цеха, логистики или склада.

На основе прикладной онтологии, в свою очередь, создаётся онтологическая модель предприятия (подразделения), которая содержит устойчивые конфигурации экземпляров классов, заданных в онтологии. На базе онтологии и онтологической модели определяются структуры данных, используемые в дальнейшем для описания информационных объектов и решения бизнес-задач мультиагентными системами.

Для решения задачи планирования логистических процессов в базовую и прикладную онтологию [9] были внесены следующие изменения:

- Введено понятие мобильного ресурса, который характеризуется своим начальным положением и скоростью передвижения.

- Базовая задача была расширена логистическими задачами, которые предполагают перемещение ресурса в пространстве при ее выполнении. Длительность выполнения таких задач зависит от характеристик исполнителя и построенного маршрута.
- Введено понятие «посылки», ключевыми параметрами которой выступают вес, габариты и тип груза, а также понятие «рюкзака». Обладая «рюкзаком» определенной вместимости, ресурс может одновременно перевозить несколько посылок.
- Введены понятие динамической потребности и соответствующей возможности, например, заправки автомобиля, кафе для питания водителя, места отдыха и т.д. Для удовлетворения таких потребностей возможности подбираются динамически, учитывая размер топливного бака и прожорливость грузовика.

Разработанный метод адаптивного планирования ресурсов основан на предложенной ранее модели сети потребностей и возможностей, в которой расписание любых заказов и ресурсов рассматривается как самоорганизующаяся система, способная достигать неупрощаемого «конкурентного равновесия» (консенсуса) между агентами заказов и ресурсов на виртуальном рынке системы в ходе переходного процесса при появлении любых новых непредвиденных событий.

В ходе разработки, с учетом введенных изменений, потребовалась разработка новых моделей и методов коллективного согласованного принятия решений программными агентами для разбора конфликтов и поиска согласованных решений (консенсуса).

Предложенный метод адаптивного планирования разделен на несколько стадий:

- Нулевая стадия – подготовка начальных данных для планирования, при этом определяются данные, полезные для экономии объема вычислений.
- Первая стадия – предварительное планирование, целью которого является получение начального допустимого расписания. Заказ размещается на первом доступном варианте размещения без выявления и разрешения конфликтов и вытеснения других заказов, что позволяет быстро оценить общую ситуацию в системе.
- Вторая стадия – выявление и разрешение конфликтов. В ходе нее полученное расписание непрерывно улучшается до достижения неупрощаемого «конкурентного равновесия», представляющего согласованное расписание.
- Третья стадия – консолидация невыгодных заказов. Производится попытка сгруппировать по одиночке не выгодны заказы в цепочки доставок, чтобы оплатить более дорогие ресурсы и выполнить заказы в сроки.

В настоящее время разработанный метод находится в стадии реализации и отладки для решения задач управления курьерами и грузовыми перевозками с использованием беспилотных грузовиков.

## 4. Заключение

Разработанный метод адаптивного планирования мобильных ресурсов различного типа на основе применения баз знаний и мультиагентных технологий позволяет более эффективно решать сложные задачи управления ресурсами за счет следующих новых функций и возможностей:

- Расширения основных классов программных агентов мира логистических компаний и методов их взаимодействия, позволяющих в одной системе сочетать решение задач планирования и оптимизации вместе с задачей о маршрутизации и задачей о ранце, а также мониторингом и контролем;

- Настройки основных классов программных агентов на специфику области деятельности и индивидуальные особенности каждого предприятия, при которой онтологическая модель предприятия выступает порождающей системой для создания экземпляров основных классов агентов.

Использование прикладных онтологий при создании онтологических моделей предприятий уже позволило за 2-3 дня создавать ряд новых прототипов интеллектуальных систем для управления различными мобильными ресурсами (курьеры, мусоровозы, беспилотные грузовики и ряд других).

Предполагается использовать разработанную систему для управления различными типами мобильных ресурсов, включая такси и грузовые перевозки, мобильные бригады электриков, газовиков, торговых представителей и других работников.

Дальнейшие исследования будут направлены на развитие предложенного подхода путем добавления более детально специфицированных операций в технологический процесс, определения характеристик заказа, влияющих на требования к ресурсам, добавления областей действия ограничений, логики работы с объемными ресурсами (правил расчета их потребления, правил и процессов по восстановлению).

## Список литературы

1. Российская ассоциация электронных коммуникаций. Исследование «Рынок курьерской доставки последней мили» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://raec.ru/upload/files/delivery-market-2023.pdf> (10.01.2024).
2. Sampaio A. Crowd-based city logistics Sustainable Transportation and Smart Logistics / A. Sampaio, M. Savelsbergh, L. Veelenturf, T. van Woensel // Elsevier, 2019. P. 381-400.
3. The Vehicle Routing Problem. Monographs on Discrete Mathematics and Applications. / Edited by P. Toth, D. Vigo. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002. 385 p.
4. Müller-Török R., et al. SAP ECC in the Public Sector. Vienna: Facultas, 2019.
5. Доценко А.А. IC: Предприятие 8. управление автомобильным транспортом // Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. Т. 1, №. 1. С. 4-12.
6. Как TMS-система сокращает затраты на перевозки: пример из практики [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://sitmag.ru/article/18242-kaktms-sistema-sokrashchaet-zatraty-na-perevozki-primer-iz-praktiki> (10.01.2024).
7. Смирнов С.В. Краткий обзор отечественного программного обеспечения для разработки геоинформационных систем (ГИС) // Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки. 2021. №. 12 (93). 46 с.
8. Rzevski G., Skobelev P., Zhilyaev A. Emergent Intelligence in Smart Ecosystems: Conflicts Resolution by Reaching Consensus in Resource Management // Mathematics. 2022. Vol. 10, No. 11. P. 1923. <https://doi.org/10.3390/math10111923>.
9. Galuzin V., Galitskaya A., Grachev S., Laruchkin V., Novichkov D., Skobelev P., Zhilyaev A. The Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of Tasks and Resources in Real Time // Mathematics. 2022. Vol. 10, No. 10. P. 1662. <https://doi.org/10.3390/math10101662>.