

РАЗРАБОТКА СЕТЕВОГО ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.А. Абрамов, Н.А. Кузнецов, А.Б. Шабунин

ОАО «НИИАС»

Россия, 107996, Москва, Орликов переулок, 5, стр. 1.

E-mail: a-alexander@yandex.ru

А.А. Белоусов, А.С. Еремин

Научно-производственная компания «Мультиагентные технологии»

Россия, 443013, Самара, Московское шоссе, 17, офисный центр «Вертикаль», офис 1201

E-mail: skobelev@smartsolutions-123.ru

Ключевые слова: мультиагентная система, сетевой график движения поездов, оптимальное построение графиков движения, сетецентрический подход, адаптивное планирование, железнодорожный участок, рой агентов

Аннотация: рассматривается задача построения сетевого графика движения поездов в условиях инфраструктурных, нормативных и технологических ограничений. Предлагается мультиагентный подход к решению данного класса задач на основе принципов сетецентризма. Описываются агенты и протоколы взаимодействия между ними при адаптивном построении графиков движения, а также преимущества применения мультиагентных технологий.

1. Введение

Одним из наиболее обсуждаемых вопросов организации эксплуатационной работы является движение по жестким ниткам графика.

Как известно, график движения поездов обеспечивает ритмичную, согласованную работу всего организационно-технического комплекса предприятий железнодорожного транспорта при условии, что он соответствует реальным пассажиро- и грузопотокам, учитывает особенности технологии работы тягового подвижного состава и локомотивных бригад, а самое главное – соблюдается, т.к. наиболее эффективным способом производства является равномерная слаженная работа.

Научные исследования в области применения ЭВМ для автоматизированного построения и оптимизации графика движения поездов ведутся с 1950-х годов. В этой связи необходимо отметить труды А.П. Петрова, Е.В. Ададунова (1961 г.), Б.А. Завьялова (1961 г.), Б.Дел Рио (1962 г.), А.Г. Барткуса (1694 г.), К. Суворова (1966 г.), И.Т. Козлова и Г.Н. Тихонова, Д.Ю. Джалилова. Детальный обзор зарубежных разработок приведен в [1], а в нашей стране практически каждый университет железнодорожного транспорта и работающие в отрасли компании имеют свои наработки в этой области.

Однако, разработка оптимального графика движения является NP-полной задачей, т.е. алгоритмы, нацеленные на достижение глобального оптимума, не имеют практической ценности. Более того, эта задача является многокритериальной, причем состав критериев зависит от конкретного участка, размера движения и технологии вывоза по-

ездов. В отличие от разработчика программы для ЭВМ, инженер-графист имеет возможность совершенствовать графики из года в год, последовательно сохраняя лучшие из ранее найденных схем прокладки.

В последнее десятилетие, в связи с бурным ростом компьютерных сетей и подключением в них все большего количества устройств, невозможность централизованной обработки данных становится очевидной и все чаще для информационно-управляющих систем на РЖД применяется сетевый принцип [2] и мультиагентные технологии [3].

Мультиагентной системой (МАС) называется компьютерная система, состоящая из большого числа взаимодействующих между собой программных сущностей (агентов), действующих автономно, но согласованно в целях достижения заданного результата. Сама концепция программных интеллектуальных агентов известна более 40 лет, однако только в последних 15 лет она стала полноправной частью систем искусственного интеллекта. Разработанные методы адаптивного планирования успешно применяются в различных отраслях: в транспортной логистике, планировании предприятий, планировании проектов [4, 5].

В настоящей статье рассматривается применение мультиагентных технологий для решения задачи построения сетевых графиков движения поездов.

2. Мультиагентные технологии на железнодорожном транспорте

Растущий спрос на мобильность, появление новых технических возможностей высокоскоростного транспорта, постоянное увеличение скоростей движения и интенсивности поездопотока на железнодорожном транспорте приводят к необходимости качественного изменения принципов управления перевозочным процессом, методов повышения эффективности и обеспечения безопасности движения поездов из-за возрастающей сложности и взаимосвязанности принимаемых решений. Традиционные централизованные методы и технологии планирования железнодорожных ресурсов с каждым годом показывают все большую несостоятельность в реалиях современного быстро меняющегося мира.

Решить проблему и устранить недостатки централизованных систем позволяет сетевый подход к управлению. Основной принцип этого подхода в том, чтобы решать проблемы так локально, как это только возможно, но так глобально, как это требуется («as local as possible and as global as required»). Например, невозможно даже представить, что вся сеть дороги будет управляться одним оптимизатором из одного центра. Нештатная ситуация, возникшая на одной станции или участке и затрагивающая работу всего полигона, может быть решена с привлечением оптимизаторов соседей или соседей соседей и т.д.

Согласно этому принципу, управляющие структуры, а также каждая станция, поезд, локомотив, локомотивная бригада, путь, прибор обеспечения безопасности движения будут объединены в одну p2p сеть (от англ. «peer-to-peer» – «каждый с каждым» и «равный с равным»), будут обмениваться информацией, получать все необходимые сведения о состоянии и динамике друг друга и согласовывать принимаемые решения путем выявления конфликтов и проведения переговоров.

В настоящее время первые разработки в нашей стране в этом направлении выполнены в НПК «Мультиагентные технологии» в тесной кооперации с ОАО «НИИАС» в рамках создания интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом на платформе «Вектор-М» (ИСУЖТ), в котором агенты станций, поездов и участ-

ков путей в реальном времени самоорганизуются в расписание, гибко реагирующее на возможные нештатные ситуации. Разработанная система находится в опытной эксплуатации на полигонах Санкт-Петербург – Москва и Санкт-Петербург–Бусловская [6-8].

Другим примером служит мультиагентная система для управления грузовыми перевозками, позволяющая в режиме реального времени подвязывать локомотивы по поезду и нитки графика движения оптимальным образом [9]. Система основана на рыночном подходе, в котором агенты поездов и агенты локомотивов и нитей путем обмена сообщениями участвуют в своеобразных торгах, в результате которых динамически строится расписание, выгодное всем участникам, в сочетании с роевой оптимизацией. Сочетание этих подходов, обладает наибольшим потенциалом для реализаций в распределенных системах адаптивного планирования.

Разработанные системы могут быть объединены в рамках сетевцентрической технологической платформы для управления железнодорожным транспортом. Однако для согласованной работы данных систем необходимо разработать систему адаптивного построения сетевых графиков движения поездов.

3. Мультиагентная система построения сетевого графика движения поездов

3.1. Постановка задачи

Рассмотрим более подробно задачу построения графиков движения поездов.

Пусть дан некоторый участок инфраструктуры, состоящий из набора станций, станционных приемо-отправочных путей, путей между станциями.

Необходимо максимально равномерно и с минимальным временем стоянок проложить по этому участку графики движения поездов (нити), исходя из требуемых объемов движения с учетом нормативных и инфраструктурных ограничений (требуемые времена хода, интервалы движения поездов, пути по станции, наклон рельефа и пр.). При прокладке нитей необходимо учитывать нити пассажирских поездов и окна ремонтных работ, адаптивно разрешая возникающие конфликты. В результате решения задачи должен быть получен планируемый график, обеспечивающий ритмичность, безопасность и эффективность движения поездов по участку.

Опыт применения классических алгоритмов оптимизации для выбранной задачи описан в работе [10]. Предложенные структуры данных и алгоритмы удачно дополняют развиваемый подход и могут быть использованы на базе созданной мультиагентной платформы, вследствие чего могут быть получены новые возможности системы и повышено качество решения многокритериальных задач.

В создаваемой мультиагентной системе предлагается заданный размер движения и данные о «ценности» конкретных поездов, всю совокупность инфраструктуры и тяговых ресурсов представлять ПВ-сетью, представляющей собой самоорганизующийся план распределения ресурсов по задачам [11]. Возникновение любого нового события может запускать адаптивную перестройку связей агентов потребностей и возможностей, которая заканчивается нахождением консенсуса агентов, в котором ни один агент не может более улучшить ситуацию.

3.2. Функциональность агентов

Основные типы агентов разрабатываемой системы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные классы агентов мультиагентной системы для адаптивного планирования графиков движения поездов.

Агент	Тип	Цели и задачи	Ограничения
Агент участка	Агент потребности/управляющий	Обеспечить требуемый размер движения, управление участковым роом агентов, взаимодействие с агентами соседних участков, агентом локомотивного депо, получение информации об исполненном движении	Нормативные инфраструктурные ограничения
Агент поезда	Агент потребности	Проследовать по участку с минимальными стоянками, взаимодействие с агентами поездов на участке, поиск ресурсов для проследования	Нормативные ограничения, требования безопасности, инфраструктурные ограничения
Агент раздельного пункта	Агент возможности	Пропустить требуемые размеры движения, закладка резервов на проследование по станции, решение конфликтов	Число приемоотправочных путей на станции, нормативные ограничения
Агент перегона	Агент возможности	Пропустить требуемые размеры движения, выполнить требуемые технические работы, закладка резервов на проследование по перегону, решение конфликтов	Число путей перегона, нормативные требования, особенности рельефа
Агент окна ремонтных работ	Агент потребности	Занять перегон для проведения ремонтных работ, взаимодействие с поездными агентами, поиск ресурсов для выполнения	Нормативные, временные ограничения
Агент локомотивного депо	Агент возможности/управляющий	Обеспечить план подвязки локомотивов под запланированные поезда	Нормативные и технологические ограничения

Стоит отметить, что агент локомотивного депо является внешним агентом по отношению к системе и представляет собой интерфейс для обеспечения сетецентрического взаимодействия с системой подвязки локомотивов под поезда [9]. Через агента локомотивного депо происходит согласование и корректировка графика движения поездов и плана подвязки локомотивов.

3.3. Адаптивный алгоритм построения сетевого графика движения поездов

При начале работы системы для каждого участка инфраструктуры создается участковый агент. Данный агент получает информацию о требуемых объемах движения и порождает поездных агентов в необходимом количестве, добавляет в рой агентов пере-

гонов и разделительных пунктов и инициирует начало взаимодействия агентов внутри своего роя. В ходе этого взаимодействия агенты предлагают варианты прокладки нитей графиков по участку, исходя из своих интересов. По этим вариантам, заданным набором параметров прокладки поездных нитей, очередности занятия ресурсов, последовательностей скрещивания и пр., система автоматически прокладывает поездные графики движения. Таким образом, агент может получить оценку предлагаемого ему варианта размещения поездов на участке, который можно оценить по ключевому показателю эффективности (Key Performance Indicator, KPI) – некоторой величине, являющейся совокупностью требуемых характеристик графика.

Реализованный в рассматриваемой системе протокол переговоров между агентами реализует локальную передачу задач в ПВ-сети с участием нескольких агентов потребности и нескольких агентов возможности (рис. 1):

- 1) Агент-инициатор протокола (агент возможности или агент потребности), желающий передать часть своих задач, запрашивает всех агентов ресурсов, за какую цену они смогли бы принять эти задачи (запрос *call*). В запросе *call* агент передает, насколько для него этот запрос выгоден, т.е. какой прирост своей целевой функции он получает, избавившись от этих задач. Агенты ресурсов, получившие запрос, независимо друг от друга определяют, какими способами они могут включить задачи в свои расписания, и какие при этом задачи они вынуждены будут вычеркнуть из них. Задачи-кандидаты на вычеркивание из расписания агенты ресурсов пытаются разместить на других агентах ресурсов тем же запросом *call*. Таким образом формируется цепочка запросов вплоть до того агента, который может выполнить задачи безусловно. Он возвращает на запрос *call* ответ *quote* с указанием своей цены принятия данного заказа.
- 2) Каждый агент ресурса собирает ответы *quote* на свои запросы *call*. При этом поверх ПВ-сети формируется сеть возможных корректировок ПВ-сети, с оценкой в каждом узле локальных эффектов от выполнения корректировок. С учетом того, что агентов-инициаторов в один момент времени может быть много, соответственно сеть возможных корректировок растет распределенным образом.
- 3) Получив все ответы (или подождав установленное время), агент ресурса отвечает запросившему его агенту ответом *quote* с указанием лучшей суммы своей цены выполнения задач и лучшей полученной цены выполнения задач, от которых он пытается отказаться. Таким образом, формируются полные цены возможных корректировок ПВ-сети, включающие изменения целевых функций всех участвующих в корректировках агентов.
- 4) Получив все ответы *quote* или дождавшись таймаута, агент-инициатор протокола ищет лучшую из возможных корректировок. В случае, если суммарный эффект от корректировки положительный, т.е. действительно найдено глобальное улучшение, он пытается его «забронировать», послав запрос *order* агенту ресурса, предложившему лучший вариант. Последний агент передает этот запрос по цепочке вниз и отправляет ответ *confirmed* в случае, если эта корректировка все еще выполнима. Бронирование нужно для того, чтобы одновременная работа нескольких агентов-инициаторов в ПВ-сети не мешала друг другу, т.е. в случае, если агент ресурса предложил варианты различным агентам-инициаторам, какая корректировка первая была забронирована, такая и будет реализована.
- 5) Дождавшись подтверждения бронирования, агент-инициатор протокола инициирует запросом *finalize* внедрение корректировки. Только на этом этапе происходит фактическое изменение ПВ-сети. Предварительное бронирование корректировок гарантирует, что при этом корректировка будет непротиворечива, и обеспечит общее улучшение системы.

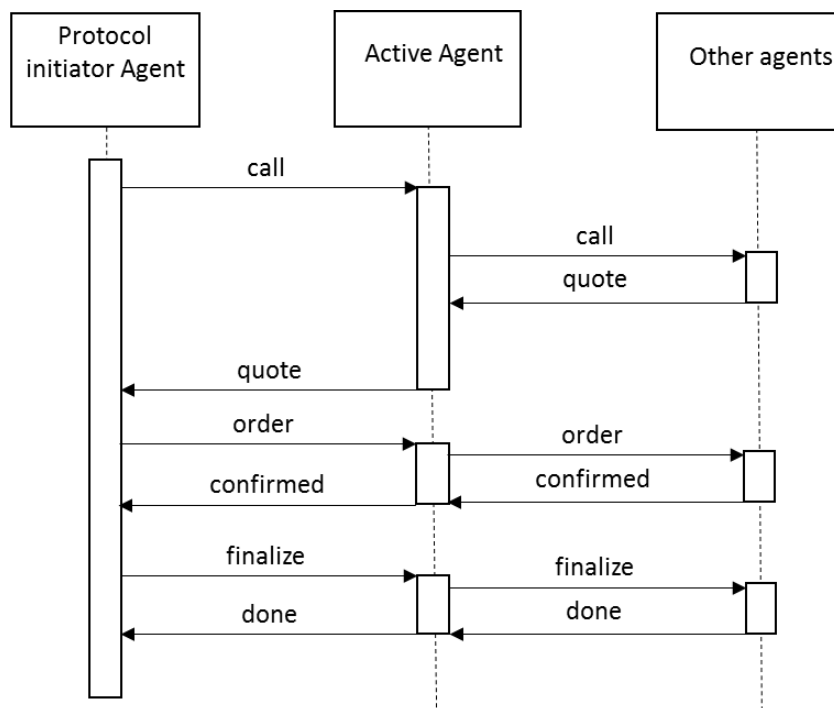


Рис. 1. Протокол передачи задач между ресурсами.

Протокол обеспечивает гибкие схемы обмена задачами между ресурсами, что проиллюстрировано на рис. 2. Три агента ресурса L1, L2, L3 последовательно обмениваются задачами, при этом, например, верхняя часть «дерева обмена» соответствует такой корректировке, что агент L2 передает часть своих задач T2_1 агенту L1, тот их принимает, при условии, что часть своих задач T1_1 он передает обратно агенту L2, а тот выдает другую часть своих задач T2_2 агенту L1, и эту часть L1 уже может вывести. Таким образом, если бы реализовалась эта корректировка, то из расписания агента L2 ушли бы задачи T2_1 и T2_2, добавились бы задачи T1_1, а расписание агента ресурса L1, наоборот, пополнилось бы задачами T2_1 и T2_2 и исключило бы задачи T1_1.

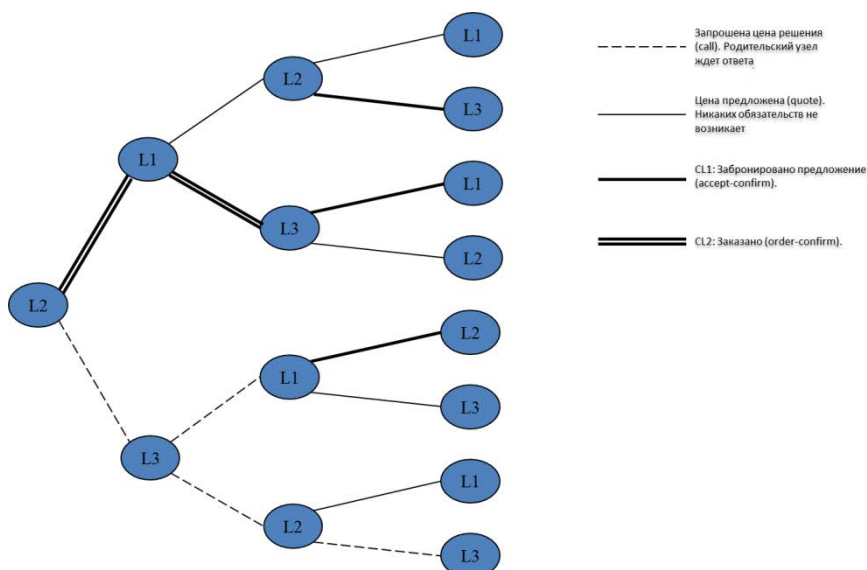


Рис. 2. Временной срез группы агентов ресурсов, решающих задачу. L2 – ресурс-инициатор протокола.

Группы агентов на разных возмущениях до того момента, как решение найдено и внедряется, могут накладываться друг на друга, что обеспечивает поиск решений сразу по многим возмущениям. Однако, решения, полученные в различных группах, могут оказаться противоречащими друг другу. Поэтому корректировка ПВ-сети с учетом первого найденного решения, как правило, приводит к началу поиска решения по другим возмущениям заново. Из этого, в частности, следует целесообразность ограничения количества одновременно обрабатываемых возмущений до 3-9, в зависимости от того, как часто найденные решения не противоречат поиску решения в других группах.

После согласования участкового решения внутри роя, участковый агент начинает взаимодействовать с соседними участковыми агентами для согласования на границах участка.

Мультиагентная система позволяет получить следующие преимущества при решении задачи разработки графиков движения поездов (таблица 2).

Таблица 2. Ожидаемые преимущества применения мультиагентных технологий при построении графика движения.

№ п/п	Преимущества (Что)	Реализация (Как)
1	При построении графика автоматически учитываются фактическое прохождение поездов по перегонам и раздельным пунктам. Происходит сверка нормативных интервалов с фактическими, при необходимости закладывание резервов времени, либо резервов пропускной способности.	Агенты перегонов получают статистику задержек на перегонах из исполненного графика движения и оценивают формируемый график движения, добываясь закладывания необходимых резервов. Аналогично поступают агенты раздельных пунктов.
2	На каждом участке единой сети железных дорог колеи 1520 могут быть заданы свои приоритеты построения графика, а инженер-графист на участке может внести ручные правки, которые будут учитываться при планировании.	Агенты в системе объединены в рои по количеству участков, с собственным набором параметров, которые собирает агент участка. Взаимодействие роев между собой осуществляется автоматически, допуская режим ручного согласования между инженерами-графистами разных железных дорог.
3	Большое количество параметров, отражающих предпочтения в прокладке каждого отдельного пассажирского или пригородного поезда. Возможен специализированный АРМ составителя расписаний, автоматизирующий подачу заявок на прокладку ниток и их согласование.	Каждый агент поезда может иметь произвольный набор параметров и их значений, которые учитываются в случае, когда изменение графика одного поезда приводит к перепланированию другого. В случае противоречивых интересов агенты могут находить компромисс, устраивающий всех агентов.
4	При составлении графиков движения может полноценно учитываться оптимальное использование тяговых ресурсов. В результате, эффективность использования тяговых ресурсов рассматривается системой как дополнительный критерий оптимизации при построении нормативного графика движения.	Агенты, формирующие нормативный график движения, передают информацию о расписаниях агентам локомотивов и локомотивных бригад. Рой последних параллельно планирует требуемую подвязку тяговых ресурсов, сообщая об эффективности решений планировщику нормативного графика.

4. Заключение

Применение мультиагентных технологий в задачах построения и оптимизации нормативных, вариантных и актуализированных графиков движения поездов позволит:

- учесть при планировании гораздо больше факторов построения графиков, практических инженерами-графистами, чем это возможно при применении классических

алгоритмов математического программирования. В частности, могут быть заданы практически произвольные функции расходов, связанных с движением поездов;

- снять необходимость полной перестройки графика при съеме одной из докладываемых «ниток»;
- обеспечить лучшую связь человек-машина, объяснить диспетчеру, почему машина выбрала тот или иной вариант решения, а также полностью учесть частичные решения, принятые человеком;
- учесть при разработке графика результаты работы других мультиагентных систем: системы подвязки тяговых ресурсов, системы оптимизации плана формирования, системы прогнозирования грузопотоков и др.

В целом, это приведет к более качественному построению графиков движения поездов при одновременном повышении уровня автоматизации и позволит существенно расширить возможности сетецентрической мультиагентной технологической платформы управления железнодорожным транспортом.

Список литературы

1. Dong-Kyu KIM, Chang-Ho PARK. Development of train scheduling model accommodating transfer behavior // Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2005. No. 6. P. 372-384.
2. Steven R. Ditmeyer. Network-Centric Railways Operations Utilizing Intelligent Railway Systems // Journal of Transportation Law, Logistics and Policy. 2010. Vol. 77, No. 3. P. 197-219. Режим доступа: http://www.transportation.northwestern.edu/docs/2011/2011.03.15.Ditmeyer_Paper.pdf
3. Шабунин А.Б., Чехов В.А., Скобелев П.О., Кузнецов Н.А., Симонова Е.В., Бабанин И.О., Кожевников С.С., Степанов М.Е., Царев А.В., Сазуров С.В., Курбатов Е.В., Дмитриев Д.В. Сетецентрический подход к созданию распределенных систем управления ресурсами ОАО «РЖД» на основе мультиагентных технологий // Труды XIV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, 22-25 июня 2012 г. Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. С. 724-734.
4. Скобелев П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 12. С. 33-46.
5. Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Application // Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems HoloMAS '2011. France, Toulouse. Springer, 2011. P. 5-14.
6. Шабунин А.Б., Кузнецов Н.А., Скобелев П.О., Бабанин И.О., Кожевников С.С., Симонова Е.В., Степанов М.Е., Царев А.В. Разработка мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО «РЖД» // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 1. С. 23-29.
7. Шабунин А.Б., Марков С.Н., Дмитриев Д.В., Кузнецов Н.А., Скобелев П.О., Кожевников С.С., Симонова Е.В., Царев А.В. Интеграционная платформа для реализации сетецентрического подхода к созданию распределенных интеллектуальных систем управления ресурсами ОАО «РЖД» // Программная инженерия. 2012. № 9. С. 23-28.
8. Шабунин А.Б., Чехов А.В., Ефремов Г.А., Дмитриев Д.В., Курбатов Е.В., Сазуров С.В., Бабанин И.О., Белоусов А.А., Кожевников С.С., Симонова Е.В., Скобелев П.О., Степанов М.Е., Царев А.В., Мунтян Г.Ю. Решение конфликтов в графике движения поездов в реальном времени с использованием мультиагентных технологий // Труды 1-й научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» ИСУЖТ-2012. Москва, 15-16 ноября 2012 г. С. 51-55.
9. Скобелев П.О., Белоусов А.А., Лисицын С.О., Царев А.В. Разработка интеллектуальной системы управления грузовыми перевозками для полигона «Восточный» // Труды XV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, 25-28 июня 2013 г. Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. С. 391-396. ISBN 978-5-93424-662-5
10. Jamili A. et al. Solving a periodic single-track train timetabling problem by an efficient hybrid algorithm // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2012. Vol. 25. P. 793-800.
11. Виттих В.А., Скобелев П.О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 162-169.