

# ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ СКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТА ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ

**СИДОРЕНКО Валентина Геннадьевна**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры<sup>1</sup>;  
e-mail: valenfalk@mail.ru

**КОПЫЛОВА Екатерина Витальевна**, д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры<sup>2</sup>;  
e-mail: miit.kopylova@yandex.ru

**САФРОНОВ Антон Игоревич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры<sup>1</sup>; e-mail: safronov-ai@mail.ru  
**ТУМАНОВ Михаил Андреевич**, ст. преподаватель<sup>2</sup>; e-mail: miit.tumanov@yandex.ru

<sup>1</sup> Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Управление и защита информации», Москва

<sup>2</sup> Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», Москва

В статье проанализирован технологический процесс организации перевозочного процесса и управления им в различных системах скоростного транспорта городских агломераций. Представлено обобщение технологических схем организации перевозочного процесса при составлении нормативных документов-графиков: движения поездов, оборота подвижного состава, работы локомотивных бригад. Выявлены общие черты, позволяющие переносить положительный опыт автоматизации и цифровизации из одних транспортных систем в другие. В качестве типового примера для скоростного транспорта городских агломераций рассмотрена работа Московского центрального кольца в нотации диаграмм потоков данных. Показано, что условия планирования движения на Московском центральном кольце аналогичны действующим для кольцевых линий метрополитена. В качестве обобщающих понятий выступают: смешанность, непараллельность, зональность, неавтономность. Приведены соответствующие иллюстративные примеры. Накопленный опыт в области автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций рассмотрен на примерах железнодорожного участка Нижний Новгород — Урень, а также Калужско-Рижской линии Московского метрополитена (электродепо «Калужское» и «Свиблово»). В статье описано множество исходных данных для построения графика движения поездов, сформулирована цель его построения, выявлены ограничения, отражающие связи между объектами, внутри множества выделенных ресурсов и ограничения, определяемые правилами обслуживания пассажиров. Проведенный в статье анализ показал перспективные направления развития автоматизированных транспортных систем на основе накопленных баз знаний. В результате применения комплексного подхода к решению задач автоматизированного управления при использовании технологий искусственного интеллекта и больших данных планируется повышение эффективности использования множества выделенных ресурсов, процента выполнения графика движения поездов и др.; сокращение количества ошибок передачи информации, а также возникающих в результате влияния негативного человеческого фактора и др.

**Ключевые слова:** скоростной транспорт; городская агломерация; график движения поездов; график оборота; график работы локомотивных бригад; оперативное управление; обучение персонала; тренажер; база данных; база знаний.

**DOI:** 10.20295/2412-9186-2023-9-01-33-48

## ▼ Введение

Современный скоростной транспорт городских агломераций представляет собой комбинацию участков пригородного железнодорожного транспорта, линий метрополитена и скоростного трамвая, каждый из которых в определенной мере автономен, отличается инфраструктурой, подвижным составом, динамикой пассажиропотока и интервалов движения транспортных средств, но все они находятся в тесной связи

между собой. Поддержание высокой интенсивности движения, обеспечение безопасности движения транспортных средств рассматриваемых систем, соблюдение правил комфортного обслуживания пассажиров и эффективное использование производственных ресурсов базируются на комплексном подходе к решению задач планирования и управления перевозочным процессом, которое невозможно и неэффективно без применения интеллектуальных

информационных технологий [1]. Решение задач автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций уже показало свою важность при рационализации использования имеющихся, часто ограниченных, производственных ресурсов и реализации концепции бережливого производства, что дает прекрасные перспективы для дальнейшего развития этих технологий.

Примером скоростного транспорта городских агломераций может служить транспортный комплекс Москвы, который включает в себя пригородный железнодорожный транспорт в черте города и его ближайших «спутников» (Московские центральные диаметры (МЦД) и Московское центральное кольцо (МЦК)) [1], Московскую монорельсовую транспортную систему [2], метрополитен [1] и скоростной трамвай [3].

Целью статьи является определение перспективных направлений автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций на базе анализа накопленного опыта, выявления общих и отличительных черт каждой из транспортных систем из рассматриваемого множества и определения прототипов существующего программного обеспечения, обладающих наибольшим потенциалом для расширения функционала и области применения.

В ходе исследований, проведенных авторами статьи, построена диаграмма потоков данных, привязанная к организационной структуре системы управления перевозочным процессом на МЦК, которая выступает как типовой пример скоростного транспорта городских агломераций (рис. 1). Перевозочный процесс при поддержке всех дирекций ОАО «РЖД» реализуют региональные подразделения Центральной дирекции управления движением — филиала ОАО «РЖД» (ЦД) и Дирекции скоростного сообщения — филиала ОАО «РЖД» (ДОСС), функционирующие в рамках Московской железной дороги (МЖД), Московская дирекция управления движением (МДУД) и Московская дирекция скоростного сообщения (МДОСС). Задание на перевозочный процесс формирует Департамент транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры города (Департамент транспорта города)

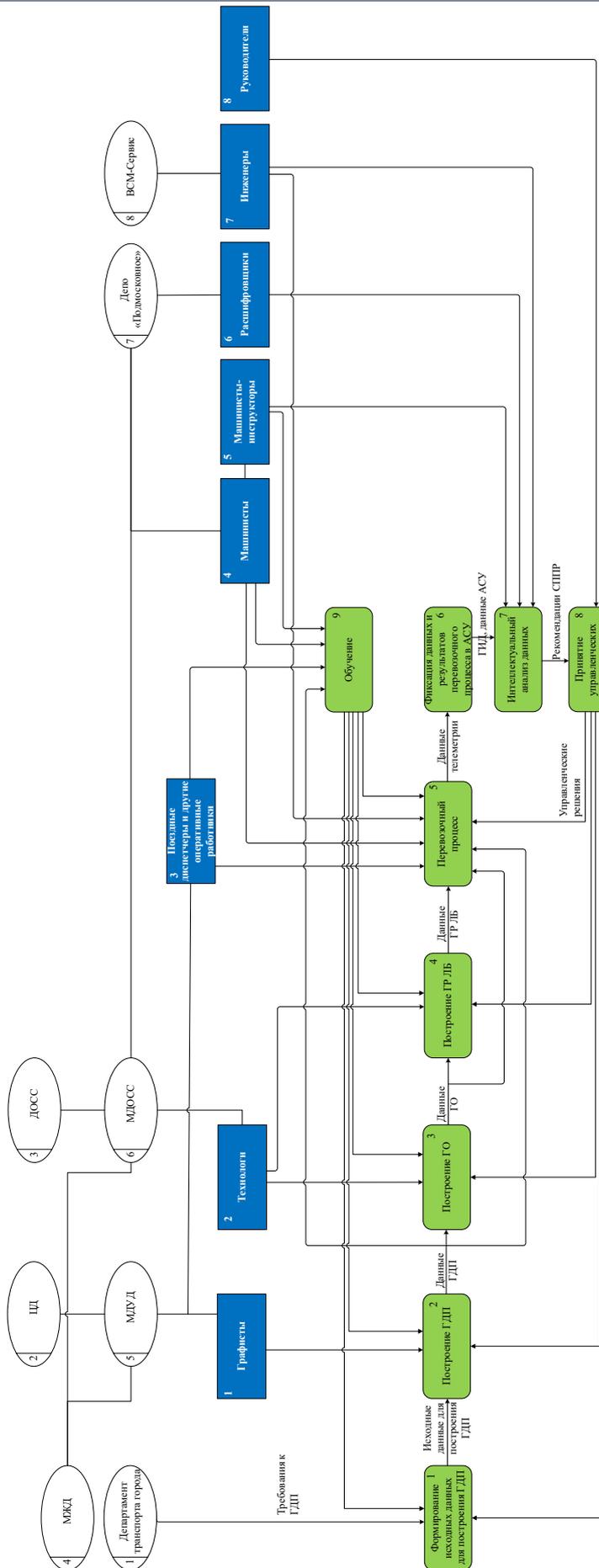
Москвы. Ремонт и обслуживание подвижного состава осуществляет аутсорсинговая компания ОАО «ВСМ-Сервис». Компания специализируется на регулярном обслуживании высокоскоростных поездов «Сапсан» и региональных электропоездов «Ласточка» (технические осмотры производятся в моторвагонном депо «Подмосковное»).

Перевозочный процесс осуществляется согласно нормативным документам: графику движения поездов (ГДП), графику оборота электроподвижного состава (ГО) и графику работы локомотивных бригад (ГР ЛБ). Результаты фактического исполнения движения посредством телеметрии передаются в автоматизированные системы управления (АСУ), предназначенные, в частности, для построения графика исполненного движения (ГИД). Вместе с тем данные, полученные АСУ, проходят интеллектуальный анализ в системах поддержки принятия решений (СППР). На основе результатов интеллектуального анализа вырабатываются управленческие решения по оперативному управлению перевозочным процессом, а также для внесения корректировок во множество исходных данных, необходимых для построения ГДП, собственно ГДП, ГО и ГР ЛБ.

### **1. Формирование исходных данных для построения графика движения поездов**

Исходными данными для построения ГДП, обеспечивающих пассажирские перевозки, являются как технико-эксплуатационные параметры и условия работы транспорта, так и существующие и прогнозируемые пассажиропотоки [4] на рассматриваемых участках. На основе этих данных определяются размеры движения, которые необходимо реализовать на ГДП. Методологическая основа для определения размеров движения пригородных пассажирских поездов создана профессором Ю. О. Пазойским [5–7], а для метрополитенов — профессором В. Г. Сидоренко [1, 8, 9].

В современных научных исследованиях при определении размеров движения рекомендуется использовать предварительно организованный пассажиропоток. Проблема организации пригородного пассажиропотока, то есть сознательного преобразования стихийного



**Рис. 1.** Диаграмма потоков данных системы управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций

пассажиропотока в зависимости от различных параметров, освещена в работе [10]. Организация пассажиропотока позволяет найти разумный компромисс между возможностями транспорта и требованиями пассажира к поездке.

Пассажиропоток, а значит, и размеры движения зависят от времени суток и дня недели, а также могут определяться особенностями конкретной даты, связанными с проведением тех или иных массовых мероприятий [8, 11].

Существенной особенностью организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте, а в последнее время и на метрополитене, является необходимость предоставления «окон» [12] для выполнения ремонтных работ на объектах инфраструктуры. В наибольшей степени это затрагивает пригородное и пригородно-городское сообщение. Для обеспечения перевозочного процесса и необходимого качества пассажирских перевозок в эти периоды разрабатываются варианты ГДП. При этом необходимо решать оптимизационные задачи, направленные на повышение эффективности использования подвижного состава и соблюдение требований пассажиров, предъявляемых к комфорту поездки [13–15]. Сказанное выше определяет такую особенность задач построения ГДП, как неавтономность.

Цель построения ГДП для скоростного транспорта городских агломераций — организовать движение подвижного состава в соответствии с заданными размерами движения в заданный временной промежуток внутри суток с учетом особенностей организации движения в начале и конце интервала работы транспортной системы внутри суток и других особенностей.

Задание на ГДП кроме цели включает в себя еще ограничения, отражающие связи между объектами, внутри множества выделенных ресурсов и ограничения, определяемые правилами обслуживания пассажиров:

- частота ввода/снятия подвижного состава на промежуточных остановочных пунктах;
- ограничение на максимальный интервал по отправлению транспортных средств;
- и др.

Множество выделенных ресурсов включает в себя ресурсы рассматриваемой системы скоростного транспорта. Как правило, инфраструктура такой системы представляет собой

граф, вершинами которого являются остановочные пункты, места изменения направления движения, отстоя (расстановки), обслуживания подвижного состава и др.; ребрами — участки путей, соединяющие эти объекты, в частности перегоны или участки станционных путей. Однотипные объекты объединяются во множества и описываются идентичными для объектов одного и того же класса кортежами, которые включают в себя информацию об уникальном ключе объекта в базе данных, наименовании, местоположении, особенностях (например, конечные и промежуточные остановочные пункты/станции), режиме работы (например, для пунктов обслуживания подвижного состава или возможные времена хода для перегонов), связях с другими объектами (например, составы какого депо обслуживаются в каких пунктах обслуживания, какие типы обслуживания могут выполняться в каком пункте обслуживания).

Весь подвижной состав приписан к депо, и это определяет особенности его обслуживания и местоположения вне движения.

Связи между объектами внутри множества выделенных ресурсов являются ограничениями, учитываемыми при синтезе ГДП и ГО. В случае появления новых ограничений они могут быть учтены путем ввода новых компонентов в последовательности, описывающие выделенные ресурсы линии.

Результатами планирования перевозочного процесса на основе собранных данных для каждого набора данных является совокупность трех графиков: ГДП, ГО, ГР ЛБ.

Соответствующие процессы и вопросы их автоматизации рассмотрены в следующих трех разделах.

## **2. Построение графика движения поездов**

ГДП является основой планирования функционирования соответствующей транспортной системы. Отличительной чертой железнодорожного скоростного транспорта по сравнению с метрополитеном является наличие смешанного движения, при котором существует сильная непараллельность и зональность ГДП. Смешанное движение — движение, при котором по одним и тем же путям могут двигаться поезда со значительно различающимися множествами

плановых времен хода и остановочных пунктов, что характерно, например, для МЦД. На участках железных дорог, относящихся к МЦД, осуществляют движение пригородные поезда МЦД с различной длиной маршрутов [16], пригородные поезда, пассажирские поезда дальнего сообщения и грузовые составы.

Наличие этих особенностей движения (смешанность, непараллельность, зональность, неавтономность) делает процесс автоматизации построения ГДП достаточно сложной математической задачей, над решением которой работают отечественные и зарубежные ученые [6, 7, 17, 18].

С точки зрения условий планирования движения МЦК близко к кольцевым линиям метрополитена, так как на МЦК отсутствуют смешанность, зональность и непараллельность движения.

В настоящее время на сети ОАО «РЖД» функционируют средства автоматизации создания графического образа ГДП, практически никак не автоматизирующие интеллектуальную деятельность технологов по составлению ГДП.

Применительно к метрополитенам задача автоматизации построения ГДП во многом решена, накоплен опыт преодоления особенностей ГДП, связанных с непараллельностью, зональностью и неавтономностью:

- разработана онтологическая математическая модель [19] линии метрополитена [1], доказавшая свою применимость как для решения задач автоматизированного планирования, так и управления движением;
- синтезированы модели процессов построения ГДП разных типов: традиционного [20–23], кольцевого, зонного и вилочного [9, 24];
- создан инструментарий для решения задач оптимизации ГДП как с использованием графовых моделей, так и генетического алгоритма [1, 25];
- сформулированы принципы и политики реализации вычислительных процессов построения ГДП [1, 26];
- формализованы алгоритмы поддержания равномерности движения в условиях неавтономности [22];
- разработаны алгоритмы энергооптимального планирования движения [27–30], в том числе и непараллельного [31];

- построена модель пользовательского интерфейса автоматизированных систем построения ГДП, включающая в себя различные способы визуализации исходных данных и результатов построения, средства проверки полученных результатов на соответствие предъявляемым требованиям и оценки их качества по различным критериям, а также интеграции с другими информационными системами [1, 9].

Полученные авторами результаты показали применимость к реальным условиям, адаптируемость к их изменению и эффективность при реализации в разработанной на кафедре «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) и эксплуатируемой на Московском метрополитене с 2003 г. «АРМ Графиста» [1]. Этапы развития теоретической базы построения ГДП применительно к метрополитенам, системы «АРМ Графиста» и входящих в ее состав подсистем изложены в [9]. На рис. 2 представлен фрагмент ГДП МЦК, построенный в «АРМ Графиста», что подтверждает возможность ее использования не только для метрополитена.

Принципы открытости, модульности, масштабируемости и использования MVC<sup>1</sup> модели построения программного обеспечения, заложенные в основу «АРМ Графиста», делают эту систему перспективной для наращивания функциональных возможностей, связанных как с расширением базы данных скоростного транспорта, для которого строится ГДП, так и базы знаний автоматизируемых операций, действий, функций, процедур и процессов.

В условиях ярко выраженного сращивания разрозненных ранее транспортных систем [32] создание единого инструментария автоматизации технологических и бизнес-процессов является важным фактором повышения уровня интеграции скоростного транспорта городских агломераций.

### 3. Построение графика оборота электроподвижного состава

Подходы к планированию проведения профилактических и ремонтных мероприятий,

<sup>1</sup> *Model-View-Controller* — схема обособления управляющей логики от данных приложения, повышающая удобство коллективной (командной) разработки программного обеспечения.

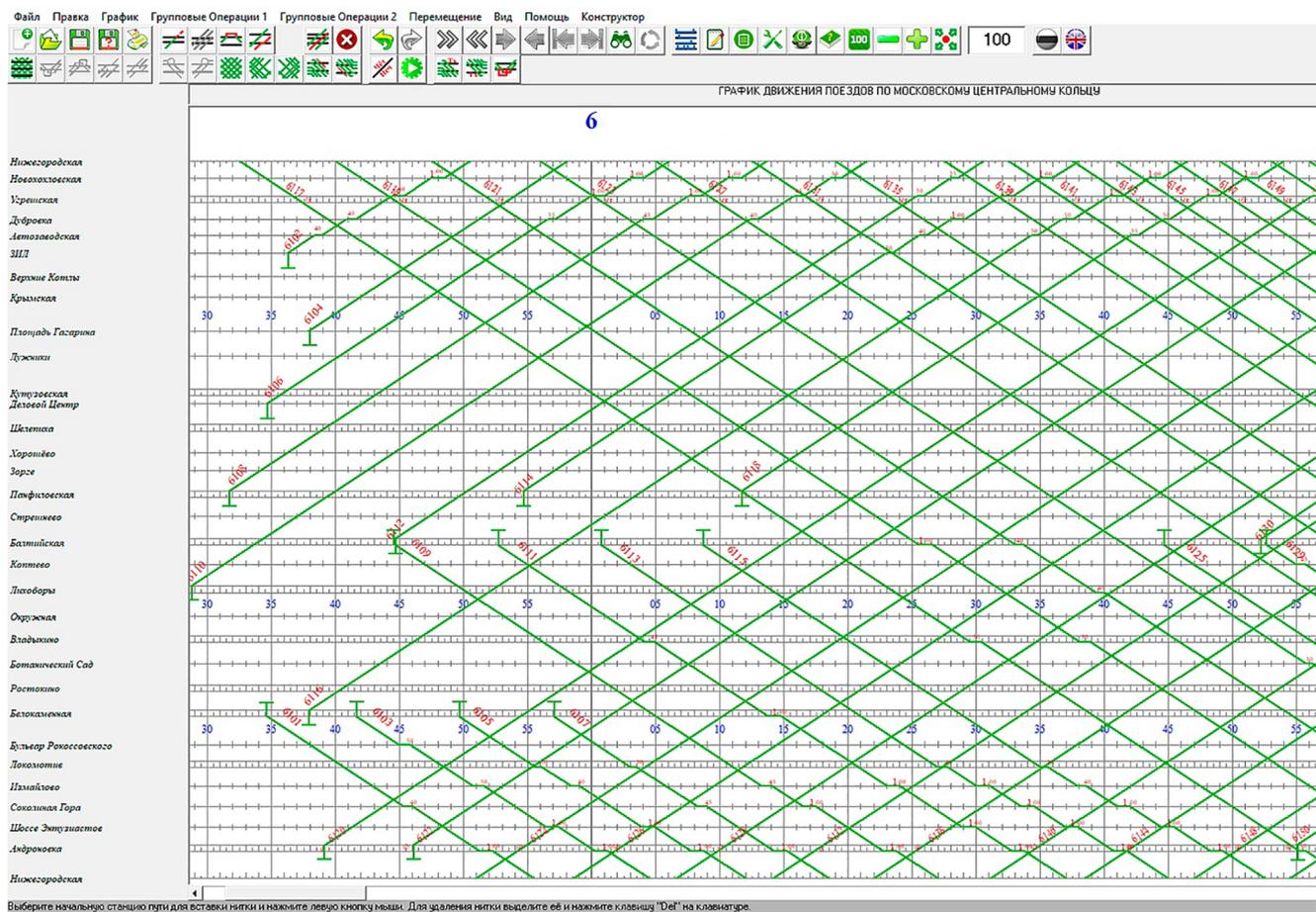


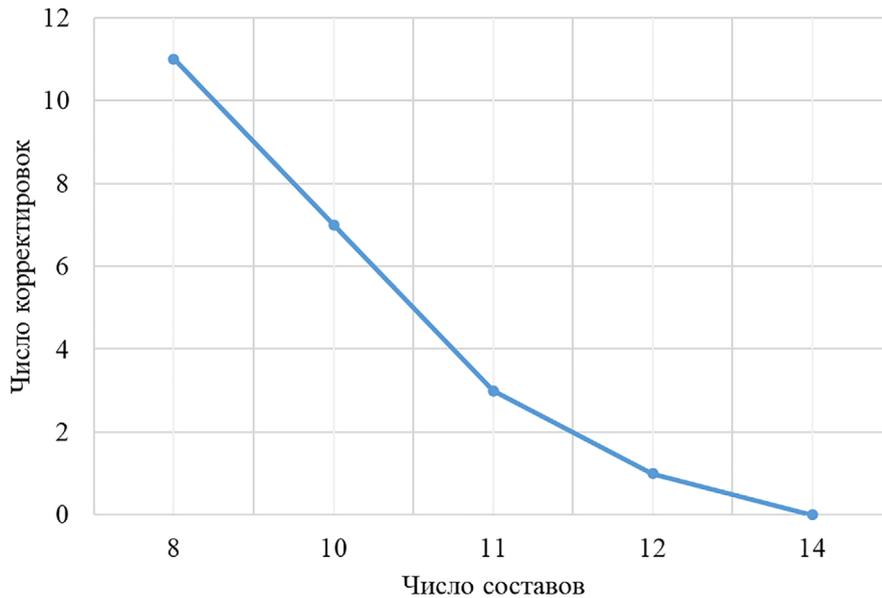
Рис. 2. Фрагмент ГДП МЦК, построенный в «АРМ Графиста»

закладываемых в ГО моторвагонного подвижного состава, на железнодорожном транспорте и на метрополитене различаются.

На железнодорожном транспорте эти задачи решаются разными специалистами, относящимися к разным дирекциям, и влияние ГО на ГДП (обратная связь) практически отсутствует, то есть система разомкнута. Это показано на рис. 1. На этапе составления ГДП отсутствует привязка подвижного состава к конкретным элементам ГДП, она осуществляется именно на этапе составления ГО. В настоящее время на железной дороге составление ГО производится вручную путем заполнения электронных таблиц. Высокая мощность множеств элементов графика, на которых могут использоваться элементы множества подвижного состава, высокая мощность множества единиц подвижного состава, а также отсутствие строгой математической формализации многих требований делает эту задачу перспективной для более глубокой проработки [33, 34].

Задачу построения ГО пригородных поездов чаще всего решали эвристически. Профессор Ю. О. Пазойский [5, 6] предложил модель строгой оптимизации. Однако эта модель статическая. Наиболее перспективным является новый метод расчета оборота составов электропоездов с помощью оптимизационной модели, основанной на динамической транспортной задаче. Метод позволяет не только найти оптимальный вариант оборота составов, но и предоставляет материалы для его критической оценки. В работах [35, 36] рассмотрено три варианта использования метода оптимизации обеспечения составами «ниток» графика движения пригородных поездов:

- при заданном числе составов и разрешении на сдвиг «ниток» графика;
- при заданном числе составов и запрете сдвига «ниток» графика;
- при свободном привлечении составов из заданного резерва и различных стоимостных параметрах, влияющих на задержки потоковых точек и ожидание составов.



**Рис. 3.** Зависимость числа корректировок «ниток» ГДП от числа составов

Апробация метода произведена на примере пригородных железнодорожных перевозок в Нижегородской агломерации.

Модель полностью отображает процесс оборота составов и обслуживание ими «ниток» графика и рассчитывает оборот составов, оптимальный по минимуму затрат. Начальное размещение может указываться, но используемая методика позволяет получить рекомендуемое моделью число составов на начальный момент на станциях из числа разрешенных. В результате расчетов формируется рекомендуемый ГДП с корректировкой «ниток» графика, если она потребовалось. Корректировка может быть только вынужденной, если задано недостаточное число составов в обороте. На примере участка Нижний Новгород — Урень были проведены эксперименты по постепенному увеличению числа используемых составов (рис. 3).

На графике (рис. 3) видно, что 8 составов недостаточно для выполнения заданного ГДП — приходится сдвигать 11 «ниток» графика. Для обеспечения всех «ниток» без корректировки требуется 14 составов, но при 12 составах корректируется всего одна «нитка». Если сдвиг небольшой, то, может, целесообразнее сократить два состава при небольшом сдвиге всего одной «нитки». То есть модель позволяет проводить совместную оптимизацию — одновременно ГО и ГДП. Этот подход не может быть реализован в статических моделях.

Используемый программный аппарат позволяет просматривать ГДП и ГО составов в целом по участку или ГО каждого отдельного состава. Для оценки полученного варианта можно также использовать выдаваемые моделью производительность составов в километрах и занятость составов по часам суток. Меняя весовые коэффициенты перед переменными, описывающими использование составов и сдвиг «ниток» графика, можно находить разные компромиссные оптимумы, которые на практике позволят получить существенную экономию ресурсов железнодорожного транспорта.

На метрополитене налажено тесное взаимодействие сотрудников Службы движения и электродепо при составлении ГО. Сформулированные сотрудниками электродепо требования к периодичности проведения технического обслуживания учитываются на этапе составления ГДП. Маршруты (составы с присвоенными им на сутки номером) назначаются на «нитки» ГДП, которые описывают движение маршрута от момента выхода на главный путь до момента ухода с него с указанием маневровых передвижений в начале и конце движения по главному пути и содержат информацию о переходах маршрута с одной «нитки» графика на другую и порядке следования «ниток» графика по одному главному пути. Возможность такого тесного взаимодействия определяется тем, что множества используемых ресурсов (единиц

подвижного состава) и выполняемых работ («ниток» ГДП на конкретной линии метрополитена) имеют ограниченные мощности. Задачи замены единиц подвижного состава, закрепленных за конкретным маршрутом, в случае выхода из строя решаются сотрудниками депо.

Задача автоматизированного построения ГО решена несколькими способами:

- решение задачи о назначениях в классической формулировке фундаментальной задачи комбинаторной оптимизации, в ходе которого проблема возникает на стадии выбора критерия поддержания равномерности при ограниченных ресурсах [37];
- применение теории графов и принципа динамического программирования (планирования) Беллмана позволяет найти все варианты возможных назначений диагностических и ремонтных мероприятий, после чего производится выбор отвечающих плановым эксплуатационным показателям и минимально отличающихся от оптимального значения с точки зрения выбранного критерия. Реализация этого подхода требует много времени [20];
- применение генетических алгоритмов [38] позволяет эффективно и оперативно учитывать изменение условий при автоматизации планирования технического обслуживания электроподвижного состава метрополитена, использовать различные множества ресурсов, решать задачу в условиях недостаточных ресурсов, значительно сократить время решения поставленных задач, генерации большого числа допустимых вариантов [39] решения задачи при учете различных ограничений. На рис. 4 а, б приведены результаты, полученные для Калужско-Рижской линии Московского метрополитена [1, 8, 9].

#### **4. Построение графика работы локомотивных бригад**

Человеческий фактор наряду с состоянием инфраструктуры и подвижного состава является основным, влияющим на безопасность транспортных систем. Нарушение пропорции между периодами труда и отдыха (резкое

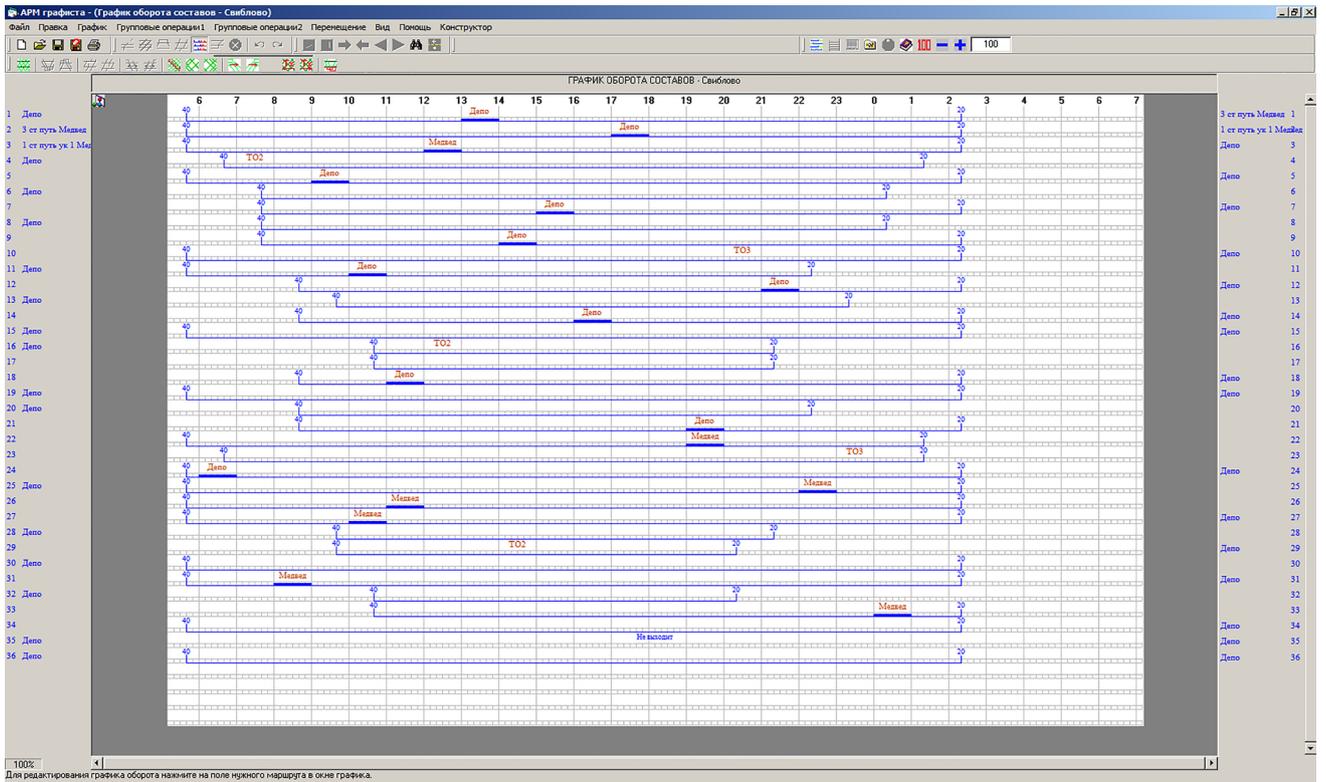
увеличение одного и сокращение другого, при этом в обе стороны) приводит к значительному увеличению частоты нарушений в работе машинистов. Это определяет актуальность задачи автоматизации построения ГР ЛБ, которая способствует повышению качества режима труда и отдыха. Использование стандартных средств управления персоналом [40] невозможно, так как смены сотрудников напрямую зависят не только от формальных требований к условиям труда, сформулированных в Трудовом кодексе РФ, Приказе Министерства транспорта РФ от 11 октября 2021 г. № 339 «Об утверждении Особенности режима рабочего времени и времени отдыха, условий труда отдельных категорий работников железнодорожного транспорта общего пользования, работа которых непосредственно связана с движением поездов» и Положении об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха работников метрополитена, но и от ГДП. Работы, посвященные математическим аспектам планирования работы локомотивных бригад, имеют длительную историю [33, 41].

В настоящее время на железной дороге составление ГО производится вручную путем заполнения электронных таблиц. На кафедре «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) разработана интеллектуальная система планирования работы локомотивных бригад, реализующая автоматизированное построение ГР ЛБ (основных и подменных) как для условий метрополитена, так и условий МЦК с учетом локальных нормативных актов [1].

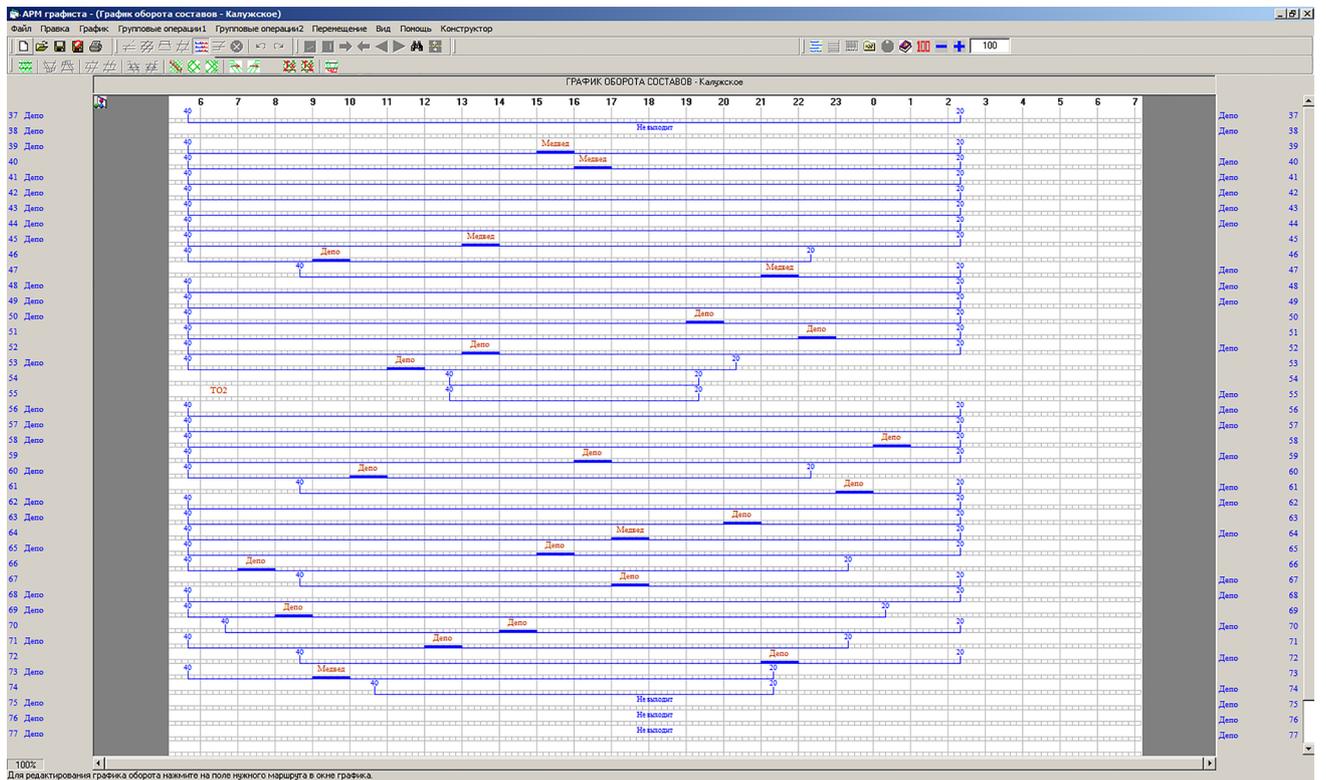
В системе реализованы рекурсивные алгоритмы назначения основных локомотивных бригад на рабочие смены и назначения обеденных перерывов основным локомотивным бригадам, которые позволяют повысить равномерность занятости бригады по сравнению с известными аналогами. Алгоритмы базируются на использовании теории графов и метода динамического программирования.

#### **5. Управление перевозочным процессом**

Организация и управление перевозочным процессом на любом виде транспорта заключается в выполнении комплекса сложных взаимосвязанных процессов с вовлечением широкого круга работников. От компетенций,



а



б

**Рис. 4.** ГО на Калужско-Рижской линии Московского метрополитена:  
 а — для депо «Свиблово»; б — для депо «Калужское»

знаний, практического опыта и навыков каждого работника зависит четкость, своевременность и правильность выполнения закрепленных за ними производственных процессов, а следовательно, безопасность и качество транспортных услуг.

Выполняя свои должностные обязанности, руководящие работники транспортной отрасли принимают управленческие решения различной сложности. В условиях штатной работы всех систем транспорта решения должны быть направлены на выполнение плановых заданий и показателей. Например, поездной диспетчер на железной дороге (ДНЦ) или поездной диспетчер линии метрополитена (ДЦХ) обеспечивают выполнение ГДП, обеспечивают выполнение заданий по использованию локомотивов, дают указания дежурным по станциям по организации движения поездов, планируют и организуют пропуск поездов, предоставление «окон», обеспечивают контроль поездной работы и т. д.

При возникновении сбоев в движении поездов или других нештатных ситуациях нагрузка на ДНЦ многократно возрастает — требуется оперативно принимать сложнейшие решения [42] для: организации перевозочного процесса в изменившихся условиях, обеспечения безопасности, восстановления движения поездов по нормативному ГДП и пр.

Учитывая разнообразие и сложность возможных нештатных ситуаций и то, что транспорт всегда остается объектом повышенной опасности, ДНЦ накапливает огромное количество вариантов и способов приведения ситуации к штатному режиму работы железнодорожного транспорта. При этом различные решения дают различный результат и эффект в различных случаях. Анализ каждой ситуации является личным профессиональным опытом определенного работника. Наиболее показательные и результативные мероприятия тиражируются в нормативных документах и специализированной литературе. Современный уровень развития информационных технологий позволяет накапливать, хранить и обрабатывать информацию о каждом случае, принятых решениях и их последствиях. Новая ступень развития технологий — интеллектуальные системы с возможностью самообучения и поддержкой принятия управленческих

решений [43, 44]. Необходимо создавать такие системы и использовать их потенциал для обеспечения бесперебойной, безопасной работы транспорта, особенно скоростного в городских агломерациях.

Научными и проектными организациями РФ, в том числе и на кафедре «Управление и защита информации», накоплен большой опыт в развитии централизованных и автономных автоматизированных систем управления движением поездов, в том числе разработана система поддержки принятия решения поездным диспетчером [1].

## **6. Фиксация данных и результатов перевозочного процесса в автоматизированных системах управления, их интеллектуальный анализ и принятие управленческих решений**

Системы скоростного транспорта городских агломераций имеют развитые автоматизированные средства сбора и хранения информации о состоянии элементов инфраструктуры и подвижного состава, что позволяет строить ГИД в автоматическом режиме и в реальном времени [45, 46], определять отклонение текущего положения транспортных средств от планового, принимать управленческие решения и оценивать работоспособность отдельных элементов.

Анализ собранной информации в АСУ проводится как в режиме реального времени, так и апостериорно. На основе анализа информации, интегрированной из разных источников, возможно решение задач автоматизированного управления движением в сбойных ситуациях, сокращающих время восстановления планового движения, предиктивной диагностики, повышающих коэффициент технической готовности элементов инфраструктуры и подвижного состава [1].

## **7. Обучение**

В настоящее время наиболее перспективным является интеграционный подход к обучению оперативных работников систем скоростного транспорта городских агломераций [47], при реализации которого тренажеры — автоматизированные системы обучения, основанные

на использовании имитационных моделей [48–51] соответствующих транспортных систем, и автоматизированные системы обучения, реализующие тестовую форму обучения, существуют в едином методическом, информационном и программном пространстве.

По целевой аудитории широко распространенные автоматизированные системы обучения можно разделить на следующие классы:

- тренажеры машинистов и базирующиеся на их основе обучающие комплексы [52];
- тренажеры станционных диспетчеров [53–55];
- тренажеры поездных диспетчеров [47, 42];
- тренажеры персонала, непосредственно не связанного с управлением движением, но реализующего действия по обслуживанию инфраструктуры, например, операторов строительной техники [56, 57].

Отличительной чертой средств обучения поездных диспетчеров систем скоростного транспорта городских агломераций является то, что функционал поездных и станционных диспетчеров выполняют одни и те же люди, а значит, и тренажеры основаны на использовании имитационной модели, симулирующей движение всей совокупности подвижного состава по всей инфраструктуре, например, линии метрополитена или МЦК. Кафедра «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) в 1999 г. разработала и внедрила первый в мире тренажер поездного диспетчера линии метрополитена. Такие тренажеры разработаны для всех линий Московского метрополитена [47] и могут быть адаптированы для условий МЦК.

Важно отметить, что подобные тренажеры являются прекрасными полигонами для исследования современных алгоритмов централизованного интеллектуального управления движением скоростного транспорта городских агломераций.

### Заключение

Анализ опыта создания и использования средств автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций показал наиболее перспективные направления их развития, к которым относится интеллектуализация подобных средств на основе накопленных баз знаний.

Комплексный подход к решению задач автоматизированного управления объектами разных типов, непосредственно связанных с организацией движения, с использованием технологий искусственного интеллекта и больших данных *повысит*:

- эффективность использования множества выделенных ресурсов (человеческих и инфраструктурных);
- процент выполнения ГДП;
- качество и объективность принимаемых управленческих решений;
- скорость реакции на изменяющиеся условия работы транспортной системы;
- скорость обмена информацией между средствами цифровизации, поддерживающих технологические процессы транспортной системы и смежных организаций;
- производительность труда сотрудников, решающих соответствующие задачи анализа и управления;

*уменьшит*:

- количество ошибок, возникающих при передаче информации;
- влияние негативного человеческого фактора на принимаемые управленческие решения и безопасность движения;
- производственные издержки.

Цель статьи можно считать достигнутой. Выявление общих и отличительных черт скоростных городских транспортных систем, анализ накопленного опыта автоматизации в области управления перевозочным процессом позволили определить перспективные направления и базу для их развития:

- развитие информационного, математического и программного обеспечения автоматизированного построения ГДП для скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий на базе системы «АРМ Графиста»;
- создание интеллектуальной системы планирования работы локомотивных бригад скоростных городских транспортных систем на базе прототипа программного обеспечения, созданного на кафедре «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ);
- синтез и апробация интеллектуальных алгоритмов централизованного беспре-

- лотного энергооптимального управления движением поездов с прогнозированием возмущений и использованием ранее не задействованных ресурсов управляющих воздействий;
- адаптация тренажера поездного диспетчера линий метрополитена для условий МЦК с возможностью последующего расширения условий применения на базе модульного принципа построения;
- разработка интеллектуальной системы оценки состояния оборудования моторвагонного скоростного и высокоскоростного подвижного состава на основе накопленной теоретической базы решения задач предиктивной диагностики. ▲

### Библиографический список

1. Баранов Л. А. Комплексное решение задач планирования и управления движением городских рельсовых транспортных средств / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина и др. // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды Международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 года. — М.: РУТ (МИИТ), 2021. — С. 56–64.
2. Вакуленко С. П. Разработка вариантов модернизации Московской монорельсовой транспортной системы / С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, В. А. Мнацаканов и др. // Метро и тоннели. — 2020. — № 4. — С. 28–36.
3. Shevlyugin M. V. Electric stock digital twin in a subway traction power system / M. V. Shevlyugin, A. A. Korolev, A. E. Golitsyna et al. // Russian Electrical Engineering. — 2019. — Vol. 90. — Iss. 9. — Pp. 647–652. — DOI: 10.3103/S1068371219090098.
4. Zhou W. Passenger Flow Forecasting in Metro Transfer Station Based on the Combination of Singular Spectrum Analysis and AdaBoost-Weighted Extreme Learning Machine / W. Zhou, W. Wang, D. Zhao // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — Iss. 12. — Pp. 1–23. — DOI: 10.3390/s20123555.
5. Пазойский Ю. О. Выбор оптимальных параметров системы освоения пассажиропотоков в дальнем сообщении на железнодорожном транспорте / Ю. О. Пазойский, О. Н. Панова // Автоматизация и современные технологии. — 2008. — № 1. — С. 34–39.
6. Пазойский Ю. О. Максимизация числа пассажирских поездов дальнего следования в период роста пассажиропотоков за счет интенсификации использования составов поездов / Ю. О. Пазойский, М. Ю. Савельев, А. П. Батулин // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. — 2016. — № 9-1(23). — С. 166–171.
7. Пазойский Ю. О. Схематический график движения пригородных поездов по выходным дням / Ю. О. Пазойский, М. Ю. Савельев // Мир транспорта. — 2017. — Т. 15. — № 6(73). — С. 140–147.
8. Исакаков Т. А. Подходы к оценке качества планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена / Т. А. Исакаков, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко и др. // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 1. — С. 38–63. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63.
9. Сафронов А. И. Антология задач организации графического пользовательского интерфейса в интеллектуальной системе «АРМ графиста» / А. И. Сафронов, У. А. Старовойтова // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции. — М.: РУТ (МИИТ), 2022. — С. 326–337.
10. Копылова Е. В. Технология организации пригородного пассажиропотока / Е. В. Копылова, П. А. Козлов, О. В. Осокин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 3. — С. 109–117.
11. Исакаков Т. А. Модель поведения различных клиентских групп в системе управления транспортным узлом / Т. А. Исакаков // Наука и техника транспорта. — 2016. — № 3. — С. 79–89.
12. Abdul Ghani N. An Alternative Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time Windows for Daily Deliveries / N. Abdul Ghani, S. Shariff, S. Zahari // Advances in Pure Mathematics. — 2016. — Iss. 6. — Pp. 342–350. — DOI: 10.4236/apm.2016.65025.
13. Вакуленко С. П. Оценка целесообразности формирования логистических систем обслуживания пассажиров / С. П. Вакуленко, Е. В. Копылова, А. Ю. Белянкин // Мир транспорта. — 2015. — Т. 13. — № 2(57). — С. 122–128.
14. Копылова Е. В. Методические подходы к оценке влияния требований пассажиров к качеству транспортного обслуживания на технологию работы железнодорожного транспорта / Е. В. Копылова, М. А. Туманов // Транспортное дело России. — 2018. — № 4. — С. 178–181.
15. Копылова Е. В. Научные подходы к обеспечению качества обслуживания пассажиров при организации мультимодальных пассажирских перевозок / Е. В. Копылова, С. П. Вакуленко // Железнодорожный транспорт. — 2018. — № 6. — С. 21–26.
16. Роменский Д. Ю. Постановка задачи выбора мест расположения и емкости путей отстоя составов пригородных и пригородно-городских электропоездов / Д. Ю. Роменский // Наука и техника транспорта. — 2020. — Т. 1. — С. 60–65.
17. Ho T. K. Train service timetabling in railway open markets by particle swarm optimization / T. K. Ho, C. W. Tsang, K. H. Ip et al. // Expert System Applications. — 2012. — Vol. 39. — Pp. 861–868.
18. Быков В. П. Теоретические и методологические основы построения систем поддержки принятия решений при управлении движением поездов на участках железных дорог / В. П. Быков. — Хабаровск: ДВГУПС, 1999. — 135 с.
19. Казаков А. Л. Применение онтологического подхода для создания интеллектуальной системы управления на железнодорожном транспорте / А. Л. Казаков, А. В. Дудакова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 3(43). — С. 33–41. — DOI: 10.20291/2079-0392-2019-3-33-41.

20. Баранов Л. А. Построение на ЭВМ графиков движения поездов метрополитена / Л. А. Баранов, А. И. Жербина // Вестник ВНИИЖТа. — 1981. — № 2. — С. 17–20.
21. Василенко М. Н. Автоматическое построение графиков движения поездов на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. П. Дегтярев, О. А. Максименко // Труды Международной конференции «Транспорт XXI век». — Варшава, 2001.
22. Логинова Л. Н. Разработка аналитического алгоритма составления расписания движения поездов метрополитена / Л. Н. Логинова, Е. А. Сеславина, А. И. Сеславин // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. — Москва: Российский университет транспорта, 2022. — С. 221–225.
23. Логинова Л. Н. Математические методы и основные принципы организации транспортных перевозок / Л. Н. Логинова, Е. А. Сеславина, А. И. Сеславин // Транспортное дело России. — 2021. — № 4. — С. 84–87.
24. Феофилов А. Н. Математическая модель составления графиков движения поездов на линиях метрополитена / А. Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. — 1991. — № 7. — С. 10–13.
25. Chaudhry I. A. Integrated process planning and scheduling using genetic algorithms / I. A. Chaudhry, M. Usman // Tehnicki Vjesnik. — 2017. — Iss. 24(5). — Pp. 1401–1409. — DOI: 10.17559/TV-20151121212910.
26. Chavhan S. Prediction based traffic management in a metropolitan area / S. Chavhan, P. Venkataram // Journal of traffic and transportation engineering. — 2020. — Vol. 7. — Iss. 4. — Pp. 447–466. — DOI: 10.1016/j.jtte.2018.05.003.
27. Aguado J. A. Optimal Operation of Electric Railways with Renewable Energy and Electric Storage Systems / J. A. Aguado, A. J. Sanchez-Racero, S. De la Torre // IEEE Transactions on Smart Grid. — 2018. — Vol. 9. — Iss. 2. — Pp. 993–1001. — DOI: 10.1109/TSG.2016.2574200.
28. Liu P. A robust and energy-efficient train timetable for the subway system / P. Liu, M. Schmidt, Q. Kong et al. // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2020. — Vol. 121(2). — Pp. 102822–102849. — DOI: 10.1016/j.trc.2020.102822.
29. Wang P. Multi-train trajectory optimization for energy-efficient timetabling / P. Wang, R. M. Goverde // European Journal of Operational Research. — 2019. — Vol. 272. — Pp. 621–635. — DOI: 10.1016/j.ejor.2018.06.034.
30. Haładyn S. The Problem of Train Scheduling in the Context of the Load on the Power Supply Infrastructure. A Case Study / S. Haładyn // Energies. — 2021. — Iss. 14(16). — Pp. 8248–8260. — DOI: 10.3390/en14164781.
31. Baranov L. A. Minimization of Energy Consumption for Urban Rapid-Transit Traction / L. A. Baranov, V. G. Sidorenko, E. P. Balakina et al. // Russian Electrical Engineering. — 2021. — Vol. 92. — Iss. 9. — Pp. 492–498. — DOI: 10.3103/S1068371221090030.
32. Николаев К. Ю. Применение технологии «трамвай — поезд» в России. Требования к подвижному составу и технологическое обеспечение взаимодействия транспортных систем / К. Ю. Николаев // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ», Щербинка, 26–27 августа 2021 года. — Щербинка: АО «ВНИИЖТ», 2021. — С. 132–138.
33. Пазойский Ю. О. Автоматизация расчета графика работы поездных бригад в пригородном сообщении / Ю. О. Пазойский, С. А. Бывшев; под общ. ред. Ф. П. Кочнева // Межвузовский сборник научных трудов «Оптимизация эксплуатационной работы железных дорог». — 1981. — № 657. — С. 84–90.
34. Пазойский Ю. О. Организация пригородных железнодорожных перевозок: Транспортные средства. Эксплуатация железных дорог / Ю. О. Пазойский, С. П. Вакуленко, А. В. Колин. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. — 270 с.
35. Копылова Е. В. Оптимизация оборота составов по обеспечению ниток графика пригородного движения / Е. В. Копылова, П. А. Козлов // Наука и техника транспорта. — 2020. — № 2. — С. 68–73.
36. Козлов П. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663049 Российская Федерация. Система оптимального управления оборотом поездных локомотивов «Лабиринт»: № 2015619810: заявл. 15.10.2015: опубл. 09.12.2015 / П. А. Козлов, И. В. Иванов, А. А. Каляганов; заявитель общество с ограниченной ответственностью «Аналитические и управляющие системы на транспорте “Транспортный алгоритм”».
37. Жербина А. И. Расчет на ЭВМ графика оборота составов метрополитена / А. И. Жербина // Межвузовский сборник. — 1980. — № 612. — С. 105–109.
38. Guler H. Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms / H. Guler // Gradevinar. — 2016. — Vol. 68. — Iss. 12. — Pp. 979–993. — DOI: 10.14256/JCE.1458.2015.
39. Ghofrani, F. Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: A survey / F. Ghofrani, Q. He, R. Goverde et al. // Transportation Research Part C Emerging Technologies. — 2018. — Iss. 90. — Pp. 226–246. — DOI: 10.1016/j.trc.2018.03.010.
40. Reva O. Ergonomic assessment of instructors capability to conduct personality-oriented training for air traffic control (ATC) personnel / O. Reva, S. Borsuk, V. Shulgin et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2020. — Vol. 964. — Pp. 783–793. — DOI: 10.1007/978-3-030-20503-470/.
41. Бархатный В. Д. Рациональное использование технических средств и персонала в условиях внутрисуточной неравномерности и спада перевозок / В. Д. Бархатный, Ю. С. Генералов, Д. В. Смирнов // Вестник ВНИИЖТ. — 1997. — № 4. — С. 3–7.
42. Luteberget B. Design-Time Railway Capacity Verification using SAT modulo Discrete Event Simulation / B. Luteberget, K. Claessen, C. Johansen // Proceedings of the 2018 18th conference on formal methods in computer aided design (FMCAD). — Austin, 2019. — Pp. 188–196. — DOI: 10.23919/FMCAD.2018.8603003.
43. Gan T. H. Industry 4.0: Why Machine Learning Matters? / T. H. Gan, J. Kanfoud, H. Nedunuri et al. // Advances in Condition Monitoring and Structural Health Monitoring. — 2021. — Pp. 397–404. — DOI: 10.1007/978-981-15-9199-0\_37.
44. Pappaterra M. J. A Systematic Review of Artificial Intelligence Public Datasets for Railway Applications / M. J. Pappaterra, F. Flammini, V. Vittorini et al. // Infrastructures. — 2021. —

- Vol. 6. — Iss. 10. — Pp. 136. — DOI: 10.3390/infrastructures6100136.
45. Чумаков В. М. Автоматизация процесса анализа графика исполненного движения поездов и качества поездной работы в центре управления перевозками / В. М. Чумаков, О. В. Млявая // Тихомировские чтения: Синергия технологии перевозочного процесса: материалы Международной научно-практической конференции, Гомель, 10–11 декабря 2020 года. Под общ. ред. А. А. Ерофеева. — Гомель: учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2021. — С. 413–417.
  46. Бариев М. Ф. Взаимодействие информационных систем в мониторинге графика движения поездов на МЦД / М. Ф. Бариев, Р. А. Воротняк // Автоматика, связь, информатика. — 2020. — № 12. — С. 12–13. — DOI: 10.34649/AT.2020.12.12.003.
  47. Баранов Л. А. Интеграционный подход в обучении оперативных работников городских рельсовых транспортных систем / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина и др. // Наука и техника транспорта. — 2021. — № 2. — С. 22–31.
  48. Pokusaev O. On Digital Twin for Metro System / O. Pokusaev, A. Checkmarev, D. Namiot // Proceedings of 19th IEEE EastWest Design & Test Symposium (EWDTS'2021). September 10–13, 2021. — Batumi, 2021. — Pp. 114–118. — DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581028.
  49. Wang X. Digital twin Based Validation Platform for Smart Metro Scenarios / X. Wang, H. Song, W. Zha et al. // 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). — 15 July — 15 Aug. 2021. — Beijing, 2021. — Pp. 386–389. — DOI: 10.1109/DTPI52967.2021.9540161.
  50. Bao L. Review of digital twin for intelligent transportation system / L. Bao, Q. Wang, Y. Jiang // International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT). — 2021. — Pp. 309–315. — DOI: 10.1109/ICEERT53919.2021.00064.
  51. Ali W. A. Digital Twin in Intelligent Transportation Systems: a Review / W. A. Ali, M. Roccotelli, M. P. Fanti // Conference: 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). — Istanbul, 2022. — DOI: 10.1109/CoDIT55151.2022.9804017.
  52. Гапанович В. А. Патент на полезную модель № 130113 U1 Российская Федерация, МПК G09B 9/05. Мобильный учебный демонстрационный комплекс: № 2012126762/11: заявл. 27.06.2012; опубл. 10.07.2013 / В. А. Гапанович, Ю. И. Попов, В. В. Власов и др.; заявитель открытое акционерное общество «Российские железные дороги».
  53. Козлов П. А. Интеллектуальный тренажер для профессиональной подготовки диспетчеров / П. А. Козлов, В. А. Четвериков, И. М. Яриков // Железнодорожный транспорт. — 2011. — № 10. — С. 29–32.
  54. Козлов П. А. Интеллектуальный тренажер для диспетчеров / П. А. Козлов, О. В. Осокин, Н. А. Тушин // Мир транспорта. — 2012. — Т. 10. — № 3(41). — С. 180–183.
  55. Зеленцов Л. Б. Применение симулятора-тренажера при подготовке и переподготовке специалистов в сфере управления инвестиционно-строительными проектами / Л. Б. Зеленцов, Д. В. Пирко, И. А. Алаамери и др. // Строительное производство. — 2022. — № 1. — С. 50–54. — DOI: 10.54950/26585340\_2022\_1\_50.
  56. Великанов В. С. Тренажерная подготовка кадров для горной промышленности как системообразующий фактор в сфере обеспечения эффективной эксплуатации горного оборудования / В. С. Великанов, К. В. Исмагилов, А. А. Шабанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2012. — № 52. — С. 153–158.
  57. Габдуллин Т. Р. Разработка обучающих тренажеров для дорожно-строительных машин / Т. Р. Габдуллин // Техника и технология транспорта. — 2018. — № 4(9). — С. 2.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 33–48  
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-33-48

## Experience and Perspectives of Transportation Process Control Automation for Rapid-Transit Transport of Urban Agglomerations

### Information about authors

**Sidorenko V. G.**, Doctor in Engineering, Professor, Department Professor<sup>1</sup>. E-mail: valenfalk@mail.ru

**Kopylova E. V.**, Doctor of Engineering, Associate Professor, Department Associate Professor<sup>2</sup>. E-mail: miit.kopylova@yandex.ru

**Safronov A. I.**, PhD in Engineering, Associate Professor, Department Associate Professor<sup>1</sup>. E-mail: safronov-ai@mail.ru

**Tumanov M. A.**, Senior Lecturer<sup>2</sup>. E-mail: miit.tumanov@yandex.ru

<sup>1</sup>Russia University of Transport (MIIT), “Control and Information Security” Department, Moscow

<sup>2</sup>Russia University of Transport (MIIT), “Transport Business Management and Intelligent Systems” Department, Moscow

**Abstract:** The article analyses the technological process of transportation process organization and its control in different systems of urban agglomeration rapid-transit transport. It is presented the generalization of organization technological schemes of transportation process at the compilation of normative documents-schedules of: train

traffic, rolling stock turnover, work of locomotive teams. Common features, allowing to share automation and digitization positive experience from one transport systems to another, are revealed. As a typical example for urban agglomeration rapid-transit transport, the work of Moscow Central Ring in data flow diagram notation is considered. It has been shown that the conditions of traffic planning on Moscow Central Ring are analogous to active ones on the subway ring lines. As generalizing notions, there are: mixing, non-parallelism, zoning, non-autonomy. Corresponding illustrative examples are given. Congested experience in the sphere of control automation for transportation process of rapid-transit transport of urban agglomeration is considered on the examples of railway section Nizhniy Novgorod – Uren’ as well as Kaluzhsko-Rizhskaya line of Moscow subway (electrodepos “Kaluzhskoye” and “Sviblovo”). The article describes initial data sets for to perform train traffic schedule, the purpose of its performance has been formulated, limitations, reflecting the links between objects, inside the set of given resources, and limitations, being defined by rules of passenger service, have been revealed. Analysis, pursued in the article, has shown the perspective directions of automated transport systems development on knowledge accumulated bases. As a result of the application of complex approach to the solution of automated control tasks at the use of artificial intelligence technologies and big databases usage, it’s planned to increase the efficiency usage for given resources set, train traffic schedule implementation percentage and others; to reduce information transfer error number as well as those, appeared as a result of negative human factor influence and so on.

**Keywords:** rapid-transit transport; urban agglomeration; train traffic schedule; turnout schedule; work schedule of locomotive teams; operative control; personnel training; database; exerciser; knowledge database.

## References

- Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. et al. *Kompleksnoe reshenie zadach planirovaniya i upravleniya dvizheniem gorodskikh rel'sovykh transportnykh sredstv. Akademik Vladimir Nikolaevich Obratsov — osnovopolozhnik transportnoy nauki: trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 125-letiyu universiteta, Moskva, 22 oktyabrya 2021 goda* [Complex solution of problems of planning and traffic control of urban rail vehicles. Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov — the founder of transport science: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 125th anniversary of the University, Moscow, October 22, 2021]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2021, pp. 56–64. (In Russian)
- Vakulenko S. P., Romenskiy D. Yu., Mnatsakanov V. A. et al. *Razrabotka variantov modernizatsii Moskovskoy monorel'sovoy transportnoy sistemy* [Development of options for the modernization of the Moscow monorail transport system, Metro and Tunnels]. *Metro i tonneli* [Metro and Tunnels]. 2020, Iss. 4, pp. 28–36. (In Russian)
- Shevlyugin M. V., Korolev A. A., Golitsyna A. E. et al. *Electric stock digital twin in a subway traction power system*. *Russian Electrical Engineering*. 2019, vol. 90, Iss. 9, pp. 647–652. DOI: 10.3103/S1068371219090098.
- Zhou W., Wang W., Zhao D. *Passenger Flow Forecasting in Metro Transfer Station Based on the Combination of Singular Spectrum Analysis and AdaBoost-Weighted Extreme Learning Machine*. *Sensors*. 2020, vol. 20, Iss. 12, pp. 1–23. DOI: 10.3390/s20123555.
- Pazoyskiy Yu. O., Panova O. N. *Vybor optimal'nykh parametrov sistemy osvoeniya passazhiropotokov v dal'nem soobshchenii na zheleznodorozhnom transporte* [Choice of optimal parameters for the system of development of passenger traffic in long-distance communication on railway transport]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and modern technologies]. 2008, Iss. 1, pp. 34–39.
- Pazoyskiy Yu. O., Savel'ev M. Yu., Baturin A. P. *Maksimizatsiya chisla passazhirkikh poezdov dal'nego sledovaniya v period rosta passazhiropotokov za schet intensivifikatsii ispol'zovaniya sostavov poezdov* [Maximization of the number of long-distance passenger trains during the growth of passenger traffic due to the intensification of the use of train sets]. *Konkurentosposobnost' v global'nom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii* [Competitiveness in the global world: economics, science, technology]. 2016, Iss. 9-1(23), pp. 166–171. (In Russian)
- Pazoyskiy Yu. O., Savel'ev M. Yu. *Skhematicheskiy grafik dvizheniya prigorodnykh poezdov po vykhodnym dnyam* [Schematic schedule of suburban trains on weekends]. *Mir transporta* [World of transport]. 2017, vol. 15, Iss. 6(73), pp. 140–147. (In Russian)
- Iskakov T. A., Safronov A. I., Sidorenko V. G. et al. *Podkhody k otsenke kachestva planirovaniya i upravleniya dvizheniem passazhirkikh poezdov metropolitena* [Approaches to assessing the quality of planning and traffic control for metro passenger trains]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2020, vol. 6, Iss. 1, pp. 38–63. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63. (In Russian)
- Safronov A. I., Starovoytova U. A. *Antologiya zadach organizatsii graficheskogo pol'zovatel'skogo interfeysa v intellektual'noy sisteme "ARM grafista"*. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [An anthology of tasks of organizing a graphical user interface in the intellectual system "Workstation of a graphist"]. *Intelligent transport systems: materials of the International scientific and practical conference*. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2022, pp. 326–337. (In Russian)
- Kopylova E. V., Kozlov P. A., Osokin O. V. *Tekhnologiya organizatsii prigorodnogo passazhiropotoka* [Technology of organization of suburban passenger traffic]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Communications]. 2019, Iss. 3, pp. 109–117. (In Russian)
- Iskakov T. A. *Model' povedeniya razlichnykh klientskikh grupp v sisteme upravleniya transportnogo uzla* [A model of the behavior of various client groups in the control system of a transport hub]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2016, Iss. 3, pp. 79–89. (In Russian)
- Abdul Ghani N., Shariff S., Zahari S. *An Alternative Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time Windows for Daily Deliveries*. *Advances in Pure Mathematics*. 2016, Iss. 6, pp. 342–350. DOI: 10.4236/apm.2016.65025.
- Vakulenko S. P., Kopylova E. V., Belyankin A. Yu. *Otsenka tselesoobraznosti formirovaniya logisticheskikh sistem obsluzhivaniya passazhirov* [Evaluation of the feasibility of the formation of logistics systems for servicing passengers]. *Mir transporta* [World of transport]. 2015, vol. 13, Iss. 2(57), pp. 122–128. (In Russian)
- Kopylova E. V., Tumanov M. A. *Metodicheskie podkhody k otsenke vliyaniya trebovaniy passazhirov k kachestvu transportnogo obsluzhivaniya na tekhnologiyu raboty zheleznodorozhnogo transporta* [Methodological approaches to assessing the impact of passenger requirements on the quality of transport services on the technology of railway transport]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2018, Iss. 4, pp. 178–181. (In Russian)
- Kopylova E. V., Vakulenko S. P. *Nauchnye podkhody k obespecheniyu kachestva obsluzhivaniya passazhirov pri organizatsii mul'timodal'nykh passazhirkikh perevozok* [Scientific approaches to ensuring the quality of passenger service in the organization of multimodal passenger transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2018, Iss. 6, pp. 21–26. (In Russian)
- Romenskiy D. Yu. *Postanovka zadachi vybora mest raspolozheniya i emkosti putey otstoya sostavov prigorodnykh i prigorodno-gorodskikh elektropoezdov* [Statement of the problem of choosing the location and capacity of the sludge tracks of suburban and suburban-urban electric trains]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2020, vol. 1, pp. 60–65. (In Russian)
- Ho T. K., Tsang C. W., Ip K. H. et al. *Train service timetabling in railway open markets by particle swarm optimization*. *Expert System Applications*. 2012, vol. 39, pp. 861–868.
- Bykov V. P. *Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy postroeniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy pri upravlenii dvizheniem poezdov na uchastkakh zheleznykh dorog* [Theoretical and methodological foundations for constructing decision support systems in the management of train traffic on sections of railways]. *Khabarovsk: DVGUPS Publ.*, 1999, 135 p. (In Russian)
- Kazakov A. L., Dudakova A. V. *Primenenie ontologicheskogo podkhoda dlya sozdaniya intellektual'noy sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte* [Application of the ontological approach to create an intelligent control system for railway transport]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Communications]. 2019, Iss. 3(43), pp. 33–41. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-3-33-41. (In Russian)
- Baranov L. A., Zherbina A. I. *Postroenie na EVM grafikov dvizheniya poezdov metropolitena* [Construction of metro train schedules on a computer]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT]. 1981, Iss. 2, pp. 17–20. (In Russian)
- Vasilenko M. N., Degtyarev D. P., Maksimenko O. A. *Avtomaticheskoe postroenie grafikov dvizheniya poezdov na metropolitene*. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii "Transport XXI vek"* [Automatic scheduling of trains on the subway. Proceedings of the International Conference "Transport XXI century"]. *Varshava*, 2001. (In Russian)
- Loginova L. N., Soslavina E. A., Soslavin A. I. *Razrabotka analiticheskogo algoritma sostavleniya raspisaniya dvizheniya poezdov metropolitena*. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 26 maya 2022 goda* [Development of an analytical algorithm for scheduling the movement of metro trains. Intelligent transport systems: materials of the International scientific and practical conference, Moscow, May 26, 2022]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2022, pp. 221–225. (In Russian)
- Loginova L. N., Soslavina E. A., Soslavin A. I. *Matematicheskie metody i osnovnye printsipy organizatsii transportnykh perevozok* [Mathematical methods and basic principles of organization of transportation]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2021, Iss. 4, pp. 84–87. (In Russian)
- Feofilov A. N. *Matematicheskaya model' sostavleniya grafikov dvizheniya poezdov na liniyakh metropolitena* [Mathematical model for scheduling trains on metro lines]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 1991, Iss. 7, pp. 10–13. (In Russian)
- Chaudhry I. A., Usman M. *Integrated process planning and scheduling using genetic algorithms*. *Tekhnicheskij Vjesnik*. 2017, Iss. 24(5), pp. 1401–1409. DOI: 10.17559/TV-20151121212910.
- Chavhan S., Venkataram P. *Prediction based traffic management in a metropolitan area*. *Journal of traffic and transportation engineering*. 2020, vol. 7, Iss. 4, pp. 447–466. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.05.003.
- Aguado J. A., Sanchez-Racero A. J., Torre de la S. *Optimal Operation of Electric Railways with Renewable Energy and Electric Storage Systems*. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018, vol. 9, Iss. 2, pp. 993–1001. DOI: 10.1109/TSG.2016.2574200.
- Liu R., Schmidt M., Kong Q. et al. *A robust and energy-efficient train timetable for the subway system*. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2020, vol. 121(2), pp. 102822–102849. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102822.

29. Wang P., Goverde R. M. Multi-train trajectory optimization for energy-efficient timetabling. *European Journal of Operational Research*. 2019, vol. 272, pp. 621–635. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.06.034.
30. Haładyn S. The Problem of Train Scheduling in the Context of the Load on the Power Supply Infrastructure. A Case Study. *Energies*. 2021, Iss. 14(16), pp. 8248–8260. DOI: 10.3390/en14164781.
31. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. et al. Minimization of Energy Consumption for Urban Rapid-Transit Traction. *Russian Electrical Engineering*. 2021, vol. 92, Iss. 9, pp. 492–498. DOI: 10.3103/S1068371221090030.
32. Nikolaev K. Yu. *Primenenie tekhnologii "tramvay — poezd" v Rossii. Trebovaniya k podvizhnomu sostavu i tekhnologicheskoe obespechenie vzaimodeystviya transportnykh sistem. Nauka 1520 VNIIZhT: Zaglyani za gorizont: sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii AO "VNIIZhT", Shcherbinka, 26–27 avgusta 2021 goda* [Application of "tram — train" technology in Russia. Requirements for rolling stock and technological support for the interaction of transport systems. Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon: a collection of materials of the scientific and practical conference of VNIIZhT JSC, Shcherbinka, August 26–27, 2021]. Shcherbinka: AO "VNIIZhT" Publ., 2021, pp. 132–138. (In Russian)
33. Pazoyskiy Yu. O., Byvshev S. A. *Avtomatizatsiya rascheta grafika raboty poezdnykh brigad v prigorodnom soobshchenii. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Optimizatsiya ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog"; pod obshch. red. F. P. Kochneva* [Automation of the calculation of the work schedule of train crews in suburban traffic. Interuniversity collection of scientific papers "Optimization of the operational work of railways"; ed. F. P. Kochnev]. 1981, Iss. 657, pp. 84–90. (In Russian)
34. Pazoyskiy Yu. O., Vakulenko S. P., Kolin A. V. *Organizatsiya prigorodnykh zheleznodorozhnykh perezovok: Transportnye sredstva. Eksploatatsiya zheleznykh dorog* [Organization of commuter rail transportation: Vehicles. Railway operation]. M.: FGBU DPO "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2015, 270 p. (In Russian)
35. Kopylova E. V., Kozlov P. A. *Optimizatsiya oborota sostavov po obespecheniyu nitok grafika prigorodnogo dvizheniya* [Optimization of the turnover of trains to ensure the threads of the suburban traffic schedule]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2020, Iss. 2, pp. 68–73. (In Russian)
36. Kozlov P. A., Ivanov I. V., Kalyaganov A. A. *Sistema optimal'nogo upravleniya oborotom poezdnykh lokomotivov "Labyrinth"* [The system for optimal control of the turnover of train locomotives "Labyrinth"]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2015619810. (In Russian)
37. Zherbina A. I. *Raschet na EVM grafika oborota sostavov metropolitena* [Calculation on the computer of the schedule of turnover of subway trains]. *Mezhvuzovskiy sbornik* [Interuniversity collection]. 1980, Iss. 612, pp. 105–109. (In Russian)
38. Guler H. *Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms*. *Gradevinar*. 2016, vol. 68, Iss. 12, pp. 979–993. DOI: 10.14256/JCE.1458.2015.
39. Ghofrani F., He Q., Goverde R. et al. Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: A survey. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*. 2018, Iss. 90, pp. 226–246. DOI: 10.1016/j.trc.2018.03.010.
40. Reva O., Borsuk S., Shulgina V. et al. Ergonomic assessment of instructors capability to conduct personality-oriented training for air traffic control (ATS) personnel. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 964, pp. 783–793. DOI: 10.1007/978-3-030-20503-470/.
41. Barkhatnyy V. D., Generalov Yu. S., Smirnov D. V. *Ratsional'noe ispol'zovanie tekhnicheskikh sredstv i personala v usloviyakh vnutrisutochnoy neravnomernosti i spada perezovok* [Rational use of technical means and personnel in the conditions of intraday unevenness and decline in traffic]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 1997, Iss. 4, pp. 3–7. (In Russian)
42. Luteberget B., Claessen K., Johansen C. *Design-Time Railway Capacity Verification using SAT modulo Discrete Event Simulation*. Proceedings of the 2018 18th conference on formal methods in computer aided design (FMCAD). Austin, 2019, pp. 188–196. DOI: 10.23919/FMCAD.2018.8603003.
43. Gan T. H., Kanfoud J., Nedunuri H. et al. *Industry 4.0: Why Machine Learning Matters? Advances in Condition Monitoring and Structural Health Monitoring*. 2021, pp. 397–404. DOI: 10.1007/978-981-15-9199-0\_37.
44. Pappaterra M. J., Flammini F., Vittorini V. et al. *A Systematic Review of Artificial Intelligence Public Datasets for Railway Applications*. *Infrastructures*. 2021, vol. 6, Iss. 10, pp. 136. DOI: 10.3390/infrastructures6100136.
45. Chumakov V. M., Mlyavaya O. V. *Avtomatizatsiya protsessa analiza grafika ispolnennogo dvizheniya poezdov i kachestva poezdnoy raboty v tsentre upravleniya perezovkami. Tikhomirovskie chteniya: Sinergiya tekhnologii perezovozhnogo protsessa: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Gomel', 10–11 dekabrya 2020 goda. Pod obshch. red. A. A. Erofeeva* [Automation of the process of analyzing the schedule of completed train traffic and the quality of train work in the transportation control center]. Gomel': uchrezhdenie obrazovaniya "Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta" Publ., 2021, pp. 413–417. (In Russian)
46. Bariev M. F., Vorotnyak R. A. *Vzaimodeystvie informatsionnykh sistem v monitoringe grafika dvizheniya poezdov na MTSd* [Interaction of information systems in monitoring the train schedule on the MCD]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2020, Iss. 12, pp. 12–13. DOI: 10.34649/AT.2020.12.12.003. (In Russian)
47. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. *Integratsionnyy podkhod v obuchenii operativnykh rabotnikov gorodskikh rel'sovykh transportnykh sistem* [Integration approach in training operational workers of urban rail transport systems]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2021, Iss. 2, pp. 22–31. (In Russian)
48. Pokusaev O., Checkmarev A., Namiot D. *On Digital Twin for Metro System*. Proceedings of 19th IEEE EastWest Design & Test Symposium (EWDTS'2021). September 10–13, 2021. Batumi, 2021, pp. 114–118. DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581028. (In Russian)
49. Wang X., Song H., Zha W. et al. *Digital twin Based Validation Platform for Smart Metro Scenarios*. 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). 15 July — 15 Aug. 2021. Beijing, 2021. Pp. 386–389. DOI: 10.1109/DTPIS2967.2021.9540161.
50. Bao L. *Review of digital twin for intelligent transportation system* / L. Bao, Q. Wang, Y. Jiang // *International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT)*. 2021, pp. 309–315. DOI: 10.1109/ICEERT53919.2021.00064.
51. Ali W. A., Roccolli M., Fanti M. P. *Digital Twin in Intelligent Transportation Systems: a Review*. Conference: 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). Istanbul, 2022. DOI: 10.1109/CoDIT5151.2022.9804017.
52. Gapanovich V. A., Popov Yu. I., Vlasov V. V. et al. *Mobil'nyy uchebnyy demonstratsionnyy kompleks* [Mobile training demonstration complex]. Patent RF, no. 2012126762/11, 2013. (In Russian)
53. Kozlov P. A., Chetverikov V. A., Yarikov I. M. *Intellektual'nyy trenazher dlya professional'noy podgotovki dispatcherov* [Intelligent simulator for professional training of dispatchers]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2011, Iss. 10, pp. 29–32. (In Russian)
54. Kozlov P. A., Osokin O. V., Tushin N. A. *Intellektual'nyy trenazher dlya dispatcherov* [Intelligent simulator for dispatchers]. *Mir transporta* [World of transport]. 2012, vol. 10, Iss. 3(41), pp. 180–183. (In Russian)
55. Zelentsov L. B., Pirkov D. V., Alaameri I. A. et al. *Primenenie simulyatora-trenazhera pri podgotovke i perepodgotovke spetsialistov v sfere upravleniya investitsionno-stroitel'nymi proektami* [The use of a simulator in the training and retraining of specialists in the field of management of investment and construction projects]. *Stroitel'noe proizvodstvo* [Construction production]. 2022, Iss. 1, pp. 50–54. DOI: 10.54950/26585340\_2022\_1\_50. (In Russian)
56. Velikanov V. S., Ismagilov K. V., Shabanov A. A. *Trenazhernaya podgotovka kadrov dlya gornoy promyshlennosti kak sistemoobrazuyushchiy faktor v sfere obespecheniya effektivnoy ekspluatatsii gornogo oborudovaniya* [Simulator training of personnel for the mining industry as a system-forming factor in the field of ensuring the efficient operation of mining equipment]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2012, Iss. S2, pp. 153–158. (In Russian)
57. Gabdullin T. R. *Razrabotka obuchayushchikh trenazherov dlya dorozhno-stroitel'nykh mashin* [Development of training simulators for road-building machines]. *Tekhnika i tekhnologiya transporta* [Technique and technology of transport]. 2018, Iss. 4(9), p. 2. (In Russian)