

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ДИСПЕТЧЕРОМ

С.К. Кузнецов, А.И. Потехин

Рассмотрены основные проблемы в работе железнодорожного диспетчера. Обоснована необходимость разработки умных систем поддержки принятия решений, включающих в себя средства прогнозирования развития ситуации при возникновении задержек в движении поездов или неисправностей объектов железнодорожной сети. Дан обзор некоторых зарубежных систем, в которых реализованы такие средства. Рассмотрены и представлены в виде сетей Петри дискретно-событийные модели объектов железнодорожных сетей (станций, перегонов и др.), модели группового управления движением поездов в целях построения систем автоматики, обеспечивающих безопасное управление движением поездов в режиме реального времени.

Ключевые слова: оперативное управление, железнодорожный транспорт, методы прогнозирования, дискретно-событийная модель, компоненты железнодорожной сети, сети Петри, логическое управление, безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение нагрузки на железнодорожный транспорт и повышение требований к пунктуальности и надежности движения при ограниченных возможностях развития железнодорожной сети требуют все более эффективного использования ресурсов существующей инфраструктуры, чем объясняется растущий интерес к развитию средств поддержки принятия решений диспетчером, обеспечивающих возможности прогнозировать развитие текущей ситуации в режиме реального времени.

При разработке подобных средств важно использовать знания диспетчера и выявить те трудности, с которыми он сталкивается. В то время как расписание движения поездов тщательно планируется на год вперед с помощью сложных математических моделей, повседневная работа диспетчеров (дежурных по станции, поездных диспетчеров) по выполнению план-графика движения поездов при наличии помех и задержек опирается только на определенный свод правил, и на опыт и мастерство самих диспетчеров. Конечно, современные системы диспетчерского контроля и централизации (например, системы «Сетунь», «Диалог» [1]) существенно облегчают труд диспетчеров. Однако при этом отсутствует какая-либо помощь

диспетчеру в виде краткосрочного прогноза по процессу управления движением при наличии временных задержек поездов, неисправностей в инфраструктуре железнодорожной сети, конфликтных ситуаций. Отсутствуют средства оценки эффективности принимаемых решений. Работа в предупредительном режиме практически не поддерживается современными системами, диспетчер работает в режиме разрешения ситуаций по мере их возникновения. Диспетчер располагает полной информацией принятия решений, по какому пути должен пройти поезд, в каком порядке поезда могут использовать путевой ресурс и в какое время, не ранее, поезд может пройти специальные сигналы. Задача оперативного управления осложняется тем, что:

- информация для принятия решений либо опаздывает, либо теряется;
- недостаточная точность в получаемых данных (пространственное положение поездов, их скорости);
- большой объем информации для принятия решений разделен по нескольким системам (региональным и сетевым);
- в сложных ситуациях роль автоматики падает.

В результате при серьезных нарушениях современные системы управления движением не обес-



печивают диспетчера необходимой (адекватной) информацией и средствами эффективного управления движением.

В периоды высокой интенсивности движения поездов (а также в нештатном режиме, в случае аварии) требуется высокая скорость принятия решения. К примеру, в Москве на Ярославском железнодорожном узле в часы пик прибывают и отправляются электропоезда каждые 2 мин. На практике отмечается, что 80 % всех случаев нарушений безопасности движения, так или иначе, связаны с ошибками диспетчеров.

Главное направление современных исследований — автоматизация и интеллектуализация диспетчерского управления движением поездов в железнодорожной сети.

В общем случае оперативное управление железнодорожной системой состоит из двух частей: оперативное планирование движения поездов в условиях разнообразных помех и логическое управление компонентами железнодорожных объектов и движением поездов.

Оперативное планирование необходимо ввиду сильной зависимости между проходящими поездами и большим числом возможных управляющих акций, влиянием разнообразных помех, отклонений и эффект возможных решений диспетчеров. Практически невозможно предсказать и, следовательно, эффективно планировать и управлять движением без помощи специальных систем (систем поддержки принятия решений), причем время реакции таких систем строго ограничено ввиду их работы в реальном времени.

Логическое управление направлено на автоматическую реализацию функций управления компонентами железнодорожных объектов (стрелками, светофорами, сборкой-разборкой маршрутов и др.) а также на реализацию безопасного движения поездов.

В § 1 рассмотрены пионерские зарубежные проекты систем оперативного планирования движения поездов в условиях разнообразных помех в части определения приближающихся конфликтов и нахождения оптимальных решений группового движения поездов путем перепланировки планов движения в режиме реального времени.

В § 2 рассмотрены разработанные на основе единого математического аппарата (сетей Петри) модели компонентов инфраструктуры железнодорожных сетей (стрелок, светофоров, маршрутов, станций, перегонов, переездов), а также модели группового движения поездов в целях построения автоматических систем управления инфраструктурой, обеспечивающих безопасное движение поездов.

1. ПРОЕКТЫ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Диспетчерское управление движением поездов является основным видом управления, оно включает в себя:

- оперативный контроль выполнения графика движения и формирования поездов;
- принятие решений по управлению движением поездов (при отклонении от графика).

Во многих научных центрах мира ведутся широкие исследования по проблеме автоматизации управления движением поездов, по созданию систем оперативного планирования движения поездов. Например, как будет показано, выяснилось, что наиболее востребованной оказалась *задача прогнозирования* приближающихся конфликтов, а также задача нахождения оптимальных решений группового движения поездов путем перепланировки планов движения поездов, изменения в режиме реального времени маршрутов, параметров движения поездов. Далее рассмотрены первые зарубежные проекты, в которых рассматриваются задачи прогнозирования конфликтов и нахождения оптимальных решений группового движения поездов [2–8].

В работах [2, 3] описан проект системы, реализующий новые стратегии управления (Uppsala University, Швеция).

В проекте реализуются стратегии:

- управление посредством оперативной перепланировки планов движения каждого поезда в режиме реального времени;
- отделение процесса принятия решений диспетчером от реализации выполнения этих решений средствами автоматики;
- интеграция информации — вся необходимая для принятия решения информация в едином графическом интерфейсе;
- визуализация информации, необходимой для принятия решения, т. е. визуализация потенциальных конфликтов с окнами для перепланировки маршрутов.

После включения в графический интерфейс интегрированной информации для принятия решения о перепланировке в большинстве случаев стало возможным автоматическое выполнение выбранного плана движения каждого поезда. В результате была создана новая парадигма управления движением поездами — управление движением поездов путем перепланировки в реальном времени. Диспетчер получил возможность с опережением обнаруживать возможные конфликты и нарушения, изменять план каждого поезда для получения оптимального плана движения и автома-

тически этот план реализовывать. Таким образом, процесс логического управления инфраструктурой был совмещен с процессом планирования движения.

Кроме того, наиболее полно и подробно изложены требования к автоматической реализации выбранного плана движения каждого поезда:

- автоматическим функциям запрещено изменять порядок, в котором поезда могут использовать определенный путевой ресурс;

- автоматические функции никогда не выполнят план, содержащий конфликты;

- если в соответствии с планом движения определенный поезд будет следующим в использовании определенного путевого ресурса, автоматические функции заранее тестируют маршрут поезда установкой стрелок в нужные позиции — это делается с целью как можно раньше обнаружить потенциальные проблемы инфраструктуры;

- конечное резервирование планируемого маршрута поезда выполняется как можно позже, но с таким расчетом, чтобы не вынуждать поезд задерживаться; резервирование маршрута зависит от позиции поезда и его скорости, цель — оставить максимально возможное время для перепланировки.

В настоящее время Swedish National Rail Administration планирует создание системы оперативного управления движения поездов на базе полученных результатов.

В работе [4] описана автоматизированная система поддержки принятия решений диспетчерами ROMA (Railway traffic Optimization by Means of Alternative graphs — оптимизация железнодорожного движения с помощью альтернативных графов). Разработаны алгоритмы перепланировки по оптимизации движения при наличии помех. Система ROMA позволяет оценивать перспективу и эффективность различных решений на период до 15 мин. Она позволяет диспетчеру вносить поправки в заданное расписание, чтобы адаптировать его к появляющимся нарушениям (таким как опоздания поездов или блокировка участка железнодорожного пути, путевой стрелки).

Задача определения маршрутов поездов и порядка следования рассматривается как задача распределения ресурсов с дополнительными ограничениями. Для ее решения используется альтернативный граф, в вершине которого для каждой пары конфликтующих поездов (претендующих на одну секцию железнодорожного пути) добавляется пара альтернативных ребер. В каждой паре может быть выбрано только одно ребро, при этом второе ребро убирается. Полный перебор конфликтных ситуаций соответствует случаю, когда из каждой пары альтернативных ребер выбрано одно, тем самым определяется порядок следования поездов в каждой точке конфликта.



Рис. 1. Структура системы ROMA

Таким образом, минимизация отклонения от заданного расписания достигается с помощью метода ограниченного перебора, итеративного согласования маршрутов и порядка следования поездов (в рамках разрешенного времени вычисления).

Структура системы ROMA изображена на рис. 1. Модуль загрузки данных загружает всю необходимую для других блоков информацию: статическую (состояние инфраструктуры, расписание) и динамическую (позиции и характеристики поездов). В любой момент времени маршрут (последовательность блок-участков) доступен, если не блокирован ни один из его блок-участков. Для каждой пары (поезд, участок пути) вычисляется время блокировки на основе текущих характеристик движущихся поездов и состояния инфраструктуры.

После загрузки данных модуль восстановления проверяет наличие заблокированных зон в сети, которые делают недоступными некоторые маршруты. Данный модуль используется для определения приемлемого маршрута для каждого поезда на базе оценки выстроенных по приоритету дополнительных вариантов. В случае, если такого маршрута не находится, система обращается за внешней поддержкой диспетчера, которому необходимо будет установить новые маршруты либо отменить некоторые поезда.

После того как определены приемлемые маршруты для всех поездов, процедура выявления конфликтов (модуль оптимизации) определяет

потенциальные конфликты, рассматривая одновременно все поезда. Потенциальные конфликты определяются прогнозом положения поездов на основе информации о текущем состоянии железнодорожной сети. Поскольку поезд проходит участки маршрута последовательно, маршрут моделируется в альтернативном графе посредством цепочки приоритетных ограничений. Так как на одном стандартном участке железнодорожного пути (блок-участке) не может находиться одновременно больше одного поезда, потенциальный конфликт имеет место, когда два или более поездов требуют один и тот же ресурс. В таком случае необходимо определить порядок следования поездов, что моделируется в альтернативном графе добавлением в него подходящей пары альтернативных дуг для каждой пары поездов, проходящих по блок-участку. Бесконфликтное расписание получается путем выбора одной из альтернативных дуг из каждой пары таким образом, чтобы в графе не было ситуации дедлока.

По нашему мнению, основное достоинство альтернативного графа — это уровень детализации модели. Такой граф включает в себя описание топологии небольшой железнодорожной сети на уровне железнодорожных сигналов и операционных правил. Более того, он может легко включать в себя другие ограничения, присущие железнодорожной практике, такие как минимальное время посадки, гибкие времена прибытия/отправления на остановках по расписанию.

В работе [5] (Delft University of Technology, Department of Transport and Planning, Нидерланды) предложена концепция системы управления железнодорожным движением на базе модели-прогноза (MPC — model-predictive control). Предлагаемая система должна обеспечивать тесную связь между заданным расписанием и реальным движением поездов. Это достигается путем постоянного контроля позиций поездов и состояния инфраструктуры железнодорожной сети. Свойство системы предвидеть состояние модели движения позволяет диспетчеру видеть влияние возникающих задержек и оценивать эффект предложенных решений (система с обратной связью). Так на базе аналого-дискретной модели объекта делается предположение о значениях на выходе системы на определенном отрезке времени (вычисления осуществляются с помощью Max-Plus алгебры [8]). Предположение может инициироваться либо по заданному интервалу времени, либо по наступлению каких-либо событий. Выходы системы, предсказанные моделью процесса (на базе полученных данных телеметрии на определенный отрезок времени), сравниваются с заданной траекторией и дальше определяются управляющие сигналы, ко-

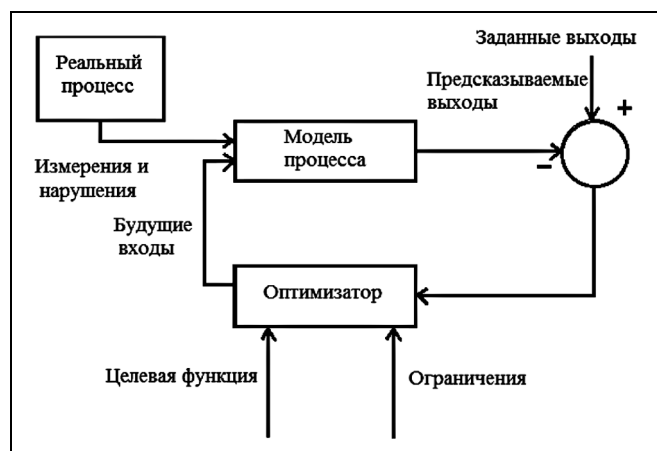


Рис. 2. Функциональная структура MPC-системы

торые направляют систему к желаемой траектории. Затем снова используется модель процесса для оценки эффективности предложенных управляющих сигналов. Выходом модели служит вектор задержек всех поездов.

Таким образом, минимизируется отклонение системы от заданной траектории (аналог классической схемы регулирования). После получения оптимальной управляющей последовательности только новый входной вектор подается на систему и повторяется полный цикл уже для измененной ситуации. Это позволяет реализовать изменение плана движения поездов при появлении нарушений.

Функциональная структура MPC-системы изображена на рис. 2. В соответствии с предложенным подходом в качестве сигналов обратной связи используется информация о текущих положениях поездов и состоянии инфраструктуры, которые затем служат входами для модели MPC в реальном времени. Выходом модели является вектор задержек всех поездов на указанной глубине прогноза.

Структуру MPC-системы управления железнодорожным движением можно представить как композицию ее трех частей (рис. 3):

- средства мониторинга позиций поездов, скоростей, состояния инфраструктуры, в результате которого формируется оценка движения поездов по времени;
- модель MPC, постоянно обновляющаяся в соответствии с текущими данными и действиями диспетчера;
- контроллер MPC, оптимизирующий будущие управляющие решения путем прогнозирования будущего состояния и учета текущего состояния инфраструктуры.

Средства прогнозирования на микроуровне способны точно моделировать процессы движения

на основе детального моделирования инфраструктуры, сигнализации, характеристик подвижного состава, динамики движения и заданного расписания. Однако применение таких средств на больших фрагментах сети приводит к длительным вычислениям, недопустимым в реальном времени.

Поэтому в данном проекте большую железнодорожную сеть предлагается рассматривать в виде иерархической многоуровневой структуры и соответственно систему управления движением (рис. 4). Число уровней и границы управления по уровням могут варьироваться, но в основном системы управления разбиваются на два уровня — тактический и оперативный. Тактический уровень (региональный или сетевой диспетчер) охватывает управление движением на сетевом уровне, обнаружение отклонений от расписания и разрешение конфликтных ситуаций, влияющих на пропускную способность всей сети. Оперативный уровень — уро-

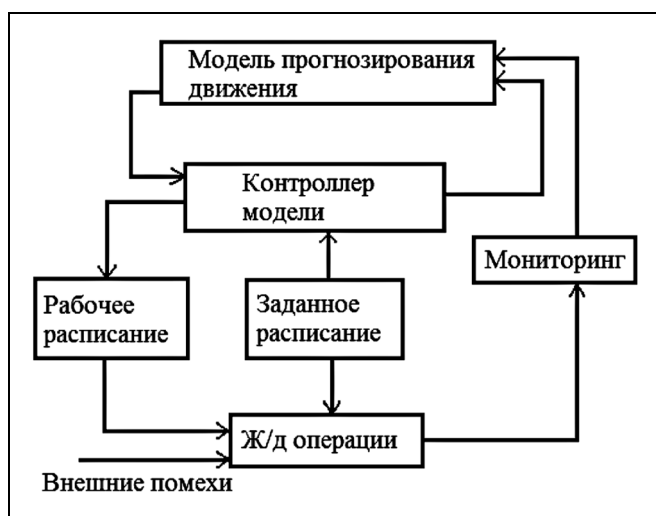


Рис. 3. Структура MPC-системы управления железнодорожным движением

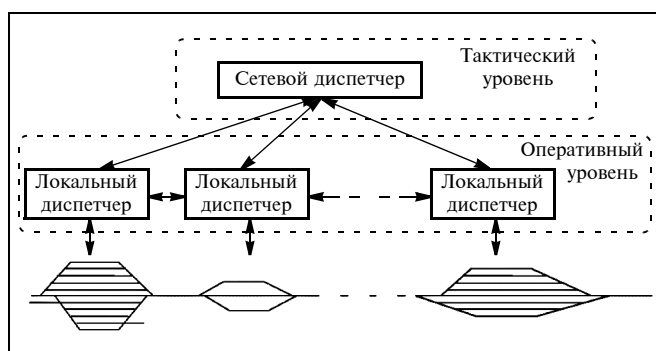


Рис. 4. Иерархическая структура управления движением поездов

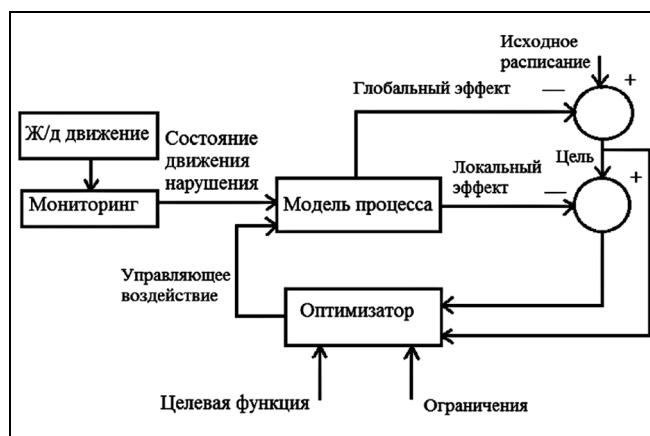


Рис. 5. Система MPC в виде каскадной системы управления

вень локальных диспетчеров станций. Здесь решаются задачи обеспечения безопасности движения, определяются маршруты поездов. Однако в результате такого разделения диспетчер каждого уровня не владеет всей необходимой информацией для принятия оптимальных решений. Сетевой диспетчер не отслеживает и не может управлять движением поездов и инфраструктурой на нижнем уровне (блок-участка, выбор пути на станции), а локальный диспетчер не имеет информации о движении поездов за границей своего участка.

Текущее расписание представляется как адаптированное заданное расписание на сетевом уровне и как модифицированное расписание событий на микроуровне в зависимости от уровня управляющего воздействия.

При управлении железнодорожным движением сетевого уровня на базе MPC управление и оптимизация интегрированы, скоординированы и организованы в форму дополнительной обратной связи. С точки зрения теории управления это соответствует каскадной системе управления с двумя петлями обратной связи на разных уровнях иерархии (рис. 5).

Задачи модели-прогноза зависят от той обратной связи, которая их инициирует. Так, по внешней связи должен предсказываться эффект больших нарушений и оцениваться управляющие действия на глобальном уровне, которому соответствует макроуровень. По внутренней связи должна учитываться точная топология сети, детализированные процессы и управляющие решения на микроуровне.

Рассмотренные модели управления железнодорожным движением позволяют каждому диспетчеру прогнозировать развитие событий, предвидеть влияние текущих задержек и оценивать результаты предложенных решений.



2. ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНЫЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СЕТЕЙ

2.1. Постановка задачи

Железнодорожные системы отличаются детерминированностью, асинхронностью, управлением по событиям, параллельностью. Железнодорожная сеть представляется совокупностью железнодорожных станций, соединенных между собой перегонами с разъездами (вставками). Наличие автоматических блокировок в современных железнодорожных сетях позволяет каждый перегон и станцию представить в виде совокупности электрически изолированных участков («блок-участков»), светофоров, электрически изолированных стрелочных секций с соответствующими дискретными датчиками состояния. Это обстоятельство позволяет перейти от традиционных непрерывных моделей компонентов железнодорожных сетей к их логическим моделям.

Логическое моделирование широко применяется в проектировании дискретных (и не только) систем. Теоретический базис логического моделирования составляют математическая логика, теория конечных автоматов, теория логического синтеза, теория формальных языков, теория графов и другие разделы дискретной математики [9]. Дальнейшее развитие логическое моделирование получило в теории дискретно-событийных систем (ДСС- или ДС-моделирование) [10–12]. Отличительная особенность ДС-моделирования заключается в рассмотрении дискретной системы как триплета $\langle G, K, S \rangle$: модели объекта G , ограничения на его поведение — спецификации K и супервизора S . Основная задача ДСС: по дискретно-событийным моделям объектов и заданным ограничениям на их функционирование построить управляющий компонент (супервизор), обеспечивающий поведение объектов в соответствии с заданными ограничениями. Две основные трудности в практическом применении ДСС-моделирования: одна из них заключается в большой размерности автоматной модели объекта управления G ; другая — в мультипликативном росте сложности методов синтеза управляющего автомата (супервизора).

В рассматриваемых далее работах дискретно-событийные модели железнодорожных объектов, а также модели группового движения поездов, модели обеспечения безопасности строятся на основе сетей Петри [13–23]. Графическое представление железнодорожных сетей с помощью сети Петри позволяет привлекать к работе железнодорожных экспертов, не являющихся экспертами в математических дисциплинах. Сети Петри обладают

точной математической семантикой, что позволяет достаточно просто интерпретировать поведение железнодорожной сети. Сети Петри хорошо подходят к реальной параллельности движения поездов в железнодорожных сетях: блок-участки представляются позициями, управляемые переходы реализуют условия движения поездов. Поезда моделируются метками (фишками) в позициях. Сеть Петри в виде текущей разметки всегда точно определяет состояние железнодорожной сети, положение поездов. Методы анализа сетей Петри определяют возможные конфликтные ситуации. Модели железнодорожной станции, перегона и других крупных объектов железнодорожной сети не требуют декартового произведения моделей их компонентов, изображенных в виде сетей Петри (в отличие от автоматных моделей).

Общая модель железнодорожной сети в виде сети Петри (сеть типа позиция/переход) может развиваться, как будет показано далее, в более сложные формы. Так, добавляя шкалу времени, получают сети Петри с таймером (СПВ), добавляя вероятности событий, получают стохастические сети Петри. Если метки в сети Петри нагружены дополнительной спецификацией и они должны различаться, одним из вариантов такого развития служат сети Петри с раскраской. Для построения управляющей логики применяют сети Петри с ограничивающими (блокирующими) дугами.

Основные задачи при создании моделей на основе сети Петри:

- описание реальной системы;
- имитация поведения реальной системы посредством моделирования различных ситуаций, которые в реальной системе не так просто воспроизвести;
- анализ поведения системы на наличие блокировок (дедлоков).

2.2. Примеры дискретно-событийного моделирования объектов железнодорожных сетей

Железнодорожные сети включают множественные композиции одних и тех же компонентов (блок-участки, стрелки, светофоры и др.). Для этих компонентов строятся модели на основе сети Петри (СП-модели). Набор таких моделей образует библиотеку компонентов. В рассматриваемых далее работах (работах раннего периода применения сетей Петри, 2006–2010 гг.) основное внимание уделено построению СП-моделей базовых компонентов железнодорожных сетей, а также разным способам их композиции для представления сложных сетей. Однако механизмами управления этими моделями в литературе уделено существенно меньше внимания.

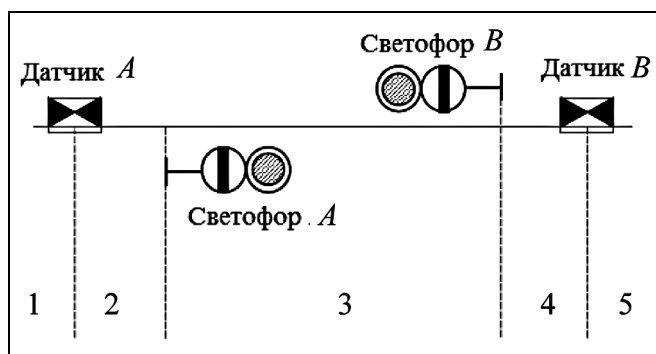


Рис. 6. Схема участка пути

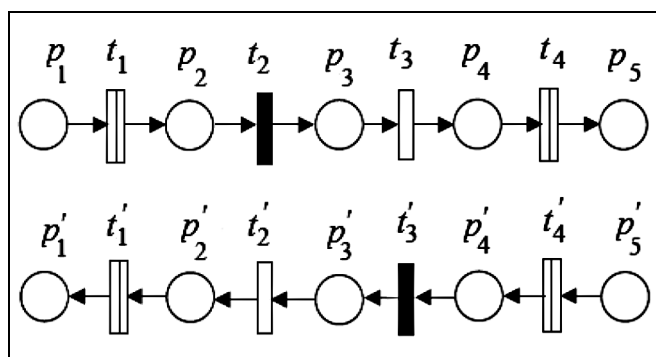


Рис. 7. СП-модель участка пути

В работе [13] рассмотрена задача моделирования железнодорожных объектов сетями Петри таким образом, чтобы можно было применить теорию супервизорного управления дискретно-событийной системой для автоматического проектирования системного контроллера.

Для этого вначале предлагается построить модель объекта, разработать соответствующую управляющую логику, чтобы удовлетворить набору ограничений для обеспечения безопасности движения поездов и живучести (отсутствие блокировок).

В настоящей работе рассмотрены две основные модели: на нижнем уровне разработана детальная модель для решения проблемы безопасности, на следующем уровне разработана более абстрактная модель для решения проблемы живучести.

Рассмотрим пример построения детальных моделей нижнего уровня (участка пути, станции, стрелки). На рис. 6 представлен участок пути, который можно разделить на пять сегментов.

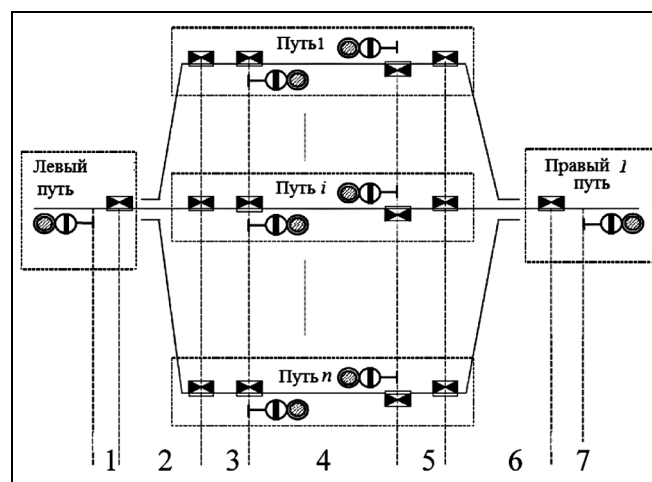
Датчики А и В обнаруживают прохождение поезда безотносительно его направлению. Светофор А может остановить поезд, идущий влево (из сегмента 3 в сегмент 2). Аналогично для светофора В (переход из сегмента 3 в сегмент 4).

На рис. 7 изображена СП-модель этого участка пути. Каждая пара вершин (позиций) p_i и p'_i представляют сегмент i : наличие метки в вершине $p_i(p'_i)$ означает наличие поезда в сегменте i , движущегося вправо (влево).

Переходы t_1, \dots, t_4 (t'_1, \dots, t'_4) представляют переход поезда, движущегося вправо (влево) из одного сегмента в другой. Предполагается, что когда датчик А обнаруживает поезд, движущийся вправо, метка помещается в вершину (позицию) p_1 . При этом переходы могут быть (не)управляемыми и/или (не)наблюдаемыми, например, переход t'_2 соответствует светофору А, он является и наблюдаемым, и управляемым, поскольку переход поезда в сегмент 2 при движении влево может быть запрещен сигналом светофора. Аналогично: переход t_3 соответствует светофору В, поскольку переход поезда в сегмент 4 при движении вправо может быть запрещен сигналом этого светофора. Наблюдаемые, но не управляемые переходы представляют датчики.

Данная модель может представлять два случая.

- Однопутный участок, по которому поезда движутся в двух направлениях. Вершины p_i и p'_i представляют один сегмент пути. Очевидно, две эти вершины могут содержать не больше одной метки и не могут быть отмечены одновременно — это должно обеспечиваться соответствующей управляющей логикой.
- Двухпутный участок, по каждому пути поезда движутся только в одном направлении. В этом случае вершины p_i и p'_i соответствуют параллельным сегментам. Вершины могут содержать не больше одной метки и могут быть отмечены одновременно.


Рис. 8. Схема станции с n путями

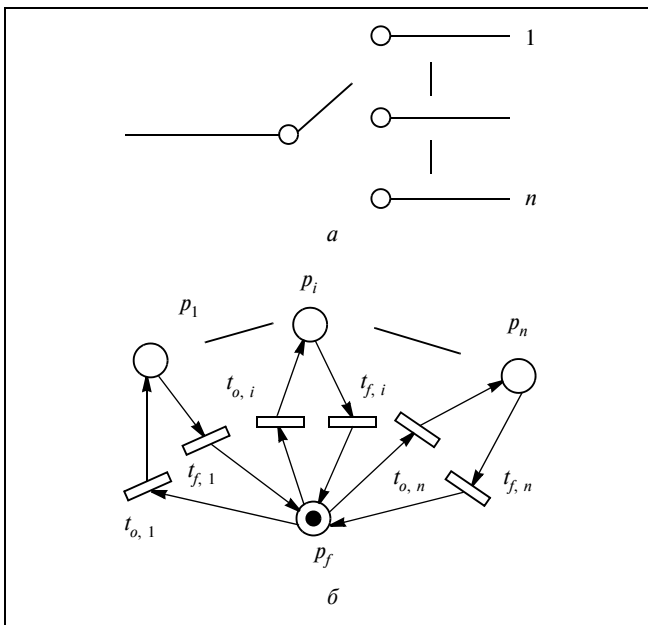


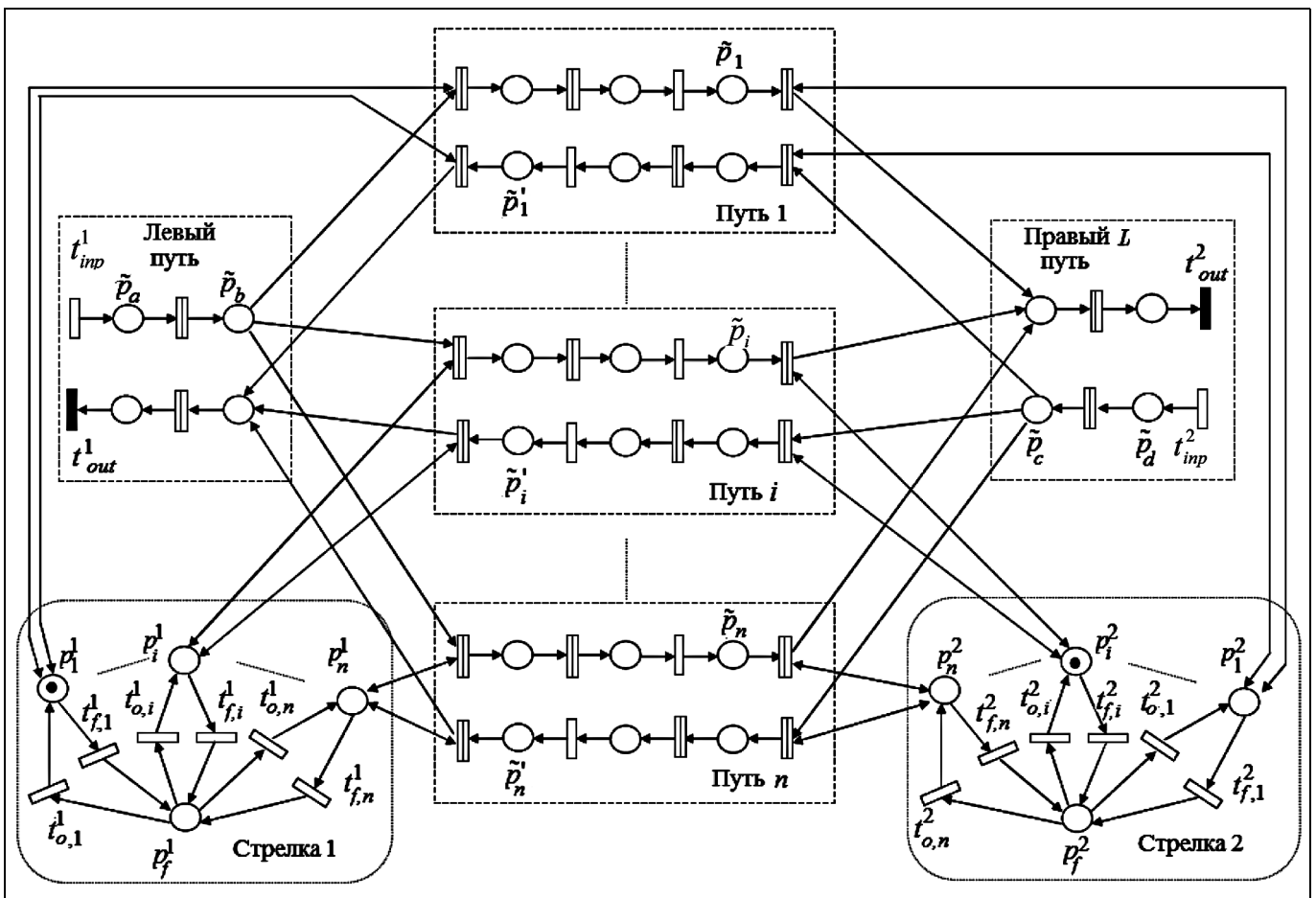
Рис. 9. Схема стрелки (а) и ее СП-модель (б)

Модель станции представляет собой n внутренних путей и два входо-выходных пути. На схеме (рис. 8) можно выделить 7 сегментов: 1- и 7-й сегменты представляют входо-выходные пути, 2- и 6-й — пути, управляемые стрелками.

На рис. 9 приведены схема и СП-модель стрелки. Стрелка имеет $n + 1$ вершину и $2n$ переходов. Когда отмечена вершина p_i , $i = 1, n$, поезд может быть направлен на i -й путь. Если отмечена вершина p_f , то поезд не может пройти стрелку. Это означает, что либо изменяется маршрут, либо стрелка в режиме обслуживания.

На рис. 10 приведена СП-модель станции. Двойные стрелки использованы для обозначения петель. Две подсети справа и слева внизу моделируют стрелки.

В той же работе [13] рассмотрены вопросы построения супервизора железнодорожной сети, задача которого — обеспечение ее безопасности и живучести. Предложен метод автоматического синтеза контроллеров (супервизоров) для сетей вершина/переход с (не)управляемыми и (не)наблю-

Рис. 10. СП-модель станции с n путями

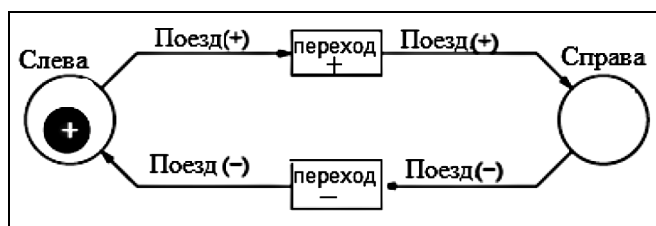


Рис. 11. СП-модель блок-участка

даемыми переходами, гарантирующий движение двух поездов по сети в одном или противоположных направлениях без столкновений и блокировок (дедлоков).

Привлекательная особенность изложенного в работе [13] подхода заключается в том, что проблема управления в целом может быть разбита на определенное число подзадач, что делает предложенную процедуру управления подходящей даже для задач большой размерности.

Однако рассмотренные СП-модели являются примерами абстракции. Они имеют понятное, но мало реалистичное поведение. Так, например, в реальности светофоры располагаются на концах участка. Движение поезда от одного участка к другому моделируется перемещением одной метки по сети Петри, но поезд при движении некоторое время может занимать оба участка.

В работах [14, 15] предложен компонентный подход: строятся СП-модели компонентов железнодорожных сетей (путей, блок-участков, стрелки). СП-модели железнодорожных сетей включают разнообразные композиции из этих моделей.

На рис. 11 изображена СП-модель блок-участка.

Позиции *Слева* и *Справа* представляют левую и правую границы блок-участка. Переход перемещает метку поезда между позициями в зависимости от направления движения поезда.

На рис. 12 изображена СП-модель железнодорожной сети, состоящей из двух блок-участков с объединенными левыми позициями (рис. 12, а) и СП-модели стрелки (рис. 12, б).

Светофоры позиций *Вверх* и *Вниз* поддерживают путь в соответствии с положением стрелки. Устройство выбора направления может управляться путем размещения метки светофора в позицию *Изменить*, после чего возможен переход *Установить вверх* или *Установить вниз*.

На рис. 12 возможен только один переход — верхний *переход+*. Если срабатывает этот переход, метка поезда забирается из позиции *Слева*, а метка светофора — из позиции *Вверх*. Далее, метка поезда добавляется в позицию *Справа вверх*, а метка светофора — в позицию *Вверх*. Это моделирует проезд поезда по стрелке на левый путь.

Модели на рис. 11 и 12 рассматриваются как модели базовых элементарных компонентов железнодорожной сети. Поезду указывается направление, но не задается маршрут. Одна из общих проблем в железнодорожной системе — возможность прохождения поездом стрелки в неверном направлении. На рис. 12 такая ситуация может возникнуть, если метка поезда в позиции *Справа* и поезд движется влево в направлении позиции *Слева*.

Для более реалистичного поведения требуется уточнение базовых сетей. Каждая позиция блок-участка отмечена меткой «нет поезда». Метка поезда может попасть в позицию блок-участка, если только в этой позиции есть метка «нет поезда».

Важным фактором при моделировании является время. В данных работах ([14, 15]) компонентам сопоставляются постоянные задержки, т. е. всем поездам требуется одинаковое время на преодоление одинаковых участков пути. Это упрощение реальной системы, но все же это важный шаг к уточнению поведения модели.

Поезда, проходящие через этот компонент, получают задержку в одну единицу модельного времени. Метка «нет поезда» также получит такую же задержку. Это означает, что позиция, из которой вы-

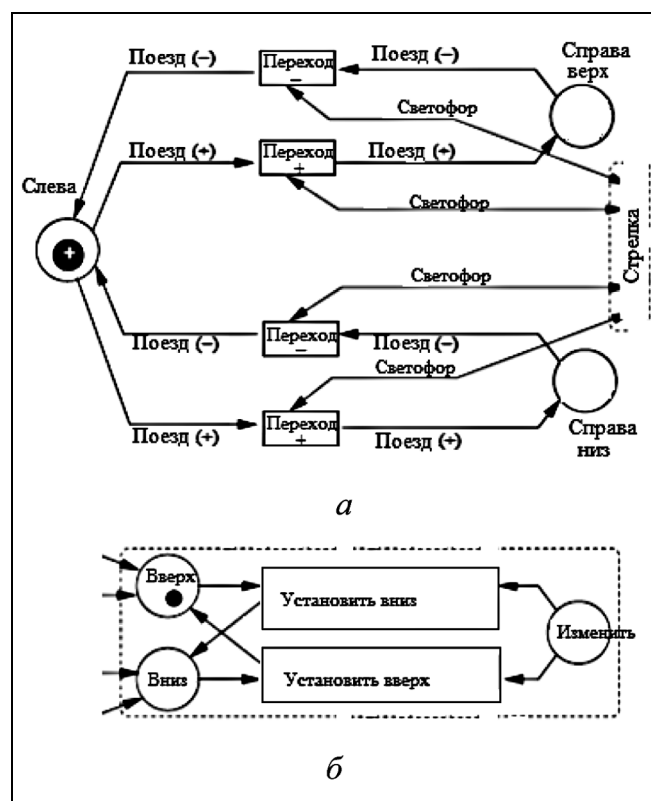


Рис. 12. СП-модель железнодорожной сети, состоящей из двух блок-участков с объединенными левыми позициями (а) и СП-модель стрелки (б)

шел поезд, будет занята до тех пор, пока поезд не достигнет другой позиции.

Набор таких компонентов образует библиотеку компонентов. Библиотека отображает определенные свойства системы типа безопасности, обнаружения коллизий, управления стрелками, контроль времени. Композиция базовых компонентов может формировать более крупные сети. При моделировании метка поезда содержит список элементов, реализующих его маршрут, в соответствии с которым устанавливаются нужные стрелки (или переход блокируется, если какой-либо элемент уже занят другим маршрутом).

В работе [16] для моделирования железнодорожных сетей предложено использовать автоматные сети Петри, которые представляют собой расширение сетей Петри (расширение заключается во введении запрещающих дуг). Железнодорожный путь разбивается на электрически изолированные участки. Каждый участок представляется вершиной (в том числе и стрелки). Полученный граф, отображающий топологию железнодорожного пути, дополняется управляющими вершинами, реализующими систему блокировок. Именно от этих вершин проводятся разрешающие или запрещающие линии к переходам между вершинами, представляющими железнодорожные участки. В зависимости от маркировки управляющих вершин и требуемого маршрута поезда устанавливаются необходимые стрелки и сигналы. Размещение меток в управляющих вершинах в работе не рассматривается. Автоматные СП позволяют с достаточной степенью достоверности моделировать движение поездов в железнодорожной сети и управление сигнальной системой.

В работе [17] рассмотрена проблема получения формальной спецификации (текстов) на разработку модели. Написание формальных спецификаций на базе текстовых описаний является важнейшей и одновременно сложной задачей. Предложен метод ее решения — получение алгебраической спецификации, которая затем адаптируется к сети Петри. Показано, как можно применить такой метод для получения модульных сетей Петри с раскраской.

В качестве примера рассмотрим железнодорожную сеть с 12-ю блок-секциями ($B1 — B12$), соединенными четырьмя стрелками (рис. 13). Стрелками указаны направления, по которым поезда могут проходить стрелки. По всем блок-участкам разрешено движение в обоих направлениях. Железнодорожная сеть подключена к компьютеру через последовательный порт, что позволяет считывать состояния датчиков и посылать команды поездам через блок-участки и на стрелки.

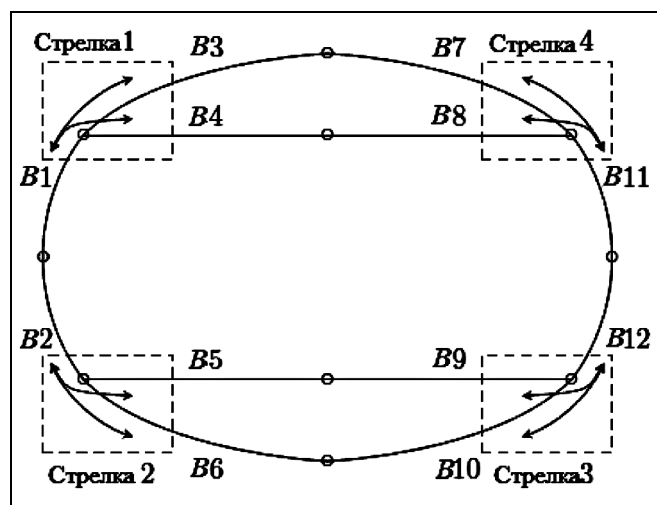


Рис. 13. Пример железнодорожной сети

На границах каждого блок-участка установлены датчики для обнаружения прихода или ухода поезда. Команда на поезд может означать остановку или движение вперед или назад с определенной скоростью. В сети одновременно могут двигаться несколько поездов, при этом не должно быть столкновений. Движение должно быть постоянным и без вмешательства человека, т. е. движение поездов адаптируется к локальным условиям, а не следует заданным маршрутам.

Исходным заданием служит текстовое описание, которое разбивается на отдельные фразы по определенным категориям в зависимости от типа получаемой информации. Информация от датчика определяет состояние, в то время как команда определяет событие. Пример вербальных фраз, связанных с движением и позицией поездов:

- поезда могут проходить стрелки;
- движение по блок-участкам разрешено в обоих направлениях;
- поезд может начать обратное движение, если он не может двигаться вперед;
- команды, посылаемые на поезд, требуют либо остановки, либо движения в одном из направлений.

На следующем этапе определяются списки событий, типов данных, модулей. Для каждого события определяется предсостояние для его возникновения (*precondition*) и постсостояние после того, как оно произошло (*postcondition*).

Затем определяются свойства событий. Например, событие *changeTrackSec*: поезд *tr* движется из блок-секции *ts1* в блок-секцию *ts2*.

Предсостояние: эти секции должны быть соединены (вводится новый указатель события *connected*), секция *ts2* должна быть свободной, поезд

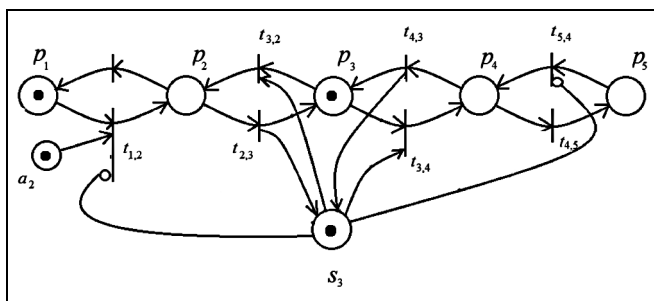


Рис. 14. Объединенная сеть Петри сегмента и супервизора безопасности

должен находиться на секции $ts1$, направление движения поезда (td) от секции $ts1$ к секции $ts2$. Это приводит к уже формальному выражению:

$$(connected\ ts1,\ ts2,\ td) \wedge (direction\ (tr = td \wedge trainPresent\ (ts1) = tr) \wedge (trainPresent\ (ts2) = none)).$$

В конечном итоге получается список модулей с определенными интерфейсами и набором свойств, состояний и событий. На основе этого списка формируется сеть Петри с раскраской. Состояния и события соответствуют вершинам и переходам. Разработан подход с точными правилами построения модульной сети Петри с раскраской из текстового описания системы.

Заметим, что в то время как применение сетей Петри становится все проще с появлением новых средств разработки, очень мало работ посвящено методам разработки спецификаций для проектирования сети Петри.

В работе [18] сети Петри применены для моделирования переезда железнодорожных путей. Шлагбаум, автодорожный и железнодорожный сигналы — три основных физических компонента переезда. Сети Петри с таймером использованы для отображения временной сущности сигнальной системы. Сети Петри с таймером были введены для преодоления временных ограничений сети Петри. В СПВ метка в вершине считается живой только в пределах интервала $[t_{min}, t_{max}]$. По истечении времени t_{max} метка считается мертвой. Таким образом, для того, чтобы переход был возможен, присутствие требуемого числа меток в каждой из входных его вершин должно быть гарантировано в интервале $[t_{min}, t_{max}]$. После момента t_{max} все метки во входных вершинах будут деактивированы.

Построены модели СПВ для шлагбаума, дорожного и железнодорожного сигналов (красный, зеленый). Управляющий блок обеспечивает управление физическими компонентами таким обра-

зом, чтобы железнодорожное движение было непрерывным и не возникало опасных ситуаций. Сети Петри с таймером помогают в анализе условий безопасности, определении потенциально опасных ситуаций.

Рассмотрены нечеткая сетевая модель сети Петри для оценки задержек поезда [19], задача моделирования железнодорожных сетей с использованием цветных сетей Петри [20], задача моделирования надежности железнодорожных перевозок в случае сбоев [21] и др.

В работах [22, 23] разработаны СП-модели основных элементов участка железной дороги: перегона с разъездом, блок-участка, стрелки, а также модели движения поездов. Групповое управление моделями при параллельно-конвейерном движении поездов осуществляется специально разработанными управляющими компонентами (супервизорами), обеспечивающими требования безопасности движения.

В работе [22] предложено строить несколько иерархически зависимых уровней моделирования.

На верхнем уровне с помощью сети Петри строится модель перегона с разъездом железнодорожной сети по его структурной схеме. Основное назначение этого уровня — наблюдать за движением поездов по перегону и контролировать соответствие заданным маршрутам, рассчитывать временные параметры движения поездов и др.

На среднем уровне проектируется супервизор в виде сети Петри с блокирующими (ограничивающими) дугами, обеспечивающий заданную зону безопасности, состоящую из одного или двух свободных блок-участков между двумя соседними поездами. Рассмотрим пример. На рис. 14 показан участок пути — сегмент, состоящий из нескольких последовательно соединенных блок-участков (позиции $p_1 — p_5$). Позиции p_1 и p_3 содержат метки, отражающие нахождение поездов в соответствующих блок-участках. Супервизор состоит из позиции s и выходящих из нее блокирующих дуг, одна из которых запрещает перемещение метки из позиции p_1 в позицию p_2 . Тем самым обеспечивается зона безопасности, состоящая из одного свободного блок-участка между поездами.

На нижнем уровне (микроуровне) моделирования определяется связь СП-моделей блок-участков, стрелок, светофоров с соответствующими датчиками и управляющими командами диспетчера, тем самым обеспечивается связь между состояниями моделей нижнего уровня и состояниями физических объектов.

Здесь впервые предпринята попытка построения СП-модели участка пути с учетом длины поезда. Рассмотрим это более подробно.

На рис. 15 изображена маркированная сеть Петри, моделирующая перемещение поезда с первого блок-участка (позиция p_1) на второй блок-участок (позиция p_2). Позиции s_1^o , s_2^c — управляющие позиции перехода t . Наличие метки в позиции s_1^o означает, что первый блок — участок свободен (*open*), наличие метки в позиции s_2^c означает, что второй блок — участок занят (*close*). При наличии меток в обеих управляющих позициях происходит событие — запуск перехода t и (по правилам функционирования сети Петри) происходит удаление метки из позиции p_1 и помещение метки в позицию p_2 .

Такое функционирование сети Петри не соответствует реальной картине передвижения поезда с одного блок-участка на другой, так как существует интервал времени, в течение которого поезд находится на обоих блок-участках. Таким образом, в данном случае имеет место событие (переход), длительность которого отлична от нуля (так называемое непримитивное событие). Непримитивное событие моделируется сетью Петри, показанной на рис. 16, где метка в позиции $p_{1,2}$ соответствует нахождению поезда на обоих блок — участках.

Другой вариант сети Петри, моделирующей данный процесс, показан на рис. 17.

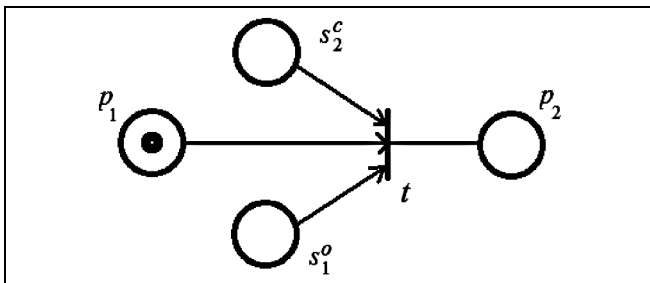


Рис. 15. Сеть Петри, моделирующая перемещение поезда с первого блок-участка на второй

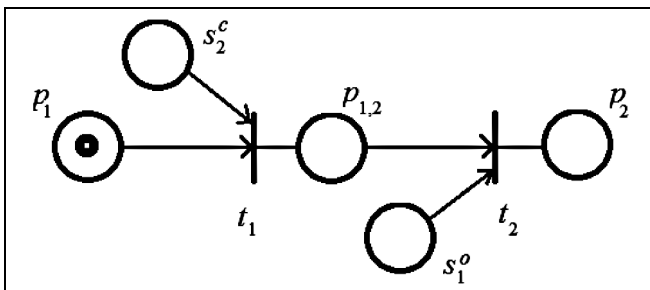


Рис. 16. Сеть Петри, моделирующая перемещение поезда с помощью непримитивного события

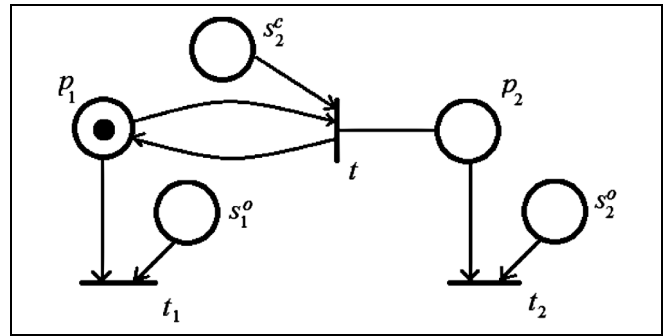


Рис. 17. Сеть Петри, моделирующая движение «длинного» поезда

Запуск перехода t помещает метку в позицию p_2 , это означает, что голова поезда находится на втором блок-участке. Одновременно сохраняется метка в позиции p_1 (конец поезда находится на первом блок-участке). Появления метки в позиции s_1^o (поезд покинул первый блок-участок) приводит к запуску перехода t_1 , в результате чего метка удаляется из позиции p_1 . Такая модель движения поезда соответствует реальному процессу. Однако это приводит к усложнению моделей движения поездов и управляющей логики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОоды

В заключение краткого рассмотрения работ, посвященных проектам систем оперативного планирования движения поездов и методам моделирования на основе сетей Петри компонентов железнодорожных сетей сделаем некоторые выводы.

- Рассмотренные системы прогнозирования и нахождения оптимальных решений группового движения поездов можно считать интеллектуальными — они, как минимум:
 - определяют (предвидят) возможные конфликтные ситуации;
 - находят близкие к оптимальным решения группового движения поездов; в основном изменяют планы движения каждого поезда в режиме реального времени;
 - отделяют процесс принятия решений диспетчером от выполнения этих решений средствами автоматики.
- В результате работы систем формируются в том или ином виде множество маршрутов, последовательности движения поездов, параметры движения (скорости, остановки).
- Методы прогнозирования и нахождения оптимальных решений группового движения поездов должны обеспечивать точное вычисление параметров движения на основе детального мо-

делирования инфраструктуры, сигнализации, характеристик подвижного состава, динамики движения и заданного расписания.

- В условиях увеличения объемов данных, их неопределенности, роста количества неструктурированной информации и воздействия внешней среды требуется выполнение большого объема вычислений, порой недопустимого в реальном времени; поэтому эти вычисления осуществляются как методами дискретной математики, так и на основе законов нечеткой алгебры, правил Мах-Плюс-алгебры и др.
- На основе теории сетей Петри разработаны модели основных компонентов инфраструктуры железнодорожных сетей (участков путей, стрелок, станций, перегонов, переездов и др.) в целях построения автоматических систем управления инфраструктурой железнодорожной сети, обеспечивающих безопасное движение поездов в режиме реального времени.

Модели движения поездов в большинстве работ имеют понятное, но мало реалистичное поведение. Так, движение поезда от одного участка к другому моделируется перемещением только одной метки по сети Петри, в то время как поезд при движении некоторое время может занимать оба участка. Кроме того, недостаточное внимание уделяется проектированию управляющей логики, синхронизации супервизоров при групповом движении поездов.

Авторы признательны д-ру техн. наук О.П. Кузнецову, конструктивная и доброжелательная критика которого способствовала улучшению статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Д.Ю. Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом. — М.: Маршрут, 2005. — 760 с.
2. Isaksson-Lutteman G. Future train traffic control. Development and deployment of new principles and systems in train traffic control. — Uppsala, Uppsala University, 2012. — URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:504962/FULLTEXT05.pdf> (дата обращения: 11.11.2017).
3. Kauppi A., Wikström J., Sandblad B., Andersson A. Future train traffic control: control by re-planning // Cognition, Technology & Work. — 2006. — Vol. 8, N 1. — P. 50–56.
4. D'Ariano A., Corman F., Hansen I.A. Railway traffic optimization by advanced scheduling and rerouting algorithms. — Delft: Delft University of Technology, 2010. — URL: http://uic.org/cdrom/2008/11_wcrr2008/pdf/O.1.4.2.3.pdf (дата обращения: 23.10.2017).
5. Kecman P., Goverde R.M.P., Van den Boom, Ton J.J. A model-predictive control framework for railway traffic Management // Computers in Railways XII. — 2010. — Vol. 114.
6. Kecman P., Goverde R.M.P. (2014): Online Data-Driven Adaptive Prediction of Train Event Times // IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems. — 2015. — Vol. 16, iss. 1. — P. 465–474.

7. Kecman P. Models for Predictive Railway Traffic Management Management — Delft University of Technology, 2014. — 190 p.
8. Goverde R. Railway Timetable Stability Analysis Using Max-Plus System Theory // Transportation Research Part B. — 2007. — Vol. 41, N 2. — P. 179–201.
9. Кузнецов О.П. Дискретная математика для инженера. — СПб.: Лань, 2009. — 400 с.
10. Cassandras C.G., Lafortune S. Introduction to discrete event systems. — Springer, 2008. — 772 p.
11. Амбарцумян А.А. Моделирование и синтез супервизорного управления на сетях Петри для рассредоточенных объектов // Автоматика и телемеханика. — 2011. — Ч. 1. — № 8. — С. 151–169; Ч. 2. — № 9. — С. 173–189.
12. Амбарцумян А.А. Потехин А.И. Групповое управление в дискретно-событийных системах // Проблемы управления. — 2012. — № 5. — С. 46–53.
13. Giua A., Seatzu C. Modeling and supervisory control of railway networks using Petri nets // IEEE Trans. on Automation Science and Engineering. — 2008. — Vol. 5, N 3. — P. 431–445.
14. Björk J., Hagalisletto A.M., Enger P. Large Scale Simulations of Railroad Nets // Proc. of the Fourth International Workshop on Modelling of Objects, Components and Agents, MOCA'06. — Bericht 272, FBI-HH-B-272/06. — June 2006. — P. 45–101.
15. Hagalisletto A.M., Björk J., Yu I.C., Enger P. Large Scale Simulations and Refining Large-Scale Railway Models Represented by Petri Nets // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part C. — 2007. — Vol. 37, N 4. — P. 444–460.
16. The Application of Automation Theory to Railway Signalization Systems: The Case of Turkish National Railway Signalization Project / M.T. Söylemez, M.S. Durmuş, U. Yıldırım, et al. // Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28 — September 2, 2011.
17. Choppy C., Laure Petrucci L., Gianna Reggio G. A Modelling Approach with Coloured Petri Nets // 13th International Conference on Reliable Software Technologies / ADA-Europe, Venice, Italy. 2008. — Vol. 5026 of Lecture Notes in Computer Science, Springer, P. 73–86.
18. Hajra P., Dasgupta R. Modelling of a Multi-Track Railway Level Crossing System Using Timed Petri Net // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. — 2012. — Vol. 6, N 11. — P. 1427–1432. — URL: <http://scholar.waset.org/1307-6892/11608> (дата обращения: 11.11.2017).
19. Milinkovic S., Mrkovic M., Veskovic S. A fuzzy petri net model to estimate train delays // Simulation, Modelling, Practice and Theory. — 2013. — Vol. 33. — P. 144–157.
20. Vanit-Anunchai S. Modelling Railway Interlocking Tables Using Coloured Petri Nets. — URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01054630/document> (дата обращения: 14.11.2017).
21. Fecarotti C., Andrews J., Remenyte-Prescott R. Modeling railway service reliability in the event of failures // Safety and Reliability of Complex Engineered Systems: 25th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2015; Zurich; Swaziland; 7 September 2015 — 10 September 2015. P. 1539–1545.
22. Потехин А.И., Браништов С.А., Кузнецов С.К. Дискретно-событийные модели железнодорожной сети // Проблемы управления. — 2014. — № 1. — С. 74–81.
23. Кузнецов С.К., Потехин А.И. Применение сетей Петри для моделирования железнодорожных систем (обзор) // Тр. XII Всерос. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014) / ИПУ РАН. — М., 2014. — С. 4937–4946.

Статья представлена к публикации членом редколлегии О.П. Кузнецовым.

Кузнецов Сергей Константинович — науч. сотрудник,
✉ skuznetsov@bk.ru,

Потехин Анатолий Иванович — канд. техн. наук,
вед. науч. сотрудник, ✉ arot@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.