

**И. В. Майоров**, руководитель отдела математического моделирования, imayorov@smartsolutions-123.ru, НПК "Разумные решения", Самара

## Применение мультиагентной платформы для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени<sup>1</sup>

*Рассматривается задача построения и применения мультиагентной платформы для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени. Предлагается метод многокритериального планирования производственных и транспортных ресурсов на основе модифицированной модели сети потребностей и возможностей (ПВ-сети) предприятий, в котором проводится поочередное улучшение различных критериев в зависимости от ситуации, отражаемой состоянием ресурсов и потоком входящих событий. Агенты ПВ-сети обладают собственными целевыми установками, но способны идти на уступки и компромиссы для достижения интереса системы в целом. Экспериментально показана возможность решения сложных задач управления ресурсами в реальном времени, которые не решаются или плохо решаются классическими методами и известными эвристиками. Разработанный метод и платформа применены при создании промышленных систем управления ресурсами в различных предметных областях, обеспечивая 20...40 %-ное повышение эффективности предприятий.*

**Ключевые слова:** мультиагентная платформа, поддержка принятия решений, адаптивное планирование, мультиагентная технология, планирование в реальном времени, промышленные применения

### Введение

Современные автоматизированные системы управления ресурсами предприятий на практике часто сводятся лишь к учетному контуру, обеспечивая в лучшем случае укрупненное годовое или квартальное планирование.

Одна из главных проблем состоит в том, что традиционные методы и средства планирования ориентированы на использование классических комбинаторных подходов, в которых все заказы и ресурсы считаются известными заранее, игнорируются индивидуальные особенности заказов и ресурсов, имеется ряд вычислительных трудностей и т. д. [1].

Действительно, решение классических задач планирования ресурсов (известных как NP-трудные задачи) обычно формулируется как пакетный процесс, в котором все заказы и ресурсы не изменяются в процессе работы и удовлетворяют ряду ограничений. В этом случае известные на рынке традиционные системы планирования реализуют подходы линейного или динамического программирования, программирования с учетом ограничений и других методов, основанных на комбинаторном поиске вариантов [2], которые на практике быстро оказываются не применимы с ростом размерности данных.

Для уменьшения вычислительной сложности комбинаторного поиска в последние годы были предложены разнообразные методы с использованием эвристик и метаэвристик [3], которые при некоторых условиях позволяют получать приемлемые решения за разумное время за счет сокраще-

ния вариантов комбинаторного поиска, например, "жадные" локальные методы поиска, методы имитации отжига, табу поиска, генетические и муравьиные алгоритмы и др.

Однако указанные методы в основном используют также пакетную обработку и с трудом расширяются дополнительными целевыми критериями, не позволяя учитывать множественные факторы реальной жизни, которые могут задаваться не только формулами и неравенствами, но также таблицами и графиками и даже алгоритмами.

Кроме того, эти методы весьма сложны в использовании, не обеспечивая при этом требуемую оперативность, гибкость и эффективность в интерактивной доработке планов, что всегда требуется в практических приложениях.

Поэтому в последнее время все большее развитие получают мультиагентные технологии, открывающие новые возможности для распределенного построения сложных самоорганизующихся расписаний, построенных на переговорах и балансе интересов всех участников [4].

Вместе с тем, создание интеллектуальных систем управления ресурсами на основе мультиагентных технологий представляет собой сложную задачу, в которой требуется обеспечить параллельное и асинхронное взаимодействие агентов, обладающих собственными целями, но при этом согласованно работающих на общую цель системы, поддерживая переговоры и взаимные уступки при разрешении конфликтов.

В связи с этим в данной работе рассматривается реализация мультиагентной платформы для адаптивного планирования ресурсов в реальном времени, позволяющая существенно, в 3...5 раз, ускорить

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ.

разработки прикладных интеллектуальных систем управления ресурсами.

Обсуждаются применение платформы для решения прикладных задач и преимущества разработанного подхода, а также перспективы его развития.

### **1. Мультиагентный подход к динамическому планированию**

В отличие от классических больших, централизованных, неделимых и последовательных программ, мультиагентные системы (МАС) построены в виде распределенных групп небольших автономных программных объектов, работающих асинхронно, но согласованно, для получения результата.

В последние годы мультиагентные технологии все чаще находят свое применение для решения задач планирования и оптимизации ресурсов, в связи с чем был разработан ряд новых методов и средств, например, роевая оптимизация, гибридные методы на основе искусственной иммунной системы и оптимизация методом роя частиц и др. [5—7].

В развиваемом нами подходе используется концепция сетей потребностей и возможностей (ПВ-сети) и метод сопряженных взаимодействий для управления ресурсами предприятий в реальном времени, реализуемый на основе виртуального рынка [8—9], которые обеспечивают большую оперативность, гибкость и эффективность в принятии управленческих решений при решении логистических задач в различных областях применения.

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

В результате создаваемое расписание может рассматриваться как гибкая самоорганизующаяся ПВ-сеть, которая может без полной перестройки расписания быстро адаптироваться при появлении различных "внеплановых" событий, таких как появление нового крупного заказа или отзыв уже распределенного, недоступность ресурса и т. д.

Данный подход оказывается особенно эффективным в предметных областях, характеризующихся высокой неопределенностью и динамикой (турбулентностью) событий в среде предприятия.

### **2. Мультиагентная платформа**

Для сокращения трудоемкости и ускорения процесса построения интеллектуальных систем управления ресурсами для различных применений была создана мультиагентная платформа, предоставляющая разработчикам набор типовых моделей, методов и средств разработки.

Программные агенты ПВ-сети в среде платформы имеют характеристики (атрибуты), связанные с

настройкой сети на данную предметную область, например, область производственного планирования, транспортной логистики или цепочек поставок. Кроме того, у агентов задаются целевые критерии (срок, стоимость, риск и др.) и функции удовлетворенности со значением от 0 до 1, описывающие их состояния по текущим значениям критериев. С каждым агентом связан счет в виртуальной валюте, с помощью которого в процессе переговоров они могут улучшать свои показатели. Отклонения показателей агентов от предполагаемых идеальных оцениваются с помощью штраф/бонусных функций, выраженных в виртуальных денежных единицах.

Итерационный процесс поиска решения останавливается при достижении консенсуса между агентами, при превышении числа итераций (заданного времени на решение задачи) или фиксации факта осцилляции решения в рамках заданного эpsilon-порога приближения.

Предложены принципы реализации мультиагентной платформы для управления ресурсами, которые приведены ниже.

1. Платформа предлагает готовые базовые классы агентов ПВ-сетей (заказов, ресурсов, продуктов, процессов и операций, потребностей и возможностей предприятия), которые могут быть доработаны разработчиком под требования предметной области.

2. Различные классы агентов задач, заявок, подзадач, операций и исполняющих ресурсов настраиваются путем применения формализованных правил из базы знаний системы, построенной на основе онтологии.

3. Онтология описывает концептуальные знания о данной предметной области в виде классов объектов и процессов, свойств, отношений и атрибутов, что позволяет записывать в этих терминах правила принятия решений агентами. Агенты различных классов имеют возможность зачитывать описания процессов из базы знаний и разворачивать их применение к каждой конкретной ситуации.

4. Основное содержание базы знаний связывается с процедурами (операциями), которые предстоит планировать для реализации заказов (в случае производства — это технологические процессы, в случае транспортировки — операции перемещения транспорта в точку погрузки, транспортировки грузов, остановки на питание, отдых и ночлег, разгрузки грузов, загрузки тары, заправки и техобслуживания, в случае офиса — это бизнес-процессы и т. д.).

5. При появлении нового заказа в виртуальном мире предприятия создается агент заказа, который находит и читает процесс своего исполнения в базе знаний, как бы обращаясь к общей для всех агентов библиотеке для консультации.

6. Под каждую операцию создается свой собственный агент, который получает требования от агента заказа о необходимых ему ресурсах, а также знания о том, кто находится "слева" и "справа" в цепочке действий для выполнения заказа (через онтологическое отношение "следования").

7. Каждый агент получает от своего родителя или соседа предложения и рекомендации по времени

начала и завершения операции и пытается найти нужный ему ресурс в сцене мира предприятия.

8. Если ресурс уже занят, то заказ уходит от конфликта и ищет себе временно первое ближайшее свободное место, или фиксируется конфликт, который разрешается сразу или на последующих стадиях работы агентов.

9. По мере планирования агенты сообщают родителю и соседям свои параметры, и тогда родитель фиксирует процесс завершения стадии планирования или пытается улучшить состояния отдельных плохо запланированных агентов, выделяя им больше виртуальных денег для компенсации ухудшений другим агентам.

10. Критерии оптимизации расписаний для каждого агента описываются многокомпонентными целевыми функциями удовлетворенности, определяемыми в онтологии предметной области (например, агент заказа хочет быть выполнен с высоким качеством, низкой ценой, в самый короткий срок и минимальным риском). Каждый критерий также определяет штрафные и бонусные функции агентов, связанные с удовлетворением или нарушением этого критерия: как дорого будут стоить агенту отклонения от текущего значения или сколько он сможет заработать при достижении данного значения целевой функции, что, фактически, определяет и более высокую эластичность по менее значимому критерию.

11. Каждый отдельный критерий с помощью весовых коэффициентов может быть включен в свертку общих критериев для каждого агента.

12. Агенты заказов и ресурсы создают расписание как сцену виртуального мира, отражающую ситуацию в реальном мире. Каждый агент преследует свою собственную цель — получить как можно больше виртуальной прибыли, зависящей от положения его подзадач и операций в расписании и от соотношения затрат и дохода в каждый момент времени, повысив, тем самым, свою удовлетворенность.

13. Переговоры и другое взаимодействие агентов осуществляется путем отправки и приема сообщений, с помощью которых изменяются переменные, описывающие внутреннее динамическое состояние агентов. Улучшения состояний агентов приводят к улучшению динамического плана в целом. Виртуальные счета агентов позволяют изменять состояния на более выгодные, компенсируя ухудшения других за дополнительные виртуальные деньги.

14. Динамическое выравнивание отдельных групп показателей планирования проводится при сравнении компонентов критериев со средними по группе агентов и осуществляется в итерационном алгоритме на основе взаимовыгодного обмена виртуальных денег на состояние показателей.

15. Процессы планирования работают в две стадии — бесконфликтного и проактивного планирования. Бесконфликтное планирование основано на быстром включении очередной работы (заявки) в открытые слоты времени ресурсов, без возможного выявления и разрешения конфликтов. Проактивная стадия характеризуется разрешением конфликтов с многократным перепланированием ресурсов с уче-

том критериев, улучшения которых инициируются использованием виртуальных денежных средств. Процессы улучшений продолжаются до тех пор, пока не достигнут критерий останова — достигнут заданный коридор изменений, исчерпан предел итераций, исчерпаны денежные средства, когда ни один агент не может больше улучшить ситуацию (фиксируется динамический останов).

16. Проактивная стадия процесса улучшений позволяет в дальнейшем динамически приспосабливаться к различным внешним воздействиям на мультиагентную систему.

17. Глубина перепланирований для избежания глобальных перестроек расписаний.

18. Применение виртуальных денег в самоорганизующейся системе позволяет управлять изменениями, например, стимулировать изменения показателей планирования в заданном направлении.

Архитектура платформы включает следующие компоненты: редактор начальной сцены, генератор событий, очередь событий для основных классов событий, мультиагентный мир, построенный в виде виртуального рынка, базовые классы агентов, агенты поддержки спроса и предложения, визуальные компоненты для редактирования настроек агентов и визуализации результатов, импорт и экспорт данных, ведение журнала и отслеживание сообщений и финансовых транзакций агентов и некоторые другие специальные компоненты.

Эти компоненты могут быть адаптированы для новых предметных областей и приложений.

Возможности базового интерфейса пользователя мультиагентной платформы дают возможность конечным пользователям указывать начальную сцену (состояние) ресурсов, формировать последовательность событий вручную или автоматически или загружать ее из внешних файлов, создавать индивидуальные настройки для всех запросов и ресурсов, запускать моделирование с различными параметрами, визуализировать процессы переговоров и роста удовлетворенности агентов и результаты экспериментов.

Могут быть экспортированы для дальнейшего анализа журналы переговоров агентов с детализацией сообщений, журнал принятия решений и журнал финансовых транзакций, описывающий оборот виртуальных денег в системе.

### **3. Применения мультиагентной платформы**

Разработанная платформа была применена в создании МАС для построения расписания полетов и грузопотока Международной космической станции. Проект выполнялся по заказу Ракетно-космической корпорации "Энергия" и был направлен на решение задачи построения программы полета и планирования грузопотока Российского сегмента Международной космической станции [10]. Система обеспечивает интерактивную поддержку разработки плана полетов и доставки грузов и учитывает множество настроек и ограничений, например, различные типы космических кораблей и модулей МКС, число космонавтов, расход топлива, минимальный

интервал времени между операциями стыковок и др. Эффект от внедрения системы включает сокращение трудоемкости при планировании размещения грузов: до 544 ч для корабля "Прогресс" и до 320 ч для корабля "Союз" в год. Автоматическая проверка на дубликаты списков утилизируемых грузов от Центра управления полетами экономит около 312 ч в год. Экономия при расчетах балансов продовольствия, воды, топлива и времени экипажа — от 10 до 15 % по каждому модулю, что в общей сложности составляет 270 ч в год.

Применение мультиагентной платформы при создании распределенной интеллектуальной системы управления железнодорожными перевозками Smart Railways в реальном времени [11] по заказу Российских железных дорог (РЖД) привело к снижению времени построения полного расписания до 45 мин, времени реакции на события — до 30 с. Выполняются все основные требования безопасности (интервалы между поездами, отсутствие поездов с шебенкой на встречной полосе и т. д.) — на 99 %, технические требования (время разгонов и торможения, выбор платформ, времена стоянок и др.) — на 97 %. Средняя задержка поездов на участках составила менее 8 % (до 30 поездов в конфликте), среднее время возврата к расписанию — в 1,5 раза меньше. Увеличилась производительность труда диспетчеров — более чем в 2 раза.

В мультиагентной системе Smart Factory управления цехами машиностроительного предприятия [12], также созданной на основе мультиагентной платформы, получено увеличение производительности и эффективности работы завода на 10...15 % за счет перехода к адаптивному распределению, планированию и контролю ресурсов цехов в реальном времени. Система обеспечивает: рост загрузки оборудования — на 20 %, рост выработки на 1 рабочего — на 30 %, соблюдение контрактов и сроков выпуска продукции, повышение прозрачности производственных процессов — 90 %, оперативный контроль затрат до 100 % в режиме реального времени, сокращение фактических циклов производства — до 30 %, снижение объемов запасов готовой продукции, складских запасов — до 15 %, существенное сокращение трудоемкости диспетчеризации и прогнозирования результатов работы предприятия.

Мультиагентная платформа успешно применена при разработке системы управления грузоперевозками Smart Trucks, в которой используется флот из более чем 100 грузовиков [13]. Система реализует полный цикл управления ресурсами в реальном времени. В результате внедрения системы примерно на 4,5 % возросло число выполненных заказов, увеличился коэффициент использования грузовиков, снизилось на 3,5 % число опозданий к клиенту, уменьшилась трудоемкость расчетов и число ошибок, уменьшилось число простоев грузовиков на 5...7 %.

Разработанная мультиагентная платформа также была успешно применена в системе управления проектами, системе управления цепочками поставок и ряде других приложений.

В работе представлены особенности реализации мультиагентной платформы для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени.

Архитектура платформы позволяет разработать и применить механизмы самоорганизации для адаптивного планирования на основе взаимодействия конкурирующих и кооперирующихся агентов потребностей и возможностей, улучшающих свое внутреннее состояние путем актов купли-продажи наилучших мест в расписании.

При этом первоначально созданный план непрерывно и постепенно улучшается в проактивном режиме с учетом задаваемых критериев.

Разработанная платформа была применена для решения широкого круга сложных задач, от управления доставкой грузов на Российский сегмент Международной космической станции до управления предприятием машиностроения, что показывает применимость созданной платформы в различных областях. Результаты внедрений подтверждают значительное повышение эффективности использования ресурсов на 20...40 % за счет перехода к принятию решений в реальном времени.

Реализованные проекты показывают такие важные преимущества мультиагентного подхода, как повышение уровня сервиса, возможность решения сложных задач планирования и оптимизации ресурсов в реальном времени, высокую оперативность и гибкость решения, надежность и живучесть создаваемых систем, а также минимизацию рисков для предприятий.

#### Список литературы

1. **Leung Y.** Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis // CRC Computer and Information Science Series. London: Chapman & Hall / SRC, 2004. 1216 p.
2. **Shirzadeh C., Shadrokh Sh.** A Branch and Bound Algorithm for Resource Constrained Project Scheduling Problem subject to Cumulative Resources // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2012. Vol. 6. P. 23—28.
3. **Vos S.** Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling / A. Nareyek (Ed.). Berlin: Springer-Verlag, 2001. P. 1—23.
4. **Rolf C. R., Kuchcinski K.** Distributed constraint programming with agents // Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Adaptive and Intelligent Systems (ICAIS 2011), September 6—8, 2011, Klagenfurt, Austria. Berlin: Springer-Verlag, 2011. P. 320—331.
5. **Gongfa L.** A hybrid particle swarm algorithm to JSP problem // IET Journal of Adaptive & Dynamic Computing, 2011. Vol. 2011, N. 3. P. 10—17.
6. **Xueni Q., Lau H.** An AIS-based Hybrid Algorithm with PSO for Job Shop Scheduling Problem // Proc. of 10<sup>th</sup> IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, July 1—2, 2010, Lisbon, Portugal. Elsevier Science Direct — IFAC PapersOnline. 2010. P. 371—376.
7. **Pinedo M.** Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. Springer, 2012. 676 p.
8. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автоматика. 2009. № 2. С. 78—87.
9. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 177—185.
10. **Skobelev P.** Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry. Paulo Leitao, Stamatios Karnouskos (Ed.). Elsevier, 2015. P. 207—230.

11. Belousov A. A., Skobelev P. O., Stepanov M. E. Network-centric approach to adaptive real-time train scheduling // Proc. of 6th Int. Conf. on Swarm Intelligence (ICSI), 26–29 June, 2015, Beijing, China. Part II. Springer: Lecture Notes on Computer Science. 2015. Vol. 9141. P. 290–299.

12. Shpilevoy V. et al. Multi-agent system "Smart Factory" for real-time workshop management in aircraft jet engines production // Proc. of 11<sup>th</sup> IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems

(IMS'13), May 22–24, 2013, Sao Paulo, Brazil. International Federation of Automatic Control, 2013. P. 204–209.

13. Skobelev P., Lada A., Mayorov I. Finding an initial plan of transport resources FTL allocation in a special VRP problem using linear programming methods // Proc. of 19<sup>th</sup> World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2015), July 12–15, 2015, Orlando, Florida, USA. Vol. 1. 2015. International Institute of Informatics and Systemics. P. 16–21.

## Application of the Multi-Agent Platform for Development of Smart Resource Management Systems in Real-Time

I. V. Mayorov, imayorov@smartsolutions-123.ru✉,

Software Engineering Company "Smart Solutions" Ltd., Samara, 443013, Russian Federation

Corresponding author: Mayorov Igor V., Head of Mathematics & Modeling Department at Software Engineering Company "Smart Solutions" Ltd., Samara, 443013, Russian Federation, Tel./Fax: + 7 (846) 279-37-79, e-mail: imayorov@smartsolutions-123.ru

Received on October 12, 2015

Accepted on October 26, 2015

**Problem statement:** The paper considers a task of multi-agent platform development for designing smart resource management systems in real time. Multi-agent platform is based on main classes of interacting agents with competing interests represented by satisfaction and penalty functions. **Methods:** A method of multi-criteria planning of production and transport resources is proposed, based on a modified model of demand and resource network of enterprises, where various criteria are alternately improved depending on the situation reflected by the state of resources and incoming event flow. Every cycle of replanning has two stages: conflict-free planning and proactive schedule improving with conflicts resolutions. Enterprise production orders and industrial/human resources serve as demands and resources, correspondingly. Demand and resource network agents have their own goals but are capable of making a compromise to achieve a common interest of the whole system. **Results:** The paper experimentally demonstrates the opportunity of solving complex tasks of resource management, which cannot be solved by traditional methods and known heuristics with required quality and efficiency. **Practical value:** The developed method and platform can be applied when designing industrial systems of resource management in various domains, providing a 20–40 % increase of enterprise efficiency. The following systems has been developed and put into operation: a multi-agent system for scheduling of flight program, cargo flow and resources of the Russian Segment of the International Space Station; a system of railway transportation management; a system for workshop management of a machine-building enterprise; a system of transportation logistics and some others.

**Keywords:** multi-agent platform, decision-making support, adaptive planning, multi-agent technology, real-time planning, industrial applications

**Acknowledgements:** The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation

For citation:

Mayorov I. V. Application of the Multi-Agent Platform for Development of Smart Resource Management Systems in Real-time, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 37–41.

DOI: 10.17587/mau/17.37-41

### References

1. Leung Y. Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis, *CRC Computer and Information Science Series*, London, Chapman & Hall / CRC, 2004, 1216 p.

2. Shirzadeh C., Shadrokh Sh. A Branch and Bound Algorithm for Resource Constrained Project Scheduling Problem subject to Cumulative Resources, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2012, vol. 6, pp. 23–28.

3. Vos S. Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling / A. Nareyek (Ed.), Berlin, Springer-Verlag, 2001, pp. 1–23.

4. Rolf C. R., Kuchcinski K. Distributed constraint programming with agents, *Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf on Adaptive and Intelligent Systems (ICAIS 2011)*, September 6–8, 2011, Klagenfurt, Austria, Berlin, Springer-Verlag, 2011, pp. 320–331.

5. Gongfa L. A hybrid particle swarm algorithm to JSP problem, *IET Journal of Adaptive & Dynamic Computing*, vol. 2011, no. 3, pp. 10–17.

6. Xueni Q., Lau H. An AIS-based Hybrid Algorithm with PSO for Job Shop Scheduling Problem, *Proc. of 10<sup>th</sup> IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, July 1–2, 2010, Lisbon, Portugal, Elsevier Science Direct — IFAC PapersOnline, 2010, pp. 371–376.

7. Pinedo M. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, Springer, 2012, 676 p.

8. Vittih V. A., Skobelev P. Metod sopryazhennykh vzaimodejstviy dlya upravleniya raspredeleniem resursov v real'nom mashtabe vremeni (Open multi-agent systems for decision-making support), *Avtometriya, Journal of Siberian Branch of Russian Academy of Science*, 2009, no. 2, pp. 78–87 (in Russian).

9. Skobelev P., Vittikh V. Mul'tiagentnye modeli vzaimodejstviya dlya postroeniya setej potrebnostej i vozmozhnostej v otkrytykh sistemah (Models of Self-organization for Designing Demand-Resource Networks), *Automation and Control, Journal of Russian Academy of Science*, 2003, no. 1, pp. 177–185 (in Russian).

10. Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*, Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos (Ed.), Elsevier, 2015, pp. 207–230.

11. Belousov A. A., Skobelev P. O., Stepanov M. E. Network-centric approach to adaptive real-time train scheduling, *Proc. of 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Swarm Intelligence (ICSI)*, 26–29 June, 2015, Beijing, China. Part II. Springer, *Lecture Notes on Computer Science*, 2015, vol. 9141, pp. 290–299.

12. Shpilevoy V. et al. Multi-agent system "Smart Factory" for real-time workshop management in aircraft jet engines production, Proc. of 11<sup>th</sup> IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'13), May 22–24, 2013, São Paulo, Brazil, International Federation of Automatic Control, 2013, pp. 204–209.

13. Skobelev P., Lada A., Mayorov I. Finding an initial plan of transport resources FTL allocation in a special VRP problem using linear programming methods, *Proc. of 19<sup>th</sup> World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2015)*, July 12–15, 2015, Orlando, Florida, USA, vol. 1, 2015, International Institute of Informatics and Systemics, pp. 16–21.