

СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКАЯ МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

А.А. Белоусов

ООО «НПК «Мультиагентные технологии»
Россия, 443013, Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)
Россия, 443123, Самара, Московское шоссе, 34
E-mail: belousov@smartsolutions-123.ru

Г.А. Ефремов

ОАО «НИИАС»
Россия, 107996, Москва, Орликов переулок, 5, стр. 1
E-mail: g.efremov@gismps.ru

М.Е. Степанов

ООО «НПК «Мультиагентные технологии»
Россия, 443013, Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201
E-mail: stepanov@smartsolutions-123.ru

А.Б. Шабунин

ОАО «НИИАС»
Россия, 107996, Москва, Орликов переулок, 5, стр. 1
E-mail: A.Shabunin@gismps.ru

Ключевые слова: мультиагентные системы, сетецентрический подход, интеллектуальные системы, роевые системы, метод сопряженных взаимодействий, адаптивное планирование

Аннотация: В статье предлагается сетецентрический подход к созданию интеллектуальной системы адаптивного планирования движения поездов на основе мультиагентных технологий. Рассмотрена архитектура сетецентрической мультиагентной системы, состоящей из трех базовых подсистем планирования. Описаны протоколы взаимодействия подсистем и протоколы взаимодействия агентов внутри каждой подсистемы. Подробно рассмотрен пример построения плана разработанной системой. Представлены реализационные характеристики разработанной системы.

1. Введение

При решении сложных задач автоматизации управления железнодорожным транспортом приходится непрерывно сталкиваться с большим количеством возмущений,

разных по силе воздействия и характеру возникновения, которые могут приводить к конфликтным ситуациям и отклонениям пассажирских, пригородных, грузовых поездов от графика движения. В настоящее время разрешение конфликтных ситуаций, связанных с выходом поездов из расписания, полностью зависит от опыта конкретного диспетчера, что зачастую приводит к нерациональным действиям для ввода поездов в график, особенно в стрессовых ситуациях. Постоянный рост интенсивности и скорости пассажиропотока приводит к увеличению сложности внештатных ситуаций и остро ставит вопрос о сокращении влияния человеческого фактора за счет автоматизации процесса принятия решения и внедрения интеллектуальных систем, обеспечивающих быстрое и эффективное урегулирование в случае возникновения внештатных ситуаций.

В этой связи, актуальным является переход от пакетного управления ресурсами, опирающийся на предположение об «устойчивости» среды, к принятию решений «на лету» в условиях постоянного изменения контекста ситуации, требующих своевременных корректировок ранее разработанного плана движения поездов. Это предполагает разработку и использование новых методов и средств автоматизации управленческой деятельности для создания интеллектуальных систем поддержки принятия согласованных решений в реальном времени [1].

В данной работе описывается реализация сетецентрической мультиагентной системы для адаптивного управления движением поездов в реальном времени. Основной чертой, характерной для современных железнодорожных перевозок, является высокая интенсивность и скорость движения поездов, которая с каждым годом будет только возрастать. В силу высокой интенсивности движения, поезда тесно связаны между собой: изменения в расписании одного поезда, или конфликт, затрагивающий этот поезд, непременно отразится на следующем поезде и, с большой степенью вероятности, может распространиться по всей железнодорожной сети, словно цепная реакция. В такой ситуации может потребоваться перестроить расписания всех поездов в сети, причем оперативно, «на лету» в реальном времени, что с учетом существования множества критериев планирования, предпочтений и ограничений, влияние каждого из которых индивидуально и может регулироваться в процессе работы, очень трудоемкая и сложная задача.

В настоящее время система внедрена на участке высокоскоростного движения Санкт-Петербург–Москва и на участке Санкт-Петербург–Бусловская.

2. Мультиагентная система адаптивного управления движением поездов

2.1. Постановка задачи

Разработанная система для управления движением поездов предназначена для создания в реальном времени оптимального плана возврата поездов в расписание, опаздывающих под влиянием непредвиденных событий.

Система разрабатывалась на базе программной платформы «Вектор-М» разработки компании «ПрограмПарк» [2, 3], позволяющей в реальном времени вести динамическую модель полигона, получая сигналы занятости блок-участков, назначенных «окон» ремонтных работ, спутниковую и другую информацию. Система строит начальный график движения поездов, а далее выполняет его корректировку по событиям (заявки на ремонт участков пути, фактическое продвижение поездов и пр.). Реализуется как логика реакции на события, когда каждое событие запускает цепочку перепланирований

ресурсов, так и проактивная оптимизация планов, позволяющая улучшать варианты, пока есть время для работы системы и принятия решений.

К входным данным системы относятся:

- инфраструктура железнодорожной сети с детализацией до блок-участков;
- требования проследования поездов по заданным расписаниям (вариантные графики движения);
- требования на проведение ремонтных работ;
- обновления текущей ситуации на полигоне по продвижению поездов и состояниях блок-участков (БУ) (сигналы занятости или информация о недоступности блок-участков).

К основным ограничениям системы относятся требования безопасности движения, нормативные требования построения маршрутов движения и пр.

Однако, помимо перечисленных есть еще другие плохо формализуемые критерии (отсутствие сгущений линий на графиках движения поездов, отсутствие необоснованных выходов на неправильные пути, отсутствие заторов поездов на перегонах, отсутствие необоснованных стоянок поездов на путях главного хода и пр.), которые необходимо учитывать при планировании. При этом применение тех или иных требований зависит от текущей ситуации. Например, поезд не может выходить на неправильный путь, но если на его маршруте возникает занятость блок-участка или окно ремонтных работ, то он может выйти на неправильный путь, чтобы объехать препятствие и не выбиться из графика. Но только если не помешает другим более приоритетным поездам своими маневрами. С другой стороны, он может не менять маршрут, а просто немного задержаться, если эта задержка будет небольшой и он сможет в дальнейшем нагнать свое расписание. Таким образом, простое решение о том менять маршрут или нет, оказывается связанным с множеством условий, между которыми необходимо найти баланс. Для балансировки решений в таких ситуациях у всех агентов поездов в системе предлагается использовать накапливаемую «виртуальную валюту» (аналог «потенциальной энергии»), которая применяется для премирования успешных решений и наоборот может тратиться на штрафы при плохих решениях, компенсируя изменение маршрута или расписания у поезда. Таким образом, все плохо формализуемые требования и ограничения можно свести к универсальной величине и учитывать их при планировании движения поездов.

Результатом работы мультиагентной системы является график движения поездов с точностью до блок-участка, что позволяет с такой же точностью разрешать возникающие конфликтные ситуации во время движения поездов в реальном времени.

2.2. Архитектура мультиагентной системы

Архитектура мультиагентной системы адаптивного управления движением поездов представлена на рис. 1.

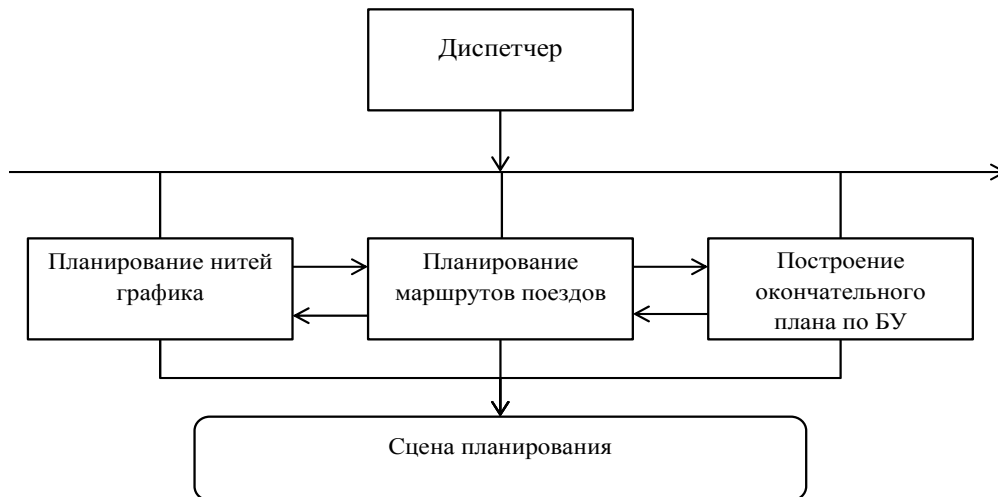


Рис. 1. Архитектура мультиагентной системы адаптивного управления движением поездов в реальном времени.

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

Подсистема Диспетчер является управляющей, которая координирует работу остальных подсистем, обеспечивает чтение и запись данных в сцену планирования. Сцена планирования представляет собой набор разнообразных хранилищ, в которых находятся данные, необходимые для планирования. Основное построение плана происходит в три этапа, которые представлены на рис. 1 соответствующими подсистемами. Каждый из них строит график движения поездов на своем уровне представления сцены таким образом, что из начального приближенного решения получается все более точное. Решение, полученное на каждом этапе, является бесконфликтным для своего уровня представления сцены (отсутствуют недопустимые пересечения траекторий поездов, не нарушены требования по безопасности).

Более детально взаимодействие компонент представлено на рис. 2.

Все события, поступающие в систему, можно разделить на два основных типа: новое требование или актуализация текущей ситуации. Требования, в свою очередь, могут быть двух типов: требование на проследование поезда по расписанию и требование о проведении ремонтных работ. Актуализация текущей ситуации может быть или фактом о продвижении поезда по блок-участкам, или фактом о состоянии блок-участка инфраструктуры (поломка или занятость). Событие-требование поступает в нитевую подсистему, событие – актуализация текущей ситуации во временную подсистему.

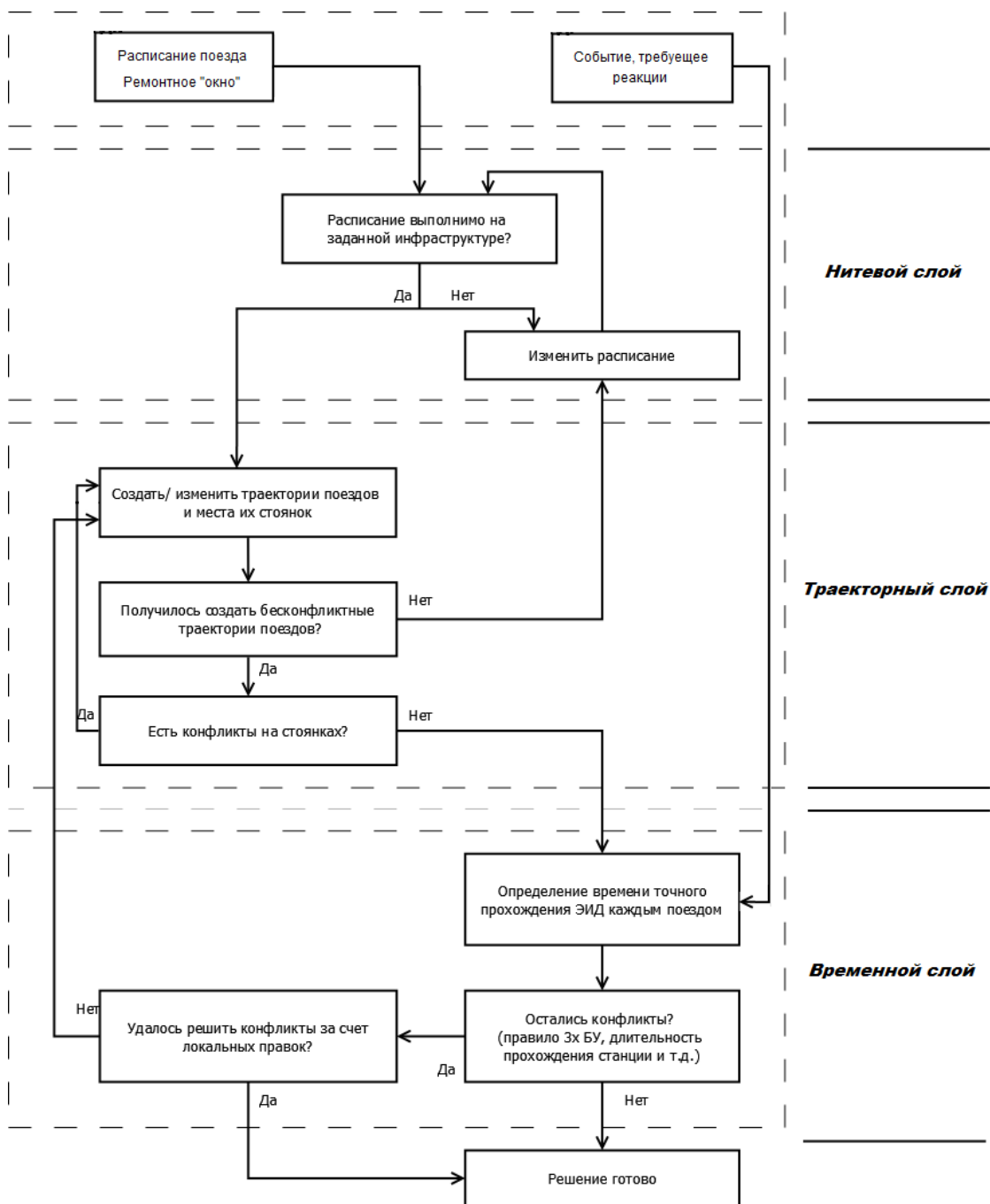


Рис. 2. Взаимодействие основных подсистем планирования.

Нитевая подсистема представляет полигон как совокупность перегонов и станций, строит график движения поездов укрупненно, конфликты решаются через выстраивание очередности поездов, ускорение и замедление участковых скоростей. Схема планирования и взаимодействия агентов в нитевой подсистеме представлена на рис. 3.

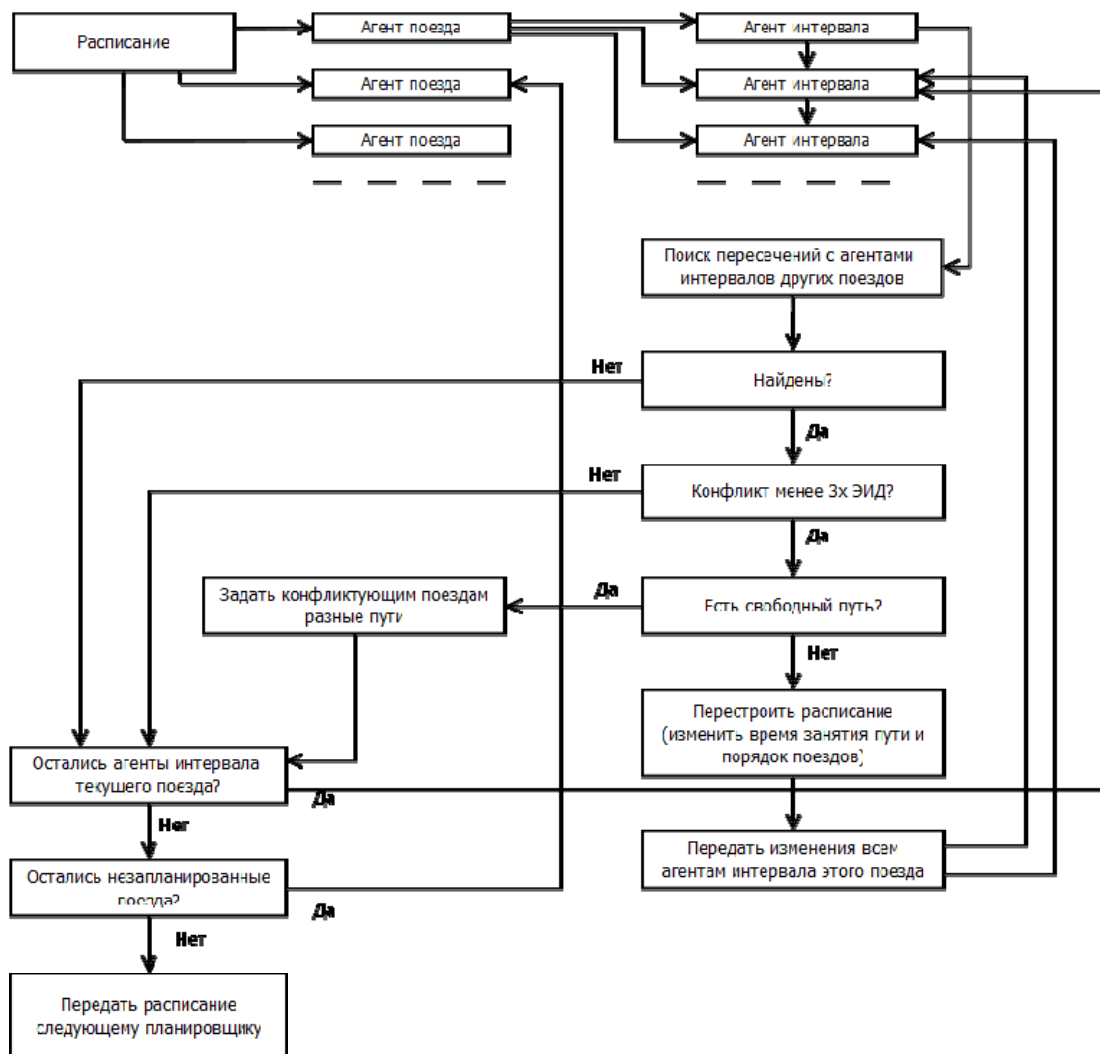


Рис. 3. Планирование в нитевой подсистеме.

Нитевое планирование сходно с визуальным анализом расписания. Основной задачей является построить новое выполнимое расписание с учетом нормативных ограничений графика и приоритетов поездов. Решение поставленной задачи базируется на методе сопряженных взаимодействий для управления распределения ресурсов в реальном времени [4]. На данном уровне агент поезда порождает подзадачи (операции) на прохождение 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).

Основным критерием принятия решения здесь является выполнение операции с минимальным отклонением:

$$(1) \quad DEV_T = \sum_{i=1}^N (|TD_S - TP_S| + |TD_F - TP_F|) \rightarrow \min,$$

где TD_S – запланированное время старта, TD_F – запланированное время окончания, TP_S – фактическое время старта, TP_F – фактическое время окончания, N – количество ресурсов (перегонов, станционных платформ) на которых могут выполняться операции

проследования или стоянки. Другим критерием является выполнение нормативных требований движения и безопасности. Результатом работы нитевой подсистемы является план с временами стоянок и проследования по станциям и перегонам полигона, который передается в траекторный компонент для построения траекторий движения поездов по блок-участкам, если это осуществимо.

В траекторной подсистеме для каждого поезда строится траектория движения по блок-участкам полигона в соответствии с рассчитанным укрупненным графиком, конфликты решаются за счет объездов и изменения маршрутов движения. Схема планирования и взаимодействия агентов представлена на рис. 4.

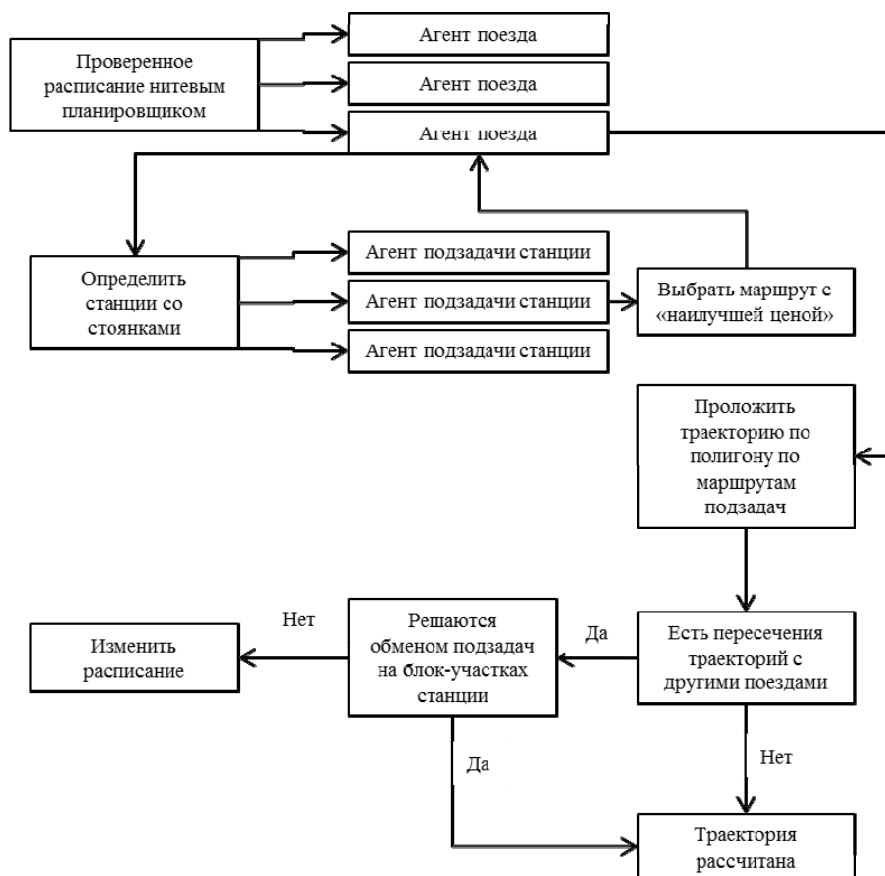


Рис. 4. Планирование в траекторной подсистеме.

Основная задача при планировании траекторий и стоянок – распределить пути, по которым должны ехать поезда, и выбрать блок-участок для их стоянок с учетом непересечения маршрутов подъезда/отъезда к местам стоянок. В данной подсистеме агент поезда порождает новых агентов подзадач, которые ищут маршрут движения по станции или перегону, исходя из критерия минимальной «стоимости» маршрута. Под «стоимостью» понимается суммарный KPI (Key Performance Indicator, Ключевой Показатель Эффективности) маршрута, включающий в себя различные нормативные требования по проследованию поездов (правильность пути, длину пути, количество съездов и т.д.). После построения маршрутов с минимальными KPI агенты станционных маршрутов вступают в активную фазу жизненного цикла, во время которой основным критерием принятия решения является отсутствие пересечений в маршрутах поездов на БУ. Обнаружив такое пересечение, агент станционного маршрута пытается передать одну из конфликтных подзадач другим агентам маршрутов. Взаимодействие агентов маршрутов происходит по протоколу обмена задачами [5, 6].

При успешном построении траекторий, подсистема передает полученный план по блок-участкам во временную подсистему, иначе он посылает на нитевую подсистему сообщение в котором указывает место в расписании, которое невозможно выполнить на текущей инфраструктуре.

Во временном компоненте итоговый график-план по блок-участкам проверяется и при необходимости корректируется, чтобы соответствовать нормативным требованиям. При возникновении конфликтов происходит их корректировка за счет локальных изменений плана движения по блок-участкам (рис. 5).

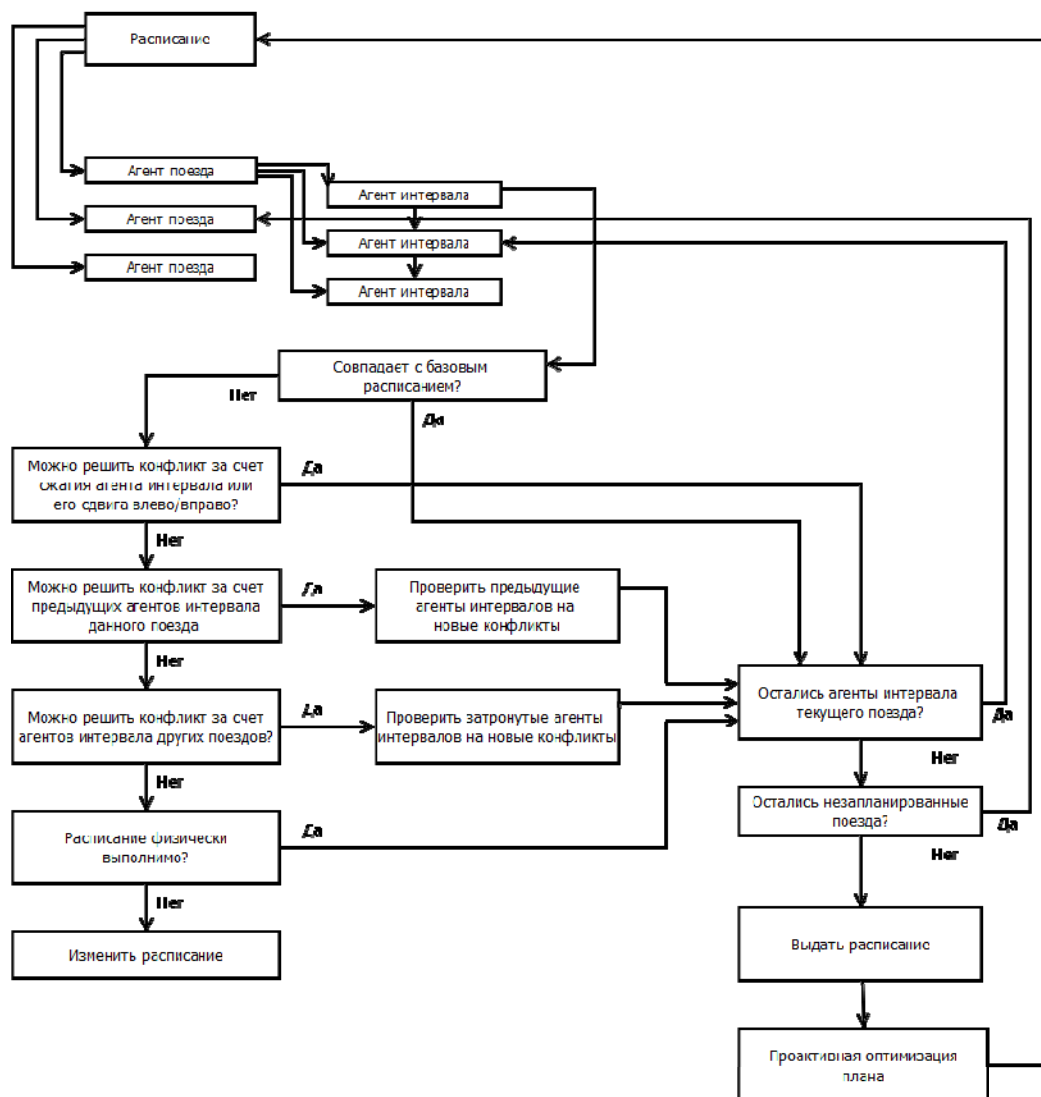


Рис. 5. Планирование во временной подсистеме.

Во временной подсистеме, так же как и на нитевой, используется метод сопряженных взаимодействий [4], однако ресурсами уже выступают не перегоны и станционные платформы, а блок-участки инфраструктуры, при этом маршрут поезда порождает множество агентов задач проследования по блок-участкам маршрута. К критериям суммарного минимального отклонения времени выполнения операций на ресурсах (1) и нормативным требованиям движения добавляются нормативные требования, характерные для представления полигона в виде блок-участков (интервалы движения, требования по ускорению и замедлению и т.д.). В результате, получается итоговый согласованный план. Если все ограничения выполнить невозможно, то временная подсистема

создает сообщение с указанием места в плане, где происходит нарушение, и передает его в траекторный компонент.

Основные классы агентов мультиагентной системы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные классы агентов сетцентрической мультиагентной системы для адаптивного управления железнодорожным движением в реальном времени.

Агент	Тип	Подсистема	Цели и задачи	Ограничения
Агент поезда	Агент потребности	Все	Проследовать по полигону с минимальными отклонениями от исходного расписания, создание агентов для отдельных компонент	Нормативные ограничения, требования безопасности, инфраструктурные ограничения
Агент интервала (станция/перегон)	Агент потребности	Нитевая	Занять интервал стоянки или проследования на станции или перегоне с минимальным отклонением от исходного, поиск ресурсов, решение конфликтов	Для выполнения требуется ресурс (станция или перегон) удовлетворяющий ограничениям (правильный путь, станция из расписания и т.д.), взаимосвязи с другими агентами
Агент станции	Агент возможности	Нитевая	Отсутствие пробок на станции	Число путей на станции для приема/отправления
Агент перегона	Агент возможности	Нитевая	Отсутствие простоев на перегоне	Число путей перегона, нормативные требования
Агент подзадачи проследования по станции	Агент потребности	Траекторная	Выбор маршрута проследования по станции в установленное время, поиск ресурсов, решение конфликтов	Временные факторы, инфраструктурные ограничения, отсутствие помех для других подзадач проследования (перекрытие маршрутов)
Агент станционного маршрута	Агент возможности	Траекторная	Выполнить все подзадачи проследования, поиск подзадач, решение конфликтов	Отсутствие пересечений подзадач на маршруте, нормативные ограничения по типам маршрутов
Агент интервала (на БУ)	Агент потребности	Временная	Занять БУ для проследования с минимальным отклонением от требуемого в плане, поиск ресурсов, решение конфликтов	Для выполнения требуется ресурс (БУ), выполнение требований по разгону и торможению, требований безопасности
Агент БУ	Агент возможностей	Временная	Быть равномерно загруженным без пересечений на ресурсе	Длина БУ, специализация БУ

Построение и согласование итогового плана-графика движения поездов происходит во всех подсистемах (рис. 2). В каждой подсистеме планирования существует свой «рой агентов», характерный для представления слоя, между подсистемами существуют обратные связи, которые задействуются при невозможности решить конфликт локально в текущей подсистеме. В этом случае, конфликт перенаправляется в подсистему, которая может его разрешить, после чего согласование повторяется.

Например, в систему поступает событие о фактическом отставании поезда от запланированного графика движения. Это событие поступает во временную подсистему. Если отставание от графика движения небольшое, то конфликт будет погашен за счет корректировок скорости проезда на блок-участках. При невозможности разрешения конфликта, например, помеха другим поездам, информация о нем будет передана в траекторную подсистему, который за счет изменения маршрутов поездов будет пытаться разрешить конфликт. Если этого будет недостаточно, то конфликт передается на нитевую подсистему. Если же в систему поступает новое требование (новое расписание поезда или требование на проведение ремонтных работ), то оно поступает сразу в нитевую подсистему, поскольку только в ней данное требование может корректно встроиться в сцену планирования, во все необходимые хранилища.

Следует отметить, что обратные связи включаются и в случае, когда план с предыдущего уровня невозможно обеспечить на следующем. Например, нитевая подсистема не учитывает возможные поломки блок-участков на станции (в общем случае такие поломки могут не влиять на пропускную способность станции), пока из траекторной подсистемы не придет сообщение о поломке.

Тогда построение графика поездов в нитевом планировщике будет осуществляться с учетом недоступности части станционных путей.

3. Программная реализация

3.1. Реализационные характеристики

Рассмотрим направление Санкт-Петербург–Москва. Оно представляет собой полигон, состоящий из 5 кругов планирования, за каждый из которых отвечает отдельный диспетчер. На полигоне находятся 48 станций, инфраструктурная сеть полигона состоит, примерно, из 3500 блок-участков. В сутки по полигону проходят более 800 поездов разных типов: грузовые, хозяйственные, пригородные, пассажирские, высокоскоростные.

Среднее время расчета первоначальных траекторий для 800 поездов на всем полигоне составляет менее 5 минут, используемая память менялась в пределах от 0,6 до 0,9 Гбайт. При расчете на 1 кругу управления время составляет менее 1 минуты. Стоит отметить, что расчеты производились на обычном компьютере. При промышленной эксплуатации системы будут использованы мощные вычислительные кластера, что значительно уменьшит скорость расчета.

Время обработки часового окна, перекрывающего нити 15 поездов (поезда находятся в конфликте), составляет в среднем менее 1,5 минут. Обработка сигналов о движении поездов по полигону, при условии локальных конфликтов, менее 10 секунд.

Среди качественных характеристик отметим отсутствие сгущений линий на графике, отсутствие необоснованных выходов на неправильные пути, отсутствие заторов поездов на перегонах, соблюдение интервалов безопасности, почти полное отсутствие опозданий у скоростных и высокоскоростных поездов в конфликтных ситуациях, среднее отставание поездов от расписания менее 9% (при 20 поездах в конфликте).

3.2. Пример разрешения конфликтных ситуаций

Рассмотрим пример обработки системой конфликтных ситуаций и подробно разберем принимаемые планировщиком решения.

На рисунке 6 представлен результат обработки часового окна на перегоне Поварово–Крюково на первом пути.

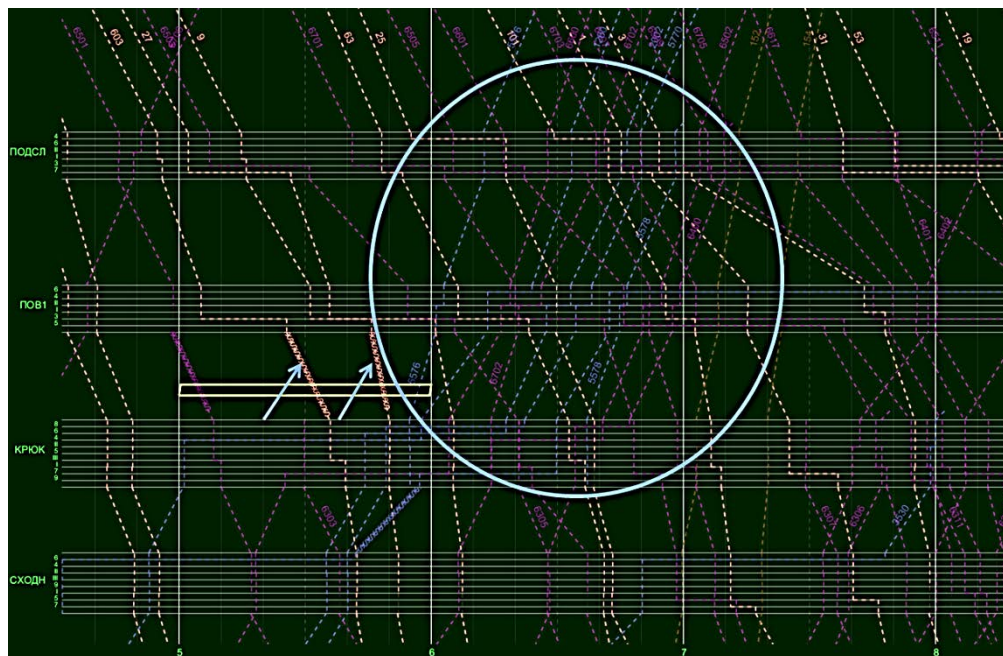


Рис. 6. Объезд часового окна ремонтных работ по «неправильному» пути, возобновление движения после окна.

В результате обработки окна, пассажирские поезда № 603 и № 9, имеющие больший приоритет по отношению к пригородным и грузовым, объезжают окно на перегоне по «неправильному» пути, чтобы не отстать от своего расписания (на рисунке отмечены стрелками). Прерванное движение в четном направлении для пропуска пассажирских поездов восстанавливается после окна (на рисунке отмечено кругом), вследствие чего возрастает интенсивность движения и загрузка станций.

Более детально ситуация после окна представлена на рисунке 7. Здесь мы видим, что пригородный поезд №6701 заранее делает остановку на станциях Подсолнечная и Поварово и пропускает впереди себя сначала пассажирский поезд № 63, а потом поезд № 25. Планировщик заранее останавливает пригородный поезд, потому что объезд окна ремонтных работ пассажирскими поездами по неправильным путям вызвал остановку движения в четном направлении, на станции Крюково скопилось большое число поездов, которые заняли почти все свободные пути. Если бы поезд № 6701 не задержался в Подсолнечной и Поварово, то двигаясь он по расписанию, ему негде было бы встать в Крюково и на перегоне образовался бы затор, который вызвал бы остановку движения и большие опоздания поездов, что недопустимо.



Рис. 7. Остановка пригородного поезда заранее с учетом дальнейшей загруженности станций.

Обработка рассматриваемого окна потребовала задействования обратных связей между компонентами. Из-за большого сгущения линий графика после окончания окна и необходимости выпуска поездов временная подсистема не смогла построить окончательный план, поскольку торможения и разгон поездов нарушали требования безопасности движения. Временная подсистема фиксирует данное несоответствие как конфликт и отправил сообщением в траекторную подсистему, которая, сделав попытку найти решение и потерпев неудачу, отправляет конфликт в нитевую подсистему. Нитевая подсистема для исправления ситуации должна задержать часть поездов на предшествующих станциях, учитывая излишнюю загруженность перегонов. Новое сформированное решение она отправляет в траекторную подсистему, которая строит маршрут и передает его далее временной подсистеме. Временная подсистема, используя полученное измененное решение, строит свое корректное решение.

Отметим, что если бы временная подсистема не смогла бы построить свое решение из-за загрузки станции, то такого рода конфликт мог быть разрешен посредством построения дополнительных объездов в траекторной подсистеме и не потребовал бы изменения времен в нитевой подсистеме.

Сверхзагруженность перегона разрешить без участия нитевой подсистемы не получится, поскольку изменение маршрута с выездом на встречный путь будет стоить гораздо больше, чем изменение времен проследования станций поездами.

4. Заключение

Предлагаемая сетевая система адаптивного управления движением поездов на основе мультиагентных технологий [7] разрабатывалась в рамках создания Единой интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом (ИСУЖТ) [8].

К ожидаемым результатам от использования разработанной системы адаптивного управления движением поездов относятся:

- сокращение времени реакции, увеличение гибкости и оперативности в принятии решений в ответ на непредвиденные события;
- повышение эффективности управления ресурсами железнодорожного транспорта в реальном времени и обеспечение управления движением поездов по расписанию;
- сокращение затрат ручного труда по перепланированию движения поездов;
- создание качественно новой интеллектуальной программной платформы для управления движением в реальном времени.
- Среди дальнейших направлений развития разработанной системы планирования 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.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (13-07-13167 офи_м_РЖД).

Список литературы

1. Матюхин В.Г., Шаров В.А., Шабунин А.Б. Управление железной дорогой онлайн // Пульт управления. 2012. № 1. Режим доступа: <http://pult.gudok.ru/archive/detail.php?ID=420035>
2. 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 сетевцентрического подхода к созданию распределенных интеллектуальных систем управления ресурсами ОАО «РЖД» // Программная инженерия. 2012. № 9. С. 23-28.
3. 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 онтологии для мультиагентной системы управления ресурсами ОАО «РЖД» // Информационные технологии. 2012. №12. С. 42-45.
4. Виттих В.А., Скобелев П.О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном времени // Автометрия. 2009. № 2. С. 78-87.
5. 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.
6. 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
7. 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.
8. Матюхин В.Г., Шабунин А.Б. ИСУЖТ. Концепция и реализация // Труды 1-ой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» ИСУЖТ-2012. Москва, 15-16 ноября 2012 г. С. 15-18.