

**Белоусов А.А., Скобелев П.О., Степанов М.Е., ООО «НПК «Разумные решения», г. Самара**  
**Ефремов Г.А., ОАО «НИИАС», г. Москва**  
**Курбатов Е.В., ООО «ПрограмПарк» г. Москва**

## **Особенности мультиагентного планирования движения поездов на однопутных участках в реальном времени на примере Невельского участка и Байкало-Амурской магистрали**

### **1. Введение**

Известно, что строительство ЖД инфраструктуры длится с начала 19 века, и её текущее состояние оставляет всё меньше вариантов экстенсивного и толкает к продолжению интенсивного развития: применение энергосберегающих технологий и режимов движения, совершенствование обслуживания инфраструктуры и, главным образом, оптимизация графиков движения поездов.

Современные интеллектуальные системы поддержки принятия согласованных решений в реальном времени в сложных и крупномасштабных системах должны поддерживать существующие эффективные и использовать новые методы и средства автоматизации управленческой деятельности, позволяющие учитывать все многообразие факторов, критериев, правил, взаимодействий. Должен обеспечиваться высокий уровень достоверности и качества решений, а также производительности в реальном времени.

В данной работе представлена система, основанная на мультиагентных технологиях, которая решает сложную задачу адаптивного управления движением поездов в реальном времени. В настоящее время разработанная система проходит опытную эксплуатацию на Невельском участке Октябрьской железной дороги и на Восточно-Сибирской железной дороге. В промышленной эксплуатации система находится на полигонах Октябрьской железной дороги.

### **2. Мультиагентный подход к адаптивному управлению железнодорожным движением**

#### **2.1. Постановка задачи**

Задача адаптивного управления железнодорожным движением в реальном времени [1] заключается в построении детального плана движения поездов с целью приведения их к минимальным отклонениям от нормативного расписания с учетом разнородных ограничений и требований по непрерывно поступающим событиям (поломка поезда, занятость путей, ремонтные работы, скоростные ограничения движения и пр.).

К входным данным задачи относятся:

- инфраструктура железнодорожной сети с детализацией до блок-участков (БУ) – станции, стрелки, блок-участки (БУ);

- нормативные графики движения;
- требования на проведение ремонтных работ на путях (окна);
- обновления текущей ситуации на полигоне по продвижению поездов и состояний БУ (сигналы занятости или информация о недоступности блок-участков).

Решением такой задачи будет являться план по возврату опаздывающих под воздействием непредвиденных событий поездов в нормативный график движения, а также список мер диспетчерского регулирования для разрешения конфликтных ситуаций и исполнения полученного плана.

Большая размерность решаемой задачи характеризует ее как крупномасштабную. Например, Невельский полигон Октябрьской ЖД (475 км включает 47 станций) и участок Байкало-Амурской магистрали (1805 км включает 105 станций).

К основным ограничениям системы относятся требования безопасности движения, нормативные требования построения маршрутов движения, приоритеты поездов, диспетчерские правила и пр.

Применение тех или иных требований зависит от текущей ситуации, т.е. имеется ситуационность в принятии решений.

Для решения задачи адаптивного управления железнодорожным движением в реальном времени, была разработана система на основе мультиагентных технологий и методов. Мультиагентный подход позволил адекватно учесть все множество разнородных критериев, ограничений и требований к управлению поездками, в том числе и плохо формализуемых. Архитектура мультиагентной системы открыта и позволяет вводить новые условия и критерии, а также менять старые и управлять ими динамически, благодаря применению специально созданной онтологии (базы знаний).

#### **2.2. Архитектура мультиагентной системы**

Архитектура разработанной системы строится на принципах сетцентризма, при котором каждая подсистема (слой) выполняет свою индивидуальную задачу, а итоговое решение получается путем согласования индивидуальных решений [2].

Данное разделение построения расписаний поездов на слои позволяет избежать комбинаторного взрыва вариантов, сделать процесс планирования более устойчивым к возмущениям за счет сокращения размерности задачи на более высоких уровнях и поэтапного учета всех возможных ограничений в соответствии со степенью важности и влияния на остальные уровни [7].

Планирование движения поездов происходит на двух уровнях:

на первом уровне планирования по заданному расписанию поездов рассчитываются их траектории движения, т.е. перегоны и пути станции по которым должны проехать поезда, включая блок-участки стоянок и маневровое движение на станциях для бесконфликтного выполнения заданного расписания;

на втором уровне планирования происходит адаптивное изменение существующего расписания поездов при отклонении поездов от эталонного расписания или при возникновении непредвиденных ситуаций (например, незапланированное окно ремонтных работ, ложная занятость и т.д.). Т.е. определяются времена прибытия и отправления поездов со станции, времена занятия и освобождения блок-участков траектории.

Первый уровень планирования представлен траекторным планировщиком, второй уровень – временным планировщиком. Общий метод поиска решения и роль планировщиков в нем показаны на рисунке 1.

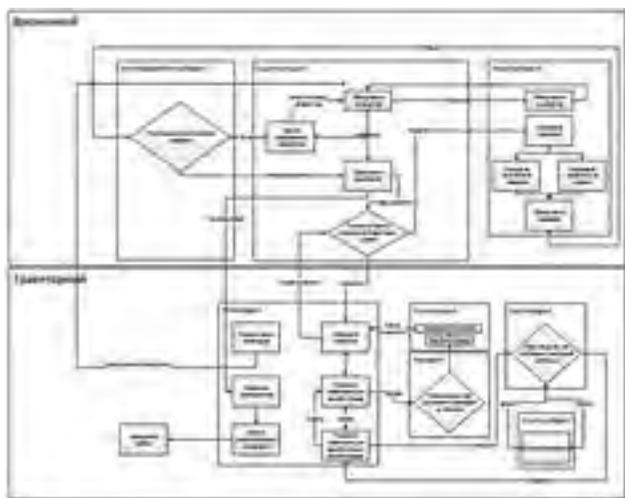


Рис. 1. Взаимодействие основных подсистем планирования, представленное диаграммой Event-driven Process Chain

Данная диаграмма описывает взаимодействие систем на высоком уровне абстракции. Блоки диаграммы в свою очередь могут являться подсистемами со сложной внутренней структурой.

Решение поставленной задачи базируется на методе сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном времени [4]. Так,

если на траекторном уровне агенты поездов, интервалов и станций совместно определяют где и как будет проходить поезд, то на временном уровне агент поезда порождает подзадачи (операции) на проследование по перегону или стоянку на станции в определенном временном интервале.

Агент каждой такой подзадачи ищет для себя размещение на соответствующем ресурсе, пытаясь занять наиболее выгодное для себя место через переговоры с другими агентами подзадач. Агенты поездов с большим приоритетом ведут себя активнее при поиске лучшего размещения (имеют больше энергии для выталкивания других заявок с ресурсов).

Для исключения закликиваний в ходе согласований и поиска решений, варианты представляются в виде ациклического ориентированного графа. Это исключает формирование переходов, формирующих циклы.

На уровне работы траекторного планировщика итогом работы является выбор траектории проследования поезда по маршруту, с детализацией до блок-участков [4, 5]. У временного планировщика результатом является план со временами стоянок и проследования по станциям и перегонам полигона.

### 3. Программная реализация

#### 3.1. Реализационные характеристики

Рассмотрим реализационные характеристики подробнее на примере Невельского полигона и участка Байкало-Амурской магистрали. Длина Невельского полигона составляет около 475-километровому пути (около 387 км длины которого является однопутным). За сутки на нём активны в среднем 150 поездов различных назначений (высокоскоростные, грузовые, хозяйственные и др.).

У рассматриваемого участка Байкало-Амурской магистрали протяжённость пути составляет около 1805 км, из которых около 1036 км – «однопутка». В течение суток на рассматриваемом участке Байкало-Амурской магистрали активны около 160 поездов различных видов.

Значимые для планирования характеристики рассматриваемых полигонов представлены в таблице 1.

Учитывая, что в планировщике каждый поезд представлен своим агентом, и каждому поезду требуется в среднем около 45 операций (операции движения по перегону, стоянки на станции или следования по станции и др.), получаем только для поездов не менее 6750 агентов виртуального мира (для одного полигона). Кроме них в сцене мира присутствуют ещё агенты станций, блок-участков, маршрутов, ремонтных работ и занятости. Разделение этого большого количества агентов на слои и объединение в отдельные изолированные рои агентов, активные в определенные момен-

Таблица 1. Значимые характеристики полигонов

Полигон	Количество станций	Количество объектов инфраструктуры	Среднее время загрузки и подготовки инфраструктуры, с
Невельский полигон Октябрьской ЖД	47	5597	13,6
Участок Байкало-Амурской магистрали	105	22397	29,5

Таблица 2. Временные характеристики планирования в зависимости от числа задач

Полигон	Число дополнительных подходов	Среднее время пересчета (с)	Среднее время пересчета с добавлением 10 окон (с)
Невельский полигон Октябрьской ЖД	5	9,68	9,39
	10	9,41	10,76
	15	11,07	11,50
	20	12,36	10,88
	25	12,55	12,72
Участок Байкало-Амурской магистрали	5	22,50	23,21
	10	28,19	30,58
	15	34,75	42,16
	20	38,97	42,17
	25	48,20	46,40

ты времени, позволяет повысить общую производительность системы [2].

Для получения реализационных характеристик по каждому показателю было определено среднее значение на основании результатов 20 опытов для двух указанных выше полигонов. Учитывается решение не отдельного уровня планировщика, а совокупное.

В таблице 2 представлено изменение временных характеристик планирования в зависимости от числа планируемых подходов на полигонах. В рамках эксперимента, для увеличения точности первоначальный расчёт оставался одним, а оценки изменений производились на пересчётах. Из таблицы видно, что при сравнимом количестве поездов на полигонах (150 поездов для Невельского полигона и 160 поездов на участке Байкало-Амурской магистрали) время пересчёта различается в диапазоне от 2,3 до 3,9 раза, что связано со значительной разницей в объёме инфраструктуры, которую обрабатывает планировщик. Однако можно заметить близкую к линейной зависимость между количеством элементов инфраструктуры и временем пересчёта маршрутов поездов на каждом полигоне.

Время пересчёта на каждом полигоне проходит в среднем быстрее на 15–40% от первоначального времени расчёта. Это связано с тем, что при пересчёте, расписания поездов не пересчитываются заново, а адаптивно корректируются в соответствии с поступающими событиями.

Результаты расчёта подтвердили ранее полученные результаты вычислительных экспериментов для полигонов с многопутным движением [2].

Данный результат для полигонов с преобладающим однопутным движением получен впервые. Рост слож-

ности решения для диспетчера не всегда ведёт к увеличению времени на его нахождение адаптивным планировщиком (характерно для однопутных участков), а разница между скоростью получения результатов между диспетчером и мультиагентной системой огромна.

### 3.2. Показатели внедрения

К ожидаемым результатам от внедренной системы адаптивного управления движением поездов относятся: уменьшение затрат времени и ручного труда на прокладку поездов без жесткого расписания, уменьшение общего времени реакции на непредвиденное событие, автоматическая корректировка графика движения поезда при возникновении нештатной ситуации/конфликта с учетом всех норм и ограничений, возможность анализа прогнозного графика и показателей движения. Отсутствие необходимости держать все в голове или рисовать график на бумаге повышает качество работы оперативного поездного диспетчера, а также минимизирует количество нарушений в движении поездов за счет учета всех заданных ограничений и требований.

Прокладка нескольких поездов диспетчерским расписанием с разных направлений на однопутных участках требует не только правильно рассчитывать все нормативы для разгона и замедления поездов при остановке на стоянки, все занятости путей на станции, все длины свободных стоянок, а также учесть правила скрещивания поездов, в том числе с возможностями двухпутных вставок (разъезды) и без них. Дополнительная сложность прокладки маршрутов на однопутных участках заключается в том, что даже минимальное изменение приводит к необходимости полностью перестроить график, так как отсутствуют возможности использова-

ния второго пути для поездов обоих направлений (альтернативного пути нет). Все эти обстоятельства, как и увеличенные длины однопутных перегонов восточной части России (например, за Уралом средняя длина однопутного перегона больше на 40%, чем в европейской части России), усугубляются с появлением технологических работ на перегонах. Кроме этого, расписание не остается статичным и из-за внешних событий и может стать невыполнимым за считанные секунды. Например, занятость пути нужной длины на станции в связи с поломкой делает невозможным стоянку, запланированную министерским графиком у поезда, который уже начал движение по маршруту. Ему срочно нужно менять свое расписание: переносить данную стоянку на другую станцию. Учитывая, что отклонения от нормативного графика портят статистику диспетчера, такая ситуация вызывает повышенное внимание диспетчера и может отодвинуть задачу качественной прокладки поездов диспетчерским расписанием на второй план.

В свою очередь, планировщик, несмотря на многообразие событий, возмущений, условий и ограничений справляется с задачей прокладки поездов, в том числе и диспетчерским расписанием, за секунды и выдает диспетчеру готовое решение, удовлетворяющее всем ограничениям и требованиям, с минимальными отклонениями от нормативных графиков их движения и минимальным необходимым количеством стоянок (повышение энергоэффективности).

Так как рост эффективности и производительности диспетчеров связаны с переложением большей части механических функций по учёту огромного количества нормативов и стандартов на адаптивный планировщик, диспетчеру остаётся больше времени на контроль и корректировку слабо формализуемых требований, что не только снижает затраты времени на прежний объём работы, но и повышает качество решения и самооценку исполнителя (увеличение доли высокоинтеллектуального труда).

#### 4. Заключение

Предлагаемая мультиагентная система адаптивного управления железнодорожным движением в реальном времени [2] разрабатывалась в рамках создания Единой интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом (ИСУЖТ) НИИАС ОАО «РЖД» [6].

Среди дальнейших направлений развития разработанной системы управления поездами можно выделить следующие: объяснение получаемых решений, визуализация пространства решений, демонстрация логики принятия решений диспетчеру; интерактивное взаимодействие с диспетчером для доводки качества плана, моделирование развития ситуации, обучение;

оценка качества решения по гибкому набору критериев и общему уровню «удовлетворенности» ресурсов; увеличение производительности за счет распараллеливания асинхронных процессов планирования.

Указанные разработки помогут улучшить качество решений и повысить эффективность работы для конечных пользователей, повысить экономическую эффективность.

#### Литература

1. A.A. Belousov, A.A. Goryachev, P.O. Skobelev, M.E. Stepanov A multi-agent method for adaptive real-time train scheduling with conflict limitations // In: Proceedings of Complex Systems 2015, New Forest, UK, 12-14 May 2015 – P 253-266.
2. Белоусов А.А., Скобелев П.О., Ефремов Г.А., Степанов М.Е., Горячев А.А., Шабунин А.Б. Мультиагентный подход к решению сложной задачи построения расписания в крупномасштабной системе управления железнодорожным движением // «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2014)»: Сборник научных трудов / под общ. ред. С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна; Ин-т проблем управления им. В.А.Трапезникова Рос. акад. наук. – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 252-263. – ISBN 978-5-91450-161-4.
3. Виттих В.А., Скобелев П.О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном времени // Автотметрия. – 2009. – №2. – с. 78-87.
4. Abbink, E.J.W., Mobach, D.G.A., Fioole, P.J., Kroon, L.G., van der Heijden, E.H.T., Wijngaards, N.J.E., Actor-Agent Application for Train Driver Rescheduling // In: Proceedings of AAMAS, Budapest, Hungary, 2009. – P 513-520.
5. П.О. Скобелев, А.А. Белоусов, С.О. Лисицын, А.В. Царев. Разработка интеллектуальной системы управления грузовыми перевозками для полигона «Восточный» // Труды XV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» Самара, 25-28 июня 2013г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. – С. 391-396. – ISBN 978-5-93424-662-5.
6. А.Б. Шабунин, Н.А. Кузнецов, П.О. Скобелев, И.О. Бабанин, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, М.Е. Степанов, А.В. Царев. Разработка мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО «РЖД» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. №1. – С. 23-29.
7. Белоусов А.А., Скобелев П.О., Ефремов Г.А., Степанов М.Е., Горячев А.А., Шабунин А.Б. Мультиагентный подход к решению сложной задачи построения расписаний в крупномасштабной системе управления железнодорожным движением // «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2014)»: Сборник научных трудов / под общ. ред. С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна; Ин-т проблем управления им. В.А.Трапезникова Рос. акад. наук. – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 252-263. – ISBN 978-5-91450-161-4.