



2016

# ТРУДЫ

пятой научно-технической конференции  
с международным участием

**Интеллектуальные системы управления  
на железнодорожном транспорте.**

**Компьютерное и математическое  
моделирование**

**(ИСУЖТ)**

17-18 ноября 2016 г.  
МОСКВА



НИИАС

Суворов Д.В. САПР-документация как основа для создания систем управления реального времени.....	125
Ковалев К.Е., Тимченко В.С. Имитационная модель оценки длительностей занятия приемо-отправочных путей технической станции.....	128
Сидоренко В.Г., Чжо М.А. Применение теории графов при автоматизации управления движением поездов метрополитена.....	131
Андрашитов Д.С., Костоготов А.А., Лященко З.В., Лазаренко С.В., Пугачев И.В. Регуляризованный алгоритм параметрической идентификации адаптивных динамических систем.....	135
Антонова В.М., Кузнецов Н.А., Волков Д.О. Концепция прогнозирования пассажироперевозок для проектируемых транспортных систем.....	137

**СЕКЦИЯ №2****УПРАВЛЕНИЕ ИНФРАСТРУКТУРОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Розенберг И.Н., Дулин С.К. Об онтологическом статусе визуализируемых геоданных.....	139
Бутакова М.А., Верескун В.Д., Гуда А.Н. Управление процессами обеспечения безопасности на основе оценки рисков, связанных с программным обеспечением интеллектуальных систем на железнодорожном транспорте.....	144
Замышляев А.М., Шубинский И.Б., Игнатов А.Н., Кан Ю.С., Кибзун А.И., Платонов Е.Н. Применение системы МАЛС для снижения вероятности бокового столкновения на железнодорожных станциях.....	148
Симкин А.В. Метеомониторинг, как подсистема ИТС для управления безопасностью на железнодорожном транспорте.....	151
Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Серый пространственный анализ транспортных ситуаций.....	156
Талалаев В.И. Микропроцессорные системы управления движением, информационные технологии в содержании объектов инфраструктуры.....	166
Ковалев С.М., Ковалев В.С., Суханов А.В. Интеллектуальный подход к прогнозированию нештатных ситуаций в процессе расформирования поездов на сортировочных горках.....	168
Лябах Н.Н., Гибнер Я.М. Разработка интеллектуальной системы мониторинга технического состояния устройств и объектов сортировки составов и автомата советчика по их техническому обслуживанию.....	173
Уманский В.И., Дулин С.К., Якушев Д.А. Автоматизированные дистанционные методы распознавания протяженных инфраструктурных объектов системой мобильного лазерного сканирования.....	176

Абраменко А.А., Каркищенко А.Н. Детекция границ инфраструктурных объектов в задаче сегментации лазерных данных.....	180
Бородин А.Ф., Щепанов С.Л., Щепанов А.Л., Уколов Ю.А. Автоматизация нормирования и организации работы вагонных парков оператора подвижного состава.....	184
Бородин А.Ф., Залуцкий М.И., Панин Е.В., Кондальцев И.С. Автоматизация мониторинга и анализа влияния избыточных вагонных парков на эффективность и результативность работы сети ОАО «РЖД».....	188
Щепанов С.Л., Щепанов А.Л., Рубцов Д.В., Пояркова М.А. Подсистема «Разработка и ведение Плана формирования грузовых поездов и маршрутов» (АСОВ-ПФ) – ядро Автоматизированной системы организации вагонопотоков.....	192
Капунов К.А., Панин Е.В., Панин В.В., Сушенцева Л.Б., Смирнов А.Е., Кондальцев И.С. Программное обеспечение ведения технологии взаимодействия железнодорожных путей необщего пользования и станций примыкания.....	195
Соколов А.Ю., Кириллова С.Ю., Панин Е.В. Развитие и применение автоматизированной системы «Паспорт наличной пропускной способности железных дорог ОАО «РЖД».....	198
Левашев С.П. Распознавание объектов на основе сравнения структур кусочно-линейных аппроксимаций.....	202
Чернов А.В., Карташов О.О. Методы облачных вычислений и технологий для интерактивных, интеллектуальных объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.....	206
Бажукова Е.А., Плетнев А.О., Чурсин Ю.А. Разработка прибора измерения геометрических параметров рельс.....	209
Ляной В.В. О повышении надежности работы индуктивных датчиков регистрации прохода колеса железнодорожных подвижных единиц.....	213
Цуриков А.Н. Структура информационной системы оповещения о чрезвычайных ситуациях на железнодорожном транспорте.....	218
Искаков Т.А. Имитационное моделирование функционального моделирования транспортного узла.....	221
Адамец Д.Ю. Моделирование бизнес процессов в задачах управления на железнодорожном транспорте.....	225
Ковалев В.С., Пушкарев Е.А. Перспективы развития интеллектуальных функций блока управления клапанами горочного поста управления замедлителями.....	229
Шабельников А.Н., Ольгейзер И.А. Анализ учета погодных и климатических условий функционирования в сортировочных системах КСАУ СП и MSR 32: теоретические аспекты разработки и практические результаты функционирования.....	231
Шабельников А.Н. Стратегия и инструментарий интеллектуализации сортировочных процессов в КСАУ СП.....	234
Несенюк Т.А. Эксплуатационный аэромобильный контроль воздушной линии электропередачи.....	238
Козлов П.А., Колокольников В.С., Пермикин В.Ю. Структурно-функциональное исследование систем железнодорожного транспорта.....	240

Сидоренко В.Г., Чжо М.А., МГУПС (МИИТ) Императора Николая II, г. Москва

## Применение теории графов при автоматизации управления движением поездов метрополитена

При решении задач автоматизации управления транспортными системами графовые модели применяются для решения широкого круга задач:

- моделирования топологии транспортной системы;
- формализованного описания технологических процессов, протекающих в системе;
- разработки алгоритмов управления, реализуемых средствами автоматизации;
- решения задач оптимального управления.

В данной работе авторы приводят результаты, полученные в области автоматизации управления движением поездов метрополитена на кафедре «Управление и защита информации» (УиЗИ) Московского государственного университета путей сообщения императора Николая II (МГУПС (МИИТ)).

Основой для разработки широкого класса средств автоматизации управления движением поездов метрополитена является комплексная модель линии метрополитена. Она используется:

- в тренажере поездного диспетчера линии метрополитена [1];
- автоматизированной системе оперативного диспетчерского управления движением поездов [2];
- автоматизированной системе энергооптимальных тяговых расчетов [3] [4];
- автоматизированной системе построения плановых графиков движения пассажирских поездов [5];
- автоматизированной системе оценки эффективности использования рекуперативного торможения на электроподвижном составе метрополитена и накопителей энергии [3] [6].

При построении графа, описывающего топологию линии метрополитена, используется несколько видов вершин, соответствующих следующим объектам линии метрополитена:

- тупикам – смежные с одним ребром;
- краям платформы станций – смежные с двумя ребрами;
- изолирующим стыкам между рельсовыми цепями – смежные с двумя ребрами;
- стрелкам – смежные с тремя ребрами.

Связывающие вершины ребра объединяются в пути, описывающие пути реальной линии метрополитена. Построенная графовая модель линии метрополитена позволяет моделировать движение поездов по главным и станционным путям в различных направле-

ниях в соответствии с плановым графиком движения или командами поездного диспетчера.

Для описания технологических процессов и алгоритмов управления используется дискретно-событийное моделирование. Распространенными способами такого моделирования являются сети Петри и нотации бизнес-моделирования, которые вместе со схемами алгоритмов являются разновидностью графовых моделей.

В ходе работ, выполненных на кафедре «Управление и защита информации» построены графовые модели процессов:

- реализуемых в тренажере поездного диспетчера линии метрополитена;
- входящих в жизненный цикл графика оборота электроподвижного состава и планового графика движения пассажирских поездов;
- протекающих при управлении движением поездов в соответствии с плановым графиком движения или командами поездного диспетчера;
- являющихся основой функционирования системы маршрутно-релейной централизации линии метрополитена и систем обеспечения безопасности движения.

Выбор той или иной формализации определяется задачами, для решения которых описание процесса используется.

При решении задач управления графовые модели используются для иллюстрации работы дискретного варианта динамического программирования Беллмана, аналогичных или построенных на его основе методов решения оптимизационных задач. С их использованием в рамках работ по автоматизации управления движением поездов метрополитена решены следующие задачи:

- выбора энергооптимальных режимов ведения поездов по перегонам метрополитена;
- оптимального по быстродействию восстановления движения поездов по плановому графику после ликвидации причин возникновения больших сбоев;
- построения рационального по критерию равномерности назначения осмотров сценария технического обслуживания электроподвижного состава;
- автоматического определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов на линии метрополитена.

Рассмотрим подробнее решение последней задачи, включающее три этапа:

- получение графа, отражающего информацию о взаимном расположении указателей ночной расстановки составов и стрелочных переводов на путях станции;
- удаление из графа вершин, соответствующих стрелочным переводам;
- непосредственно получение искомого дерева одним из двух способов:
  - ♦ о построение дерева;
  - ♦ о уплотнение графа с последующим разворачиванием «уплотненного» графа в дерево, позволяющее значительно сократить объем хранимой информации.

После окончания пассажирского движения составы могут находиться в депо или на главных и станционных путях линии у указателей ночной расстановки. В данной работе под указателем ночной расстановки понимается кортеж, компоненты которого содержат следующую информацию:

- наименование и местоположение на путях линии указателя, около которого должна находиться голова состава, назначенного на ночевку в данной географической точке;
- условия (возможность использования при заданном типе расстановки и интервалы времени, когда указатель может использоваться) и результаты использования указателя при построении ПГД (связи с другими объектами ПГД);
- способы графического представления факта использования указателя в ПГД.

Расположение указателей ночной расстановки зависит от топологии линии. Порядок заполнения указателей является функцией местоположения указателей и требований к интервалу времени, когда они должны быть заполнены. Требования к порядку освобождения указателей утром могут отличаться от требований к порядку их заполнения вечером [7].

Схема организации ночной расстановки составов на станции является исходной информацией для построения графа, отражающего информацию о взаимном расположении указателей ночной расстановки составов и стрелочных переводов на путях станции.

На рисунке 1 представлен граф для двухстрелочной станции. Граф раскрашен в три цвета:

- желтый цвет используется для раскрашивания вершин, соответствующих указателям;
- белый цвет используется для раскрашивания вершины, соответствующей началу освобождения указателей или завершению заполнения указателей. Первыми освобождаются или последними заполняются указатели, которым соответствуют вершины, смежные с белой, т.е. соединенные с ней ребром.

В зависимости от того, какое действие выполняется (освобождение или заполнение указателей и в каком направлении) меняется местоположение белой вершины на графе. Вершине белого цвета в построенном дереве будет соответствовать исток.

- зеленый цвет используется для раскрашивания вершин, соответствующих стрелочным переводам. Рассматриваемый граф является смешанным, содержащим как ориентированные, так и неориентированные ребра в зависимости от их положения относительно зеленых вершин:
  - ребро направленное и его концом является зеленая вершина, если оно подходит к зеленой вершине в шерстном направлении (движение по стрелочному переводу в направлении от крестовины к его остриякам);
  - ребро ненаправленное во всех остальных случаях.

В исходном графе каждому стрелочному переводу соответствует своя зеленая вершина, которой инцидентны как минимум три ребра: одно неориентированное или ориентированное, началом которого является эта зеленая вершина, и два ориентированных, концом которых является эта зеленая вершина. Количество ребер, инцидентных зеленой вершине, т.е. соединяющих её с другими вершинами, может превышать три, если ей смежны другие зеленые вершины. Двум зеленым вершинам инциденты два кратных, т.е. инцидентных одной и той же паре вершин, ребра, направленные в противоположных направлениях.

Первым действием при формировании порядка выполнения указателей ночной расстановки составов на линии является удаление из графа вершин, соответствующих стрелочным переводам, реализующие следующие действия.

Анализируются пары смежных вершин, одна из которых желтая, а другая – зеленая, инцидентные единственному ребру. Все зеленые вершины, и ребра инцидентные им, неориентированные или ориентированные, для которых зеленая вершина была началом, удаляются из графа. Вместе с каждой зеленой вершиной удаляется одно ребро. Остальные инцидентные зеленой вершине ребра становятся инцидентными той желтой вершине, с которой удаленная зеленая была связана удаленным ребром. Алгоритм повторяется до тех пор, пока из графа не будут удалены все зеленые вершины. После этого все кратные ребра заменяются единственным неориентированным.

После удаления из графа вершин, соответствующих стрелочным переводам, возможен выбор одного из двух действий, позволяющих получить искомым древовидный граф:

- построение дерева;
- уплотнение графа с последующим разворачиванием «уплотненного» графа в дерево.

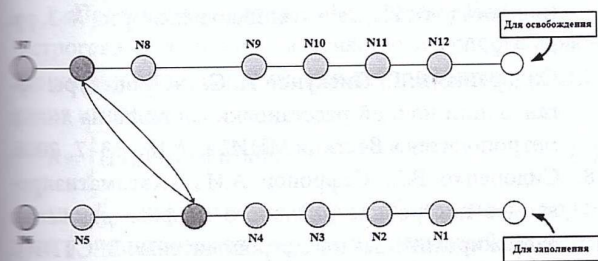
**Таблица 1.**  
**Преимущества и недостатки результатов преобразования графов расположения указателей ночной расстановки составов после удаления вершин, соответствующих стрелочным переводам**

Способ преобразования	Преимущества	Недостатки	Отличительные черты множества вершин	Отличительные черты множества ребер
Построение дерева	Информация не требует дополнительной обработки при ее использовании в сценариях построения ПГД	Объемное представление информации	Каждой вершине уплотненного графа, имеющей разные пути, приведшие к ней от истока, соответствует отдельная вершина дерева	У каждой вершины дерева есть только одно входящее ребро, соответствующее единственному возможному пути от истока к вершине, и множество исходящих ребер, соответствующих всем ветвлениям пути
Уплотнение графа	Сжатое представление информации	Необходимость дополнительной обработки информации при ее использовании в сценариях построения ПГД	Все вершины дерева, соответствующие одной вершине исходного графа, заменяются одной вершиной уплотненного графа	Все кратные одинаково направленные ребра дерева заменяются одним ребром уплотненного графа с тем же направлением

У результатов исполнения каждого из этих действий есть свои преимущества и недостатки, представленные в Таблице 1.

На Рисунке 2 представлен «уплотненный» граф, полученный на основе информации, визуализированной на Рисунке 1.

Параметры исходных и уплотненных графов, а также деревьев, соответствующих разным типам станций, приведены в Таблице 2.



**Рис. 1.** Граф, полученный по схеме расположения указателей ночной расстановки для конечной двухстрелочной станции

Исходные графы являются разреженными. Для всех четырех типов станций мощность множества ребер гораздо меньше квадрата мощности множества вершин.

Мощность множества вершин «уплотненного» графа совпадает с мощностью множества вершин исходного графа. Мощность множества ребер «уплотненного» графа превышает мощность множества ребер исходного графа в 3-5 раз.

Мощность множества вершин дерева превышает мощность множества его ребер на единицу. Каждая третья или четвертая вершина является стоком дерева. Мощность множества вершин дерева растёт с увеличением количества стрелочных переводов на станции. При переходе от двух стрелочных переводов к трем или четырем мощности множеств, описывающих деревья, увеличиваются на порядок, а при переходе к шести стрелочным переводам – еще в 30 раз. Длина всех возможных путей от истока к стоку в построенных деревьях одна и та же, она меньше мощности множества вершин исходного графа на единицу.

**Таблица 2.**  
**Параметры исходных и уплотненных графов, а также деревьев, соответствующих разным типам станций**

Типы станций	Исходный граф		Мощность множества ребер «уплотненного» графа	Дерево	
	Мощность множества ребер	Мощность множества вершин		Мощность множества ребер дерева	Мощность множества стоков дерева
2 стрелки	11	12	35	121	28
3 стрелки	12	13	52	1141	360
4 стрелки	12	12	50	1349	420
6 стрелок	14	14	82	35953	12600

Таким образом, результаты, приведенные в Таблице 2, иллюстрируют преимущество использования алгоритма уплотнения графа с последующим разворачиванием «уплотненного» графа в дерево по сравнению с прямым построением дерева.

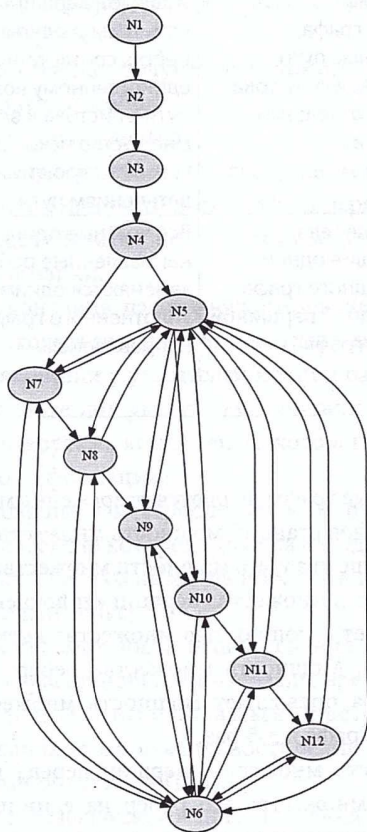


Рис. 2. «Уплотненный» граф, полученный для конечной двухстрелочной станции

Представленные в статье алгоритмы реализованы авторами в программном обеспечении автоматизированной системы «АРМ Графиста – 2.0», которая является развитием внедренной в 2004 году на Московском метрополитене автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена (АСП ПГД ППМ, «АРМ Графиста»), разработанной на кафедре «УиЗИ» МГУПС (МИИТ) [8].

## Литература

1. Баранов Л.А., Сидоренко В.Г., «Тренажер поездных диспетчеров линий Московского метрополитена», Железные дороги мира, № 8, pp. 64-69, 2002.
2. Баранов Л. А., Балакина Е. П., Ерофеев Е. В., Сидоренко В. Г., «Многофункциональные модели систем управления», Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. № 2, p. 079–082, 2012.
3. Баранов Л.А., Гаев Д.В., Ершов А.В., Гречишников В.А., Шевлюгин М.В., «Внедрение энергосберегающих технологий», Мир транспорта, т. 31, № 3, pp. 3-8, 2010.
4. Баранов Л.А., Васильева М.А., Ершов А.В., Максимов В.М., Мелёшин И.С., «Автоматизированная система выбора энергооптимальных режимов управления движением поезда метрополитена», Вестник МИИТа. –М.:МИИТ, № 19, pp. 3-10, 2008.
5. Сидоренко В.Г., Сафронов А.И., «Влияние планового графика движения пассажирских поездов метрополитена на режим работы системы тягового электроснабжения», Электроника и электрооборудование транспорта М: НПО ТЭЗ, № 1, pp. 10-13, 2014.
6. Баранов Л.А., Бестемьянов П.Ф., Сидоренко В.Г., Щербина Е.Г., «Метод оценки изменения электромагнитной обстановки в местах функционирования систем интервального регулирования движения поездов», Наука и техника транспорта, № 3, pp. 35-41, 2013.
7. Сидоренко В. Г., Пискунов А. С., «Процедуры организации ночной расстановки составов на линии метрополитен», Вестник МИИТа, № 18, p. 3–7., 2008.
8. Сидоренко В.Г., Сафронов А.И., «Автоматизированное построение планового графика движения пассажирских поездов метрополитена», Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, № 2, pp. 99-104, 2012.
9. Джереми Сик, Лай-Кван Ли, Эндрю Ламсдэйн, C++ Boost graph library, СПб: Питер, 2006.