

На правах рукописи



**Давыдов Борис Израильевич**

**МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ СНИЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И  
ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ В ПРОЦЕССЕ ТЕКУЩЕГО  
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ**

2.9.4. Управление процессами перевозок

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Хабаровск - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС)

**Научный консультант:** доктор технических наук, профессор  
**Пазойский Юрий Ошарович**

**Официальные оппоненты:** **Тимухина Елена Николаевна,**  
доктор технических наук, профессор,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», кафедра «Управление эксплуатационной работой», заведующая кафедрой

**Бессоненко Сергей Анатольевич,**  
доктор технических наук, доцент,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», кафедра «Управление эксплуатационной работой», заведующий кафедрой

**Негрей Виктор Яковлевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», кафедра «Управление эксплуатационной работой и охрана труда», профессор

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится «26» апреля 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте РУТ (МИИТ): <https://rut-miit.ru>.

Автореферат разослан «       » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сидоренко Валентина Геннадьевна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Совершенствование текущего планирования и руководства движением поездов является одним из основных способов решения актуальных задач, стоящих перед отраслью. В Стратегии развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года в перечень приоритетов научно-технического развития включено «внедрение оптимизирующих автоматизированных систем управления перевозками на основе процессной производственно-экономической модели эксплуатационной деятельности». Решение этой задачи требует научного осмысления проблемы управления движением поездов, использования современных достижений в областях моделирования сложных процессов, информационных технологий и искусственного интеллекта.

Совершенствуя методы управления движением поездов, выделяют два основных пути развития, один из которых направлен на улучшение привлекательности железной дороги для пользователей транспортными услугами, другой - на повышение уровня технологий перевозочного процесса. В настоящей работе проблема текущего управления рассматривается со второй позиции: как путь улучшения технологии перевозок и эффективности работы компании-перевозчика.

Экстенсивные способы повышения пропускной способности, которые предусматривают модернизацию железнодорожной инфраструктуры, требуют масштабных инвестиций. Альтернативным, более эффективным направлением является применение инновационных технологий управления. Работа в этом направлении признается весьма актуальной.

Чтобы ослабить влияние случайных влияний, движение поездов корректируется в режиме реального времени. Методология онлайн-моделирования, поиска управленческих решений разработана далеко не достаточно, требует дальнейшей научной проработки. Актуальность проблемы совершенствования управления движением подтверждается большим числом исследований и разработок, поддерживаемых ОАО «РЖД» и ведущими зарубежными компаниями.

**Степень разработанности темы исследования.** Принципы и методология оперативного управления являются одним из важнейших разделов транспортной науки, интенсивно развиваются в последние десятилетия. Основы научного осмысления проблем управления железнодорожным движением заложены и развиты трудами отечественных ученых Н.П. Батурина, А.В. Горелика, В.А. Ивницкого, П.А. Козлова, А.Г. Котенко, А.А. Лазарева, А.Л. Лисицына, В.Я. Негрея, В.И. Некрашевича, Ю.О. Пазойского, Е.А. Сотникова, Е.Н. Тимухиной, Л.П. Тулупова, В.А. Шарова и др. Научные школы,

работающие в указанном направлении, созданы во ВНИИЖТ, НИИАС, РУТ (МИИТ) и др. исследовательских центрах. Проблемам управления и моделирования движения поездов посвящены работы А. Бергер, Р. Говерде, А. Д'Ариано, М. Кари, Ф. Кормана, Д. Торнквист, И. Хансена и др. зарубежных ученых.

Основное развитие получили методы и алгоритмы, позволяющие корректировать в реальном времени движение интенсивного потока пассажирских поездов; эти методы не эффективны при управлении грузовым сегментом процесса. Методология текущего планирования и руководства движением поездов на участках магистральной линии со смешанным грузо-пассажирским движением развита слабо. В настоящем исследовании получают свое дополнение и развитие задачи поиска и реализации комплекса решений по гибкому управлению смешанным потоком с использованием временного, экономического и энергетического критериев.

При решении задач управления движением во многих случаях используются детерминированные методы и модели, позволяющие принять оптимальные решения. Менее развит стохастический подход, использование которого дает возможность оценивать технические и экономические риски в процессе построения и корректировки графика. Значительные трудности возникают при принятии диспетчерских решений в сложных и динамичных ситуациях, что требует совершенствования методологии интеллектуальной поддержки работы персонала. Указанные направления нуждаются в дальнейшем развитии.

#### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является разработка методов, моделей и алгоритмов поиска эффективных решений в процессе текущего управления смешанным грузо-пассажирским потоком поездов, направленных на снижение технических и экономических рисков.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- комплексный анализ научного направления как совокупности теоретических основ, методологии и инструментария текущего планирования и руководства движением потока поездов;
- обоснование нового способа организации движения поездов с использованием механизма коррекции графика в реальном времени;
- разработка, исследование моделей формирования и распространения задержек поездов, методик и алгоритмов поиска оптимальных корректирующих решений с использованием механизма моделирования;
- выбор и обоснование критериев оптимального управления движением грузового потока, ориентированных на решение задач реального времени;

- использование приложений теории исследования операций, теории игр при решении задач текущего планирования движения поездов;
- разработка, натурные испытания элементов эффективной технологии текущего планирования и руководства движением поездов.

### **Объект и предмет исследований**

Объектом исследований служит процесс движения смешанного потока поездов по участку железной дороги в условиях влияния совокупности возмущающих факторов и работы системы, ослабляющей отклонения.

Предметом исследований являются закономерности возникновения нарушений процесса движения и методология их устранения посредством эффективного текущего управления движением поездов, использования компьютерной интеллектуальной поддержки диспетчера.

### **Научная новизна работы**

Общий теоретический подход, который основан на учете технических, организационных, экономических аспектов функционирования железной дороги, позволил предложить новые идеи, получить следующие научные результаты:

1. Развита теоретические положения организации информационных и управляющих процессов в системе диспетчерского руководства; предложена модель, описывающая динамическое взаимодействие звеньев системы в процессе принятия и реализации решений по обеспечению пунктуальности и эффективности движения поездов.

2. Предложен способ профилактической диспетчерской регулировки движения поездов на участке железной дороги, который предусматривает проведение оперативной коррекции графиковых времен хода, интервалов пакетного пропуска с целью ликвидации отклонений и снижения уровня экономических рисков.

3. Сформулировано понятие оптимального сценария функционирования участка дороги – сочетания периодов интенсивного и экономичного пропуска грузовых поездов. Предложена методика назначения периодов действия и параметров графика при экономичном пропуске.

4. Исследованы особенности детерминированных алгоритмов при решении задач поиска оптимальных корректировок графика. Показана эффективность моделей меза-уровня, укрупнено описывающих взаимодействие поездов в потоке, и приближенных методов оптимизации при планировании регулирующих действий в реальном времени.

5. Развито направление стохастического моделирования движения поездов, процесса размножения опозданий, использования указанного подхода при

обосновании параметров графика движения. Исследованы механизмы формирования вероятностных характеристик моментов прибытия поездов.

6. Разработана модель, которая отражает динамику показателя экономической эффективности в ходе процесса грузовой перевозки, ориентированная на задачи диспетчеризации. Сформулирован критерий оптимизации как улучшение экономического результата (прибыли) в результате проведенной регулировки.

7. Предложены новые методики поиска рациональных корректирующих решений, использующие положения теории исследования операций (анализа иерархий) и теории игр. Методология иерархического анализа впервые применена для решения задач выбора решений в режиме реального времени.

8. Сформулирована, исследована задача диспетчерского регулирования движения поездов с учетом объема израсходованного энергоресурса. Разработана методология автоматизации оперативного контроля энергии, потребляемой потоком поездов.

9. Решен ряд типовых задач по корректировке графика с использованием методик оптимизации, нового экономического критерия, что служит основой для создания прогрессивной технологии текущего управления движением поездов.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Диссертация восполняет пробелы, которые существуют в исследованиях процесса текущего управления движением, проводимых в России и за рубежом. Основным новшеством является усиление внимания к грузовому сегменту, управление которым обладает значительной спецификой.

Исследование вопросов тонкого регулирования потока поездов путем коррекции графика в реальном времени позволило предложить новую методику проведения профилактической диспетчерской регулировки, другие способы повышения эффективности пропуска потока. В части детерминированных методов обоснования корректировок, предложено ввести энергетический и экономический критерии в оптимизационную задачу. Стохастические модели движения, разработанные автором, позволяют более адекватно прогнозировать процессы возникновения и размножения отклонений от графика. Предложенные модель формирования результата грузовой перевозки и экономический критерий расширяют круг оптимизационных задач.

Результаты исследования вошли в качестве составных частей в разработки ВНИИЖТ, НИИАС, Отраслевого центра внедрения РЖД, направленные на повышение эффективности движения поездов; под руководством соискателя выполнены 24 поисковые работы. Использование результатов позволяет ускорить создание интеллектуальной системы поддержки диспетчерского персонала - сегмента ИСУЖТ.

Разработанные автором технические и организационные решения внедрены на Дальневосточной, Южно-Уральской и ряде других железных дорог. Результаты исследований использованы при разработке руководящих документов ОАО «РЖД»: «Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2020 года» и инструктивно-методических указаний «Снижение небаланса электрической энергии на тягу поездов в границах дорог».

### **Методология и методы исследований**

Общим методическим подходом, который используется при достижении цели исследования, является структурный анализ больших, динамичных технических систем в приложении к задачам оперативного управления процессом движения потока транспортных средств.

Методологический инструментарий, который применяется при анализе процесса функционирования участка железной дороги и решении задач оптимизации движения поездов, включает:

- методологию имитационного моделирования пространственно-временной динамики и энергетики транспортных средств при решении графических задач;
- методы теории графов, теории расписаний и теории игр при поиске рациональных управленческих решений;
- аппарат теории вероятностей и математической статистики при исследовании случайных возмущений процесса движения, их влияния на поток транспортных средств;
- положения микроэкономического анализа, теории исследования операций при разработке методов и критериев поиска эффективных решений.

Для того, чтобы установить связь с методическими подходами, описанными в работах зарубежных ученых, в тексте настоящей диссертации приводятся англоязычные термины. Эти термины соответствуют дефинициям, используемым в отечественной научно-технической литературе.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Иерархическая модель процесса оперативного планирования и руководства движением поездов.
2. Способ проведения профилактической диспетчерской регулировки, реализуемой путем изменения времени хода и интервала пакетного пропуска грузовых поездов.
3. Методика построения оптимального сценария функционирования участка дороги при пропуске потока поездов, предусматривающая выделение интервалов времени с различными режимами движения.

4. Оценка границ реализуемости задачи по определению оптимальных корректировок графика в режиме реального времени.

5. Алгоритм поиска оптимальной диспетчерской регулировки с использованием показателей пунктуальности и экономической эффективности.

6. Новая модель движения поездов меза-уровня, которая описывает процесс распространения задержек в потоке поездов.

7. Стохастическая модель размножения задержек, позволяющая произвести расчет отклонений от графика при любых видах вероятностных распределений времен выполнения операций.

8. Локальный экономический результат как обобщенная оценка качества пропуска грузовых поездов; критерий эффективности диспетчерских регулировок.

9. Методика выбора корректирующих графических решений, основанная на положениях теории исследования операций (методологии анализа иерархий) и теории игр.

10. Методология использования энергетического критерия в процессе выбора решений по корректировке графика в реальном времени и при оценке качества диспетчерского управления.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность выводов и положений диссертационного исследования подтверждается совпадением результатов, которые получены в процессе его выполнения, с частными результатами, описанными в известных работах. Результаты прогнозных расчетов, проведенных с использованием разработанных моделей и алгоритмов, соответствуют характеристикам движения поездов, которые определены на основе анализа реальной статистики. Закономерности в области текущего управления движением, выявленные в диссертации, находятся в согласии с результатами предшествующих исследований.

Обоснованность положений, изложенных в диссертации, также подтверждена положительными результатами НИР, выполненных под руководством соискателя по грантам РФФИ (2012 г.), ОАО «РЖД» (2016 г.) и Минтранса РФ (2020 г.).

Разработанные модели и алгоритмы оценены исследователями в области оперативного управления, о чем свидетельствуют показатели цитирования в российских и мировых индексах. Автором реализовано предложение ведущего мирового издательства (InTechOpen), опубликованы (в соавторстве) материалы исследований в виде главы коллективной монографии. Соискатель включен в состав научных комитетов трех международных конференций (WIT, TSTP, WCTRS).

Результаты исследований и разработок, выполненных соискателем, доложены и обсуждены на следующих научных и научно-технических форумах:

- Всероссийских научно-технических конференциях: «Транспорт России: проблемы и перспективы» (2007, 2008, 2009, 2014), двадцати других Всероссийских и региональных форумах по проблемам транспорта (2001-2021);

- международных научно-технических форумах: «Информационные технологии на железнодорожном транспорте» (1998 - 2002), «Электрификация, развитие энергосбережения на железнодорожном транспорте (2005), «Развитие инфраструктуры транспорта и технологий перевозочного процесса» (2007), «Подвижной состав XXI века» (2008), «Международное сотрудничество в области научного и кадрового сопровождения транспортных коридоров» (2009), «Транспорт России: проблемы и перспективы развития БАМ» (2010), «Российский международный конгресс по интеллектуальным транспортным системам» (2013, 2014); «Открытые эволюционирующие системы: цифровая трансформация» (2022);

- международных научных конференциях по проблемам управления движением поездов и энергоэффективности (Derby, UK, 2008; Prague, CzechRep., 2009; Niigata, Japan, 2009; Rome, Italy, 2011, 2014; Venice, Italy, 2013; Seville, Spain, 2014; Tokyo, Japan 2015; Shanghai, China, 2016; Madrid, Spain, 2016, 2017; Lille, France, 2017; Katowice, Poland, 2017, 2019, 2021; Lisbon, Portugal, 2018; Barcelona, Spain, 2018; Санкт-Петербург, 2019; Mumbai, India, 2019; Владивосток, 2019; Berlin, Germany, 2020; Beijing, China, 2021).

Результаты исследований и разработок, постановочные вопросы доложены соискателем на заседаниях секций НТС МПС РФ (29 июня 2002 г., 14 ноября 2003 г., 22 мая 2004 г.). Материалы исследований использованы при разработке двух руководящих документов ОАО «РЖД».

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения и приложения. Текст диссертации изложен на 258 страницах. Работа содержит 80 рис., 19 табл.; список литературы включает 304 источника.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** сформулированы цель, задачи и направления исследования. Определено, что важным способом повышения эффективности процесса текущего управления является корректировка графика движения поездов в реальном времени. На решение этой задачи направлены усилия исследователей многих стран. В России указанные работы возглавляют ученые ВНИИЖТ, РУТ (МИИТ) и НИИАС. За рубежом ведущие научные школы, разрабатывающие

проблемы оперативного управления движением, функционируют в Нидерландах, Германии, Великобритании, Италии, США.

Проведен аналитический обзор источников по проблеме. Определено, что область задач коррекции смешанного потока поездов исследована далеко недостаточно. Обоснована необходимость комплексного подхода к решению указанных задач, который охватывает вопросы моделирования, поиска оптимальных решений во взаимодействии диспетчерского персонала с системой интеллектуальной поддержки (СППР), а также четкой реализации регулировок. Показано, что повышение эффективности решений требует использования методов теории расписаний и теории исследования операций. Сформулирована задача определения критериев оптимизации процесса пропуска смешанного потока поездов. В качестве основной целевой установки исследования принята реализация процесса корректировки графика движения в реальном времени с целью профилактики и ликвидации отклонений, что направлено на снижение технических и экономических рисков.

**Раздел 1** диссертации исследует закономерности, развивает принципы оперативного управления движением на участке и направлении железной дороги. Концепция гибкого управления разработана в трудах советских ученых К.А. Бернгарда, А.Д. Каретникова, В.П. Феоктистова и др. На современном этапе эту проблему исследовали Л.А. Баранов, В.А. Ивницкий, П.А. Козлов, А.Л. Лисицын, В.И. Некрашевич, Ю.О. Пазойский, Е.А. Сотников, Л.П. Тулупов, И.Н. Шапкин и др. Реформирование РЖД, которое произошло в начале 21 века, актуализировало задачи улучшения экономических показателей перевозок. Это вызвало увеличение числа работ, в которых рассматриваются различные аспекты проблемы текущего планирования и руководства движением поездов. За рубежом интерес к проблемам оперативной коррекции графика возник в последней декаде прошлого столетия. Исследования в указанном направлении проводят научные школы, которые возглавляют I. Hansen (Нидерланды), R. Goverde (Италия), A. Berger (Германия), J. Törnquist (Швеция), M. Carey (Великобритания) и др.

Исходное распределение резервов времени и других ресурсов, заложенное в нормативный график движения, не позволяет избежать потерь при возникновении случайных отклонений. Выходом из положения является использование методов эффективной коррекции графика в реальном времени. Задача оптимизации движения потока поездов трактуется как поиск наилучшего распределения резервов между элементами процесса.

Обобщенная модель процесса оперативного управления движением поездов построена на основе системного анализа предметной области. Модель отражает иерархическую структуру системы, включает набор колец регулирова-

(рисунок 1). Железнодорожные перевозки рассматриваются как процесс, преобразующий совокупность ресурсов в транспортную услугу. Перестройка процесса и поддержание его в новом состоянии осуществляются путем корректировки целевых установок и обеспечения обратных связей.

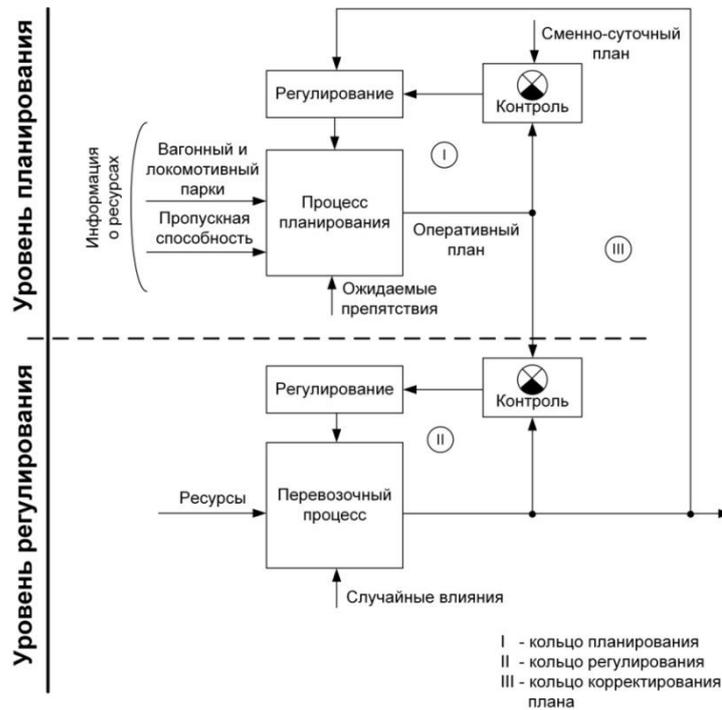


Рисунок 1 - Обобщенная схема оперативного управления движением

Традиционный подход к оперативному управлению железнодорожным участком или направлением основан на принципе обеспечения движения поездов по жесткому графику. Корректировка движения при возникновении отклонений направлена на повышение точности его выполнения. Это обосновано в периоды пропуска пассажирских поездов и грузовых поездов «ядра». Такой подход не предусматривает различий характеристик управления в периоды нормального, облегченного и затрудненного функционирования участка дороги. Новая методика корректировки графика основана на положении: движение рядовых грузовых поездов не требует обеспечения локальной пунктуальности. Методика предполагает вариативность нормативов графика (времен хода, остановок, интервалов пакетного пропуска) в грузовом сегменте, которая целенаправленно реализуется в реальном времени при изменении характеристик потока или состояния инфраструктуры. При этом снижаются уровень задержек и экономические потери.

Обосновываются способы оперативного корректирования графика движения, направленные на снижение влияния потока возмущений. **Групповой** способ ориентирован на профилактику множественных конфликтов. Основным вариантом является введение добавок к перегонным временам хода - по всему пакету поездов. Способ **прицельного регулирования** предполагает корректи-

ровку движения отдельного поезда для исключения межпоездных конфликтов, реализации энергоэффективной траектории.

Алгоритм текущего перепланирования включает три блока. Первый из них определяет полосы графика, в которых будут применены интенсивный или экономичный режимы пропуска (см. рисунок 2). Второй предполагает указание порядка отправления грузовых поездов с узловых (технических) станций с учетом их приоритетности – коммерческой и технической. Третий блок предусматривает назначение каждому поезду (индивидуально) или группе поездов оптимизированной траектории движения.

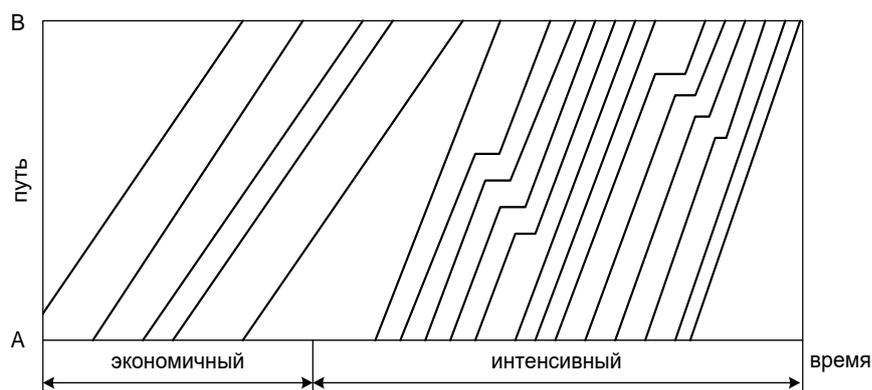


Рисунок 2 - Разделение потока на экономичный и интенсивный сегменты

**Интенсивный** режим назначается в период, когда требуется максимально полное использование пропускной способности участка. Когда плотность грузового потока снижена, решается задача другого плана – экономии затрат на пропуск поездов. На период действия **экономичного** режима вводятся дополнительные добавки к времени хода, что снижает отклонения и потери. Оптимальный сценарий функционирования участка предусматривает выделение групп грузовых поездов, которые пропускаются с использованием различных режимов, на основе критерия экономической эффективности.

В задачах по снижению влияния потока возмущений наиболее часто используются микро-модели, отражающие движение поездов с дискретностью до блок-участка. Расчетное время, которое затрачивается на поиск оптимальных решений по корректировке графика на протяженных участках (более 100 км), велико – порядка нескольких минут. Размерность задачи уменьшается на порядок при переходе от микро- к меза-модели, которая укрупнено описывает инфраструктуру и процесс распространения задержек. Основываясь на этой идее, мы отобразили возмущенное движение поездов в виде **дерева взаимовлияний**. В предложенной модели узел графа отражает акт конкуренции между поездами за занятие некоторого участка. Рисунок 3 иллюстрирует процесс распространения опоздания поезда №1 на другие поезда на входной границе участка  $IN$  и в сечениях графика  $A$  и  $B$ . Утолщенные дуги

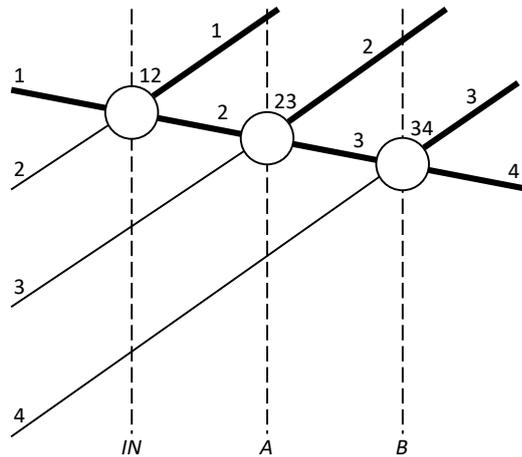


Рисунок 3 - Фрагмент дерева взаимовлияний в потоке поездов

отражают операции, которые реализуются с задержками. Предложенный подход эффективен при вероятностном моделировании процесса движения.

Анализ, проведенный в разделе 1, позволил определить следующие основные направления исследований:

- усовершенствовать методологию детерминированного и вероятностного моделирования движения поездов, используемого в процессе оперативной коррекции графика;

- разработать концептуальные положения и методику динамического оценивания качества процесса продвижения поезда по маршруту, учета последствий отклонений от графика и эффективности мер по их устранению;

- использовать приложения теории исследования операций и теории игр для повышения качества принятия решений по управлению движением;

- провести практическую апробацию новых способов планирования и регулирования движения поездов.

В разделе 2 исследуются особенности детерминированного моделирования с целью определения возможности решения графиковой задачи в реальном времени. Методология корректировки графика основана на положениях теории расписаний. При решении задачи поиска эффективных регулировок используется двухуровневая оптимизационная модель. Верхний уровень служит для определения порядка и траекторий движения поездов жесткого расписания (пассажирских, контейнерных и др.) по критерию соблюдения графика. На нижнем уровне производится выбор вариантов движения рядовых грузовых поездов по критериям расходов или прибыли.

Проанализирована применимость концепции динамического управления движением поездов (RDTM) при поиске оптимальных решений в реальном времени. Имитационная модель строится с использованием микромодели движения. На первом этапе производится обнаружение конфликтов между поездами, их урегулирование путем смещения соответствующих слотов по оси

времени, на втором этапе – перестройка скоростных траекторий. Конфликт также может быть устранен путем изменения порядка движения поездов. Исходными данными для расчета служат нормативный график, информация о фактическом положении поездов, состоянии инфраструктуры и подвижного состава.

Задача построения бесконфликтного графика основывается на представлении движения в виде вариантного графа. Траектория каждого поезда отображается совокупностью дуг, каждая из которых соответствует операции движения по элементу пути (рисунок 4). Узел  $O_i$  отражает момент  $t_i$  начала  $i$ -й операции движения поезда  $A$ ,  $O_j$  - движения поезда  $B$ . Пара узлов, которая

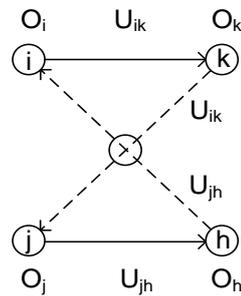


Рисунок 4 - Фрагмент, отражающий выбор очередности пропуска поездов характеризует движение конфликтующих поездов, соединена встречными (альтернативными) дугами. В процессе поиска кратчайшего пути производится выбор одной из дуг:  $(k, j) \vee (h, i)$ . При этом соблюдается ограничение, учитывающее защитный интервал  $b_{ij}$ :  $t_j \geq t_k + b_{ij}$ .

Если используется система автоматики с фиксированными блок-участками, каждый узел соответствует сигналу, а вес дуги представляет собой интервал блокировки элемента пути. Первичный граф моделирует движение в границах диспетчерского круга. Граф сетевого уровня обеспечивает координацию решений, выработанных локальными планировщиками.

Задача оптимизации формулируется как поиск такого момента  $t_n$  выполнения конечной операции по каждому поезду, который соответствует самому короткому его маршруту из всех реализуемых путей  $l^s(0, n)$  в графе. Задача по поиску оптимального варианта расписания движения записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} (t_n - t_0) \rightarrow \min; \quad (t_i - t_j) \geq b_{ij}; \quad u_{ij} \in F \\ (t_j - t_i \geq b_{ij}) \vee (t_k - t_h) \geq b_{hk}; \quad (u_{ij}, u_{hk}) \in L \end{aligned}$$

Акт разрешения каждого межпоездного конфликта диктуется правилом «первым пришел – первым обслужен» (*FCFS*). Совокупность отобранных дуг  $S$

является согласованной, если в подграфе  $G(S)$  отсутствуют циклы положительной протяженности.

При решении оптимизационной задачи ограничениями служат величины минимального интервала пакетного пропускa, разрешенной скорости. Кроме того, учитываются нескоростные ограничения: длина путей на станциях, конечная нагрузочная способность системы электроснабжения и др.

Конкуренция за занятие участка моделируется фрагментом графа, показанным на рисунке 5б. Условием возникновения конфликта в точке 3 является соотношение:  $|t_3^A - t_3^B| \leq \tau_{\text{огз}}$ . Разрешение конфликта производится путем смещения момента входа поезда  $B$  на участок или уменьшения скорости поезда  $A$ .

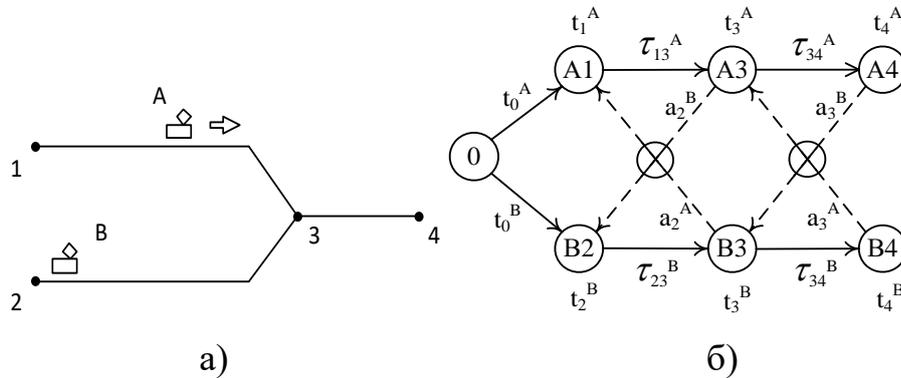


Рисунок 5 - Схема (а) и фрагмент вариантного графа (б) движения поездов

Граф на рисунке 6 моделирует ситуацию подхода пары поездов к станции и их движения по станционным путям. Медленный поезд  $A$  совершает графиковую остановку на станции, скорый поезд  $B$  следует без остановки по свободному пути. Веса фиксированных дуг соответствуют значениям ходового времени на элементах пути, за исключением дуги  $(Ah, A8)$ , отражающей графиковый остановочный интервал.

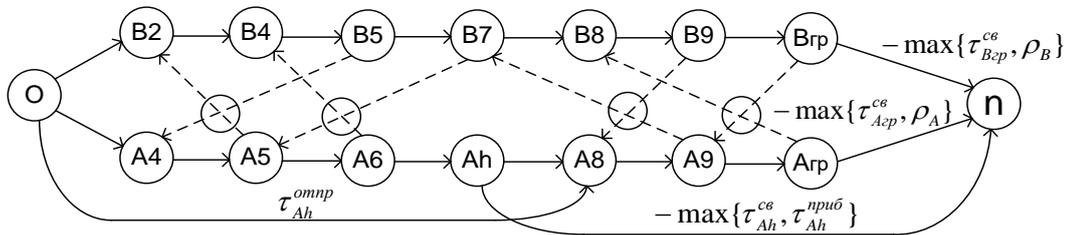


Рисунок 6 - Вариантный граф процесса пропуска поездов по станции

Необходимость принятия решений по порядку предоставления элемента для следования одного из поездов возникает на участках 4, 5, 8, 9, поэтому в графе присутствуют четыре пары альтернативных дуг. Остановка поезда  $A$  определяется наличием двух дуг:  $(0, A8)$  и  $(Ah, n)$ . Длина последней  $-\max\{\tau_A^{ce}, \tau_A^{omnp}\}$  соответствует заново установленному моменту отправления поезда. Выбор

скоростных режимов и очередности прохождения горловины станции позволяет уменьшить опоздания поездов.

Модель интервального регулирования отражает динамику движения пары поездов по трем последовательным блок-участкам. Операции движения представляются узлами  $\mu(\cdot)$ ,  $i$ ,  $\sigma(\cdot)$  (рисунок 7). Моменты вступления поезда на блок-участки обозначаются как  $t_{\mu i}$ ,  $t_i$ ,  $t_{\sigma i}$ , время хода по элементу  $i$  – как  $\tau_i$ . Степень безопасности при сближении поездов оценивается по величине буферного интервала:  $\tau_\beta = (t_j - t_i) - \tau_{\mu j} - \tau_i - \tau_{ij}$ .

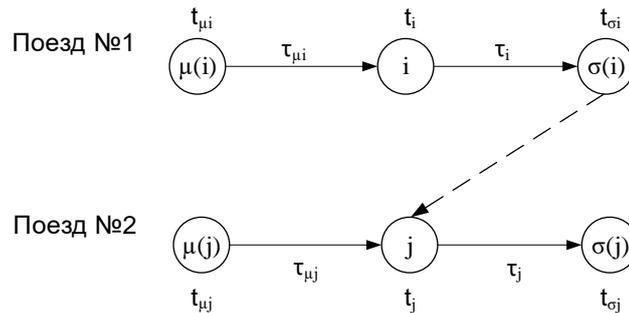


Рисунок 7 - Фрагмент, отражающий процесс интервального регулирования

На первом этапе выбора оптимальных корректировок графика, снижающих уровень конфликтов, в качестве критерия используется показатель пунктуальности. В последующем определяются очередность и режимы следования грузовых поездов с учетом экономического критерия. Чтобы оценить возможность решения этой задачи в реальном времени, разработана и исследована обобщенная динамическая графиковая модель. Движение поездов трактуется как задача выполнения  $J$  работ (поездов) с использованием совокупности из  $I$  машин (блок-участков). Целевая функция отражает затраты на пропуск  $j$  поездов в течение планового периода  $T$  и вероятные штрафные санкции за их опоздания:

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \left( C_{jt}^0 + \sum_{i \in I_t} C_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I_t} C_{ij}^{ocm} k_{ij} + \sum_{j \in J} C_j^{ump} t_j^{ump} \right) \rightarrow \min ,$$

где  $C_{jt}^0$  - накопленный объем затрат до момента перепланирования;  $C_{ij}$  - удельный расход ресурса на единицу работы,  $C_{ij}^{ocm}$  - потеря при остановке поезда,  $C_j^{ump}$  - штраф за единицу времени опоздания. Ограничениями служат допускаемые значения опозданий по прибытию на станцию назначения (или техническую станцию), а также порядок выполнения операций.

Эксперименты по решению оптимизационных задач с использованием методики частично-целочисленного линейного программирования показывают, что требование соблюдения расчетного времени порядка одной минуты выполняется для небольшого участка – не более 50 км. Для полигона

протяженностью 200 км (число элементов – порядка тысячи единиц) и интервала прогноза, равного шести часам, время расчета оптимальных корректировок графика превышает 10 мин., что является недопустимым при поддержке работы диспетчера. Метод декомпозиции с поиском оптимальных решений в локальных зонах и совмещением граничных расписаний позволяет ускорить расчеты в 1,5-2 раза, чего недостаточно. Перспективным путем является использование эффективных эвристик. Расчетное время снижается до одной минуты при уровне ошибок порядка 10 проц.

Процесс определения корректировок графика включает три этапа. На первом этапе обнаруживаются и разрешаются конфликты при использовании стандартных маршрутов. В рамках второго этапа в зонах конфликтов изменяются скоростные траектории. При проведении процедуры обновления графа отбрасываются те альтернативные пары, для которых время скорректированного хода  $t_{ij}^{корр}$  превышает значение  $t_{ij}^{тек}$ . Тем самым на каждой итерации снижается размерность задачи. Это позволяет алгоритму сосредоточиться только на тех конфликтах, которые еще могут быть исключены путем последующей перестройки графика. Итеративный процесс продолжается до тех пор, пока не получается решение с допускаемыми скоростями или фиксируется отказ в построении графика.

Построение алгоритма расчета корректировок отражено на рисунке 8.

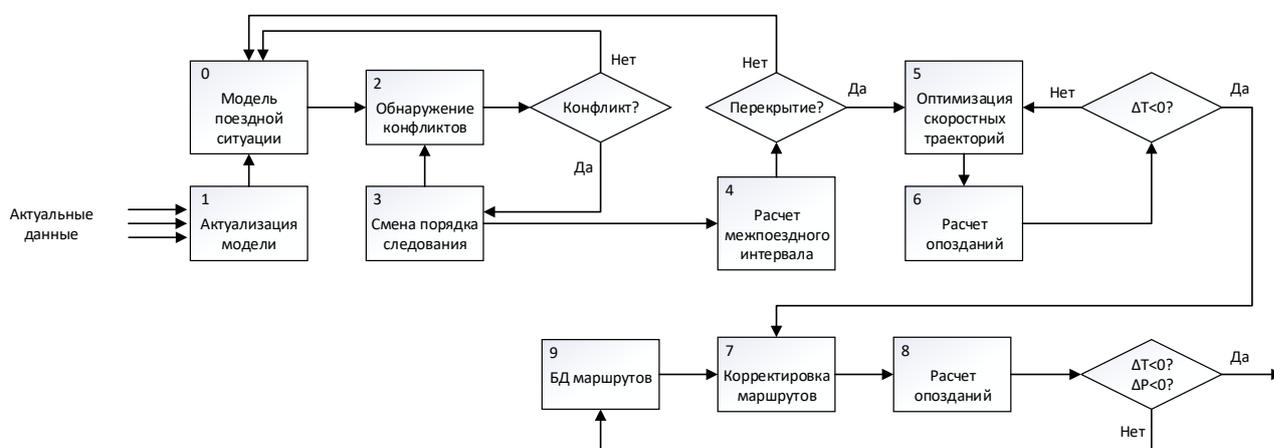


Рисунок 8 - Логическая схема алгоритма корректировки графика

На каждом шаге имитационного процесса проверяется наличие межпоездного конфликта (модуль 2). Если конфликт обнаружен, запускается выполнение задачи 3 по смещению интервалов или перестройке порядка следования поездов. Когда обнаруживается перекрытие блокировочных времен, эта информация передается в модуль 5, который вырабатывает вариант регулировки со сменой скорости. Если указанные перестройки не позволяют

устранить конфликт, производится корректировка маршрутов следования поездов по путям станций (модуль 6).

Тестовые задачи решались с использованием схемы ветвей и границ. Алгоритм корректировки графика разработан с использованием языка C++. В модуле определения оптимальных решений применялся программный пакет CPLEX 6.0. Решение тестовых задач по поиску оптимальных корректировок графика проведено для типовых сценариев, которые характеризуются различным набором первичных задержек. Моделирование выполнялось для участка дороги с движением грузовых тяжеловесных поездов (6300 т.) протяженностью 96 км. Участок двухпутный, включает 4 станции и 5 перегонов. Число блок-участков составляет 265. Интенсивность движения принята равной 7 парам поездов в час, что характерно для пиковых периодов. В расписание движения поезда по участку заложено добавочное время, равное 24 мин. Полагалось, что поезда прибывают на участок с задержками, распределенными равномерно в интервале от 0 до  $\Delta t_{\max}^{\text{он}}$ .

Моделировались 27 ситуаций, в которых неисправность локализовывалась на одном блок-участке, и 9 ситуаций с серьезными отказами, когда неисправности возникали на различных частях участка. Исследована работа алгоритма при разных значениях интервала прогнозирования: 1, 3 и 6 ч. При горизонте, равном 3 ч., расчетное время не превышает 14 с. Когда горизонт достигает 6 ч., среднее расчетное время составляет 503 с. Полученные результаты подтверждают, что точный алгоритм позволяет получать оптимальное решение (за приемлемое время) лишь для коротких участков. Для диспетчерских кругов протяженностью более 200 км, характерной для главных линий РЖД, расчетное время значительно превышает одну минуту, что препятствует использованию точных алгоритмов в СППР реального времени. Выходом из положения является применение эффективных эвристик.

Решена тестовая задача определения совокупности регулировок, оптимизированной по критерию потребления энергии. В серии из 25 экспериментов по корректировке шестичасового графика движения грузовых поездов наблюдались (в среднем) 87 итераций, направленных на подстройку скорости. За этот период на участке реализовывались нитки 32 поездов, из них до десяти полагались опаздывающими. В результате урегулирования конфликтов исключены по каждому поезду 1,9 потенциальных неграфиковых остановок. Оптимизация скоростного режима, проводимая с целью профилактики единичного конфликта, дает по грузовому поезду с массой 6,3 тыс. т. экономию электроэнергии, как минимум, равную 100 кВтч. Полный расход ресурса при следовании поезда на модельном участке протяженностью 96 км. оценивается значением 4,3 тыс. кВтч. Корректировки графика, прове-

дение которых рекомендует алгоритм, позволяют в 2–3 раза уменьшить опоздания поездов и снизить расход энергии на тягу более, чем на 5 проц.

Результаты, полученные при моделировании, оказываются достаточно близкими показателям, которыми характеризуется движение на реальных железных дорогах. Экспериментальные исследования характеристик движения на различных участках Транссибирской магистрали, проведенные в рамках настоящей работы, показывают, что на 100 км пути среднее число неграфиковых остановок грузового поезда составляет 1,2 ед. При сгущении потока до интенсивности, равной семи поездам в час, число задержек возрастает, в отдельные периоды превышая 2 ед. Моделирование движения дает расчетный результат (1,9 задержек), в достаточной мере соответствующий реальности.

**В разделе 3** рассмотрены вопросы стохастического моделирования и его использования в процессе корректировки графика движения поездов. При построении прогноза учитываются, помимо информации о текущей ситуации, вероятностные характеристики времен хода и задержек поездов. Результатами расчета являются распределения моментов прибытия или интервалов между поездами, на основе которых определяются места конфликтов, оценивается эффективность мер по предупреждению отклонений.

Предложена обобщенная однопоездная модель, которая описывает процесс формирования отклонений от графика, вызванных возмущающими влияниями. Эту модель иллюстрирует фрагмент графика движения (рисунок 9). Рассеяние моментов отправления со станций, времен хода и стоянок отображаются в виде «пакетов» линий хода поезда. Расчет распределения моментов прибытия на

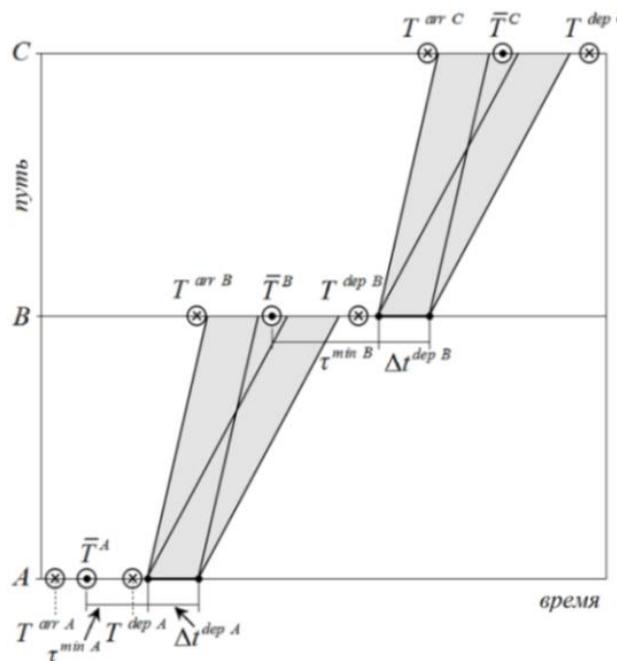


Рисунок 9 – Модель процесса накопления случайных отклонений

конечную станцию (или отклонений от графика) основывается на много-кратном использовании функции свертки распределений случайных величин, характеризующих операции движения и остановок.

Поездной диспетчер при принятии решения по ликвидации отклонения фокусирует свое внимание на паре поездов, которые вовлечены в конфликт. В основу решения кладется двухпоездная модель. Базовым сценарием является возникновение задержки последующего поезда вследствие неплановой остановки поезда-лидера, продолжительность которой характеризуется распределением  $F_1^d(t)$  (рисунок 10а). Статистическая характеристика времени прибытия поезда №2 на станцию  $B$  формируется под влиянием случайных времен хода и первичной задержки в пути следования. На промежуточной станции в процесс вмешивается диспетчер, что ведет к трансформации выходного распределения (рисунок 10б). Рассеяние времени прибытия поезда №2 на станцию  $C$  определяется, помимо случайных влияний, регулируемыми воздействиями машиниста и диспетчера.

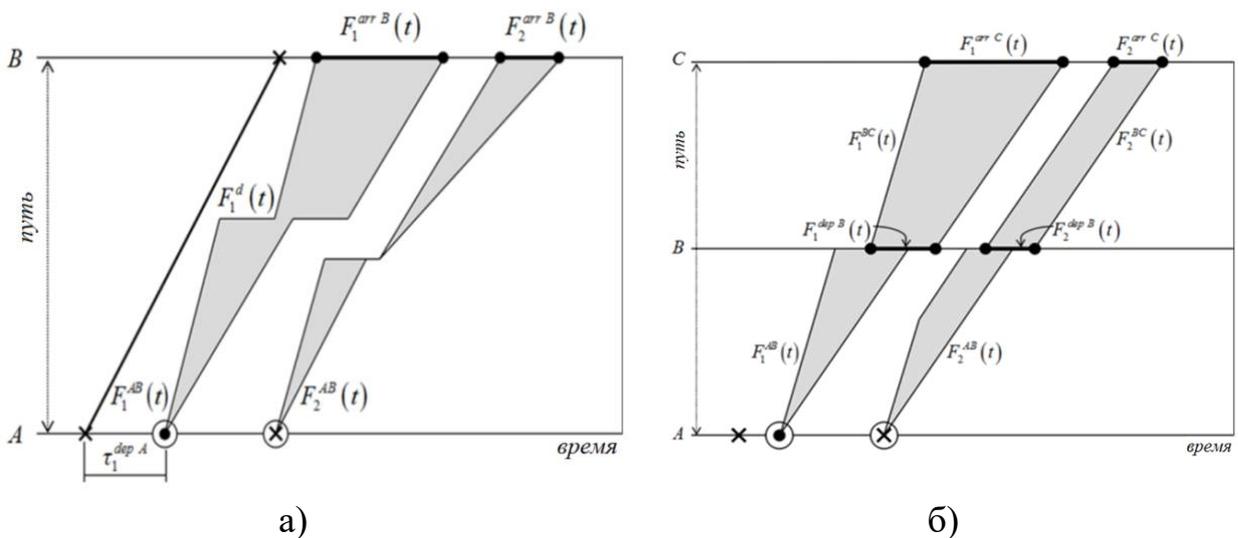


Рисунок 10 - Графическая интерпретация движения пары поездов  
а) с неграфиковой остановкой на перегоне; б) с задержкой на станции

При построении модели формирования задержек в плотном потоке полагается, что поезд-лидер №1 совершает неплановую остановку со случайной продолжительностью  $\tau_1$ . При малом интервале задержка распространяется на последующие поезда (рисунок 11).

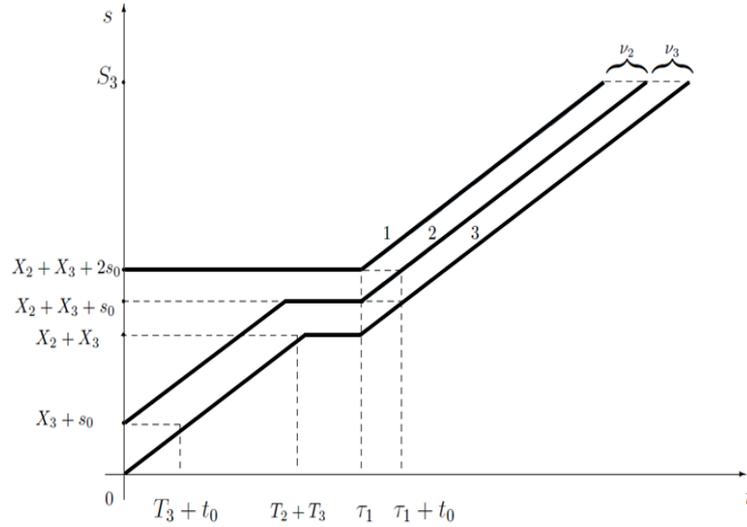


Рисунок 11 - Модель, используемая при расчете вторичных задержек

Интервал при отправлении равен  $X_j + s_0$ , где  $X_j$  – независимые одинаково распределенные случайные величины,  $s_0 > 0$  – минимальное безопасное расстояние. Интервал прибытия между поездами первой пары равен:  $v_2 = T_2 - \tau_1 + t_0$ . Учитывая, что  $f(x)$  и  $g(x)$  – плотности величин  $X_2$  и  $\tau_1$ , а суммарное распределение плотностей независимых величин характеризуется их сверткой, получаем распределение выходного интервала  $v_2$ :

$$P(v_2 < t) = P(T_2 - \tau_1 \geq 0)P(T_2 - \tau_1 + t_0 < t) + P(T_2 - \tau_1 < 0)F_0(t).$$

где  $F_0(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t \leq t_0, \\ 1, & \text{если } t > t_0. \end{cases}$

Соответствующая функция плотности вероятностей первого интервала прибытия имеет вид:

$$p_2(t) = v_0^2 \left( \int_0^\infty f(v_0(t - t_0 + y))g(y)dy \right) \int_0^\infty \int_0^\infty f(v_0(x + y))g(y)dy dx, \quad t > t_0$$

Плотность следующего интервала  $v_3$  определяется двойной сверткой:

$$\begin{aligned} p_3(t) = & v_0^2 f(v_0(t - t_0)) \int_0^\infty \int_0^\infty f(v_0(x + y))g(y)dy + \\ & + v_0^3 \int_0^\infty \left[ \left( \int_0^\infty f(v_0(y - t))g(y)dy \right) \left( \int_t^\infty f(v_0 z)dz \right) \right] \times \\ & \times \left( \int_0^\infty f^2(v_0(t - t_0 + y))g(y)dy \right), \quad t > t_0 \end{aligned}$$

Обобщенная задача рассматривает движение пакета из  $n$  поездов. Моменты отправления включают значения случайной величины  $T_j$ :

$$T^{(m)} = \sum_{j=2}^m T_j + (m-1)t_0, \quad m = 2, 3, \dots, n.$$

Полагаем, что первичная задержка в пути следования вызывает  $N$  вторичных. Функции распределения второго и последующих интервалов прибытия имеют вид:

$$W_2(t) = I(t > t_0) P(\tau + t - t_0 > T_2), \quad I(x \in A) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in A, \\ 0, & \text{если } x \in R \setminus A, \end{cases}$$

$$W_k(t) = I(t > t_0) \left[ P\left(T_k < t - t_0, \tau < \sum_{j=2}^{k-1} T_j\right) + P\left(\tau + t - t_0 > \sum_{j=2}^k T_j, \tau \geq \sum_{j=2}^{k-1} T_j\right) \right], \quad 3 \leq k \leq n.$$

При расчете выходного распределения используем известную закономерность: продолжительность первичных задержек подчиняется экспоненциальному закону  $g(x) = I(x > 0) \lambda e^{-\lambda x}$ ,  $\lambda > 0$ . При этом функция распределения интервалов прибытия поездов приобретает вид:

$$W_k(t) = I(0 < t - t_0 \leq T) e^{-\lambda((k-1)T - t + t_0)} + I(t - t_0 > T).$$

На рисунке 12 изображены графики функций распределения выходных интервалов  $W_k(t)$  для тройки поездов. Параметры потока и распределения величины  $\tau_1$  соответствуют грузовому движению по железным дорогам России:  $\lambda = 0,26$  1/мин,  $t_0 = 4$  мин,  $T = 7$  мин.

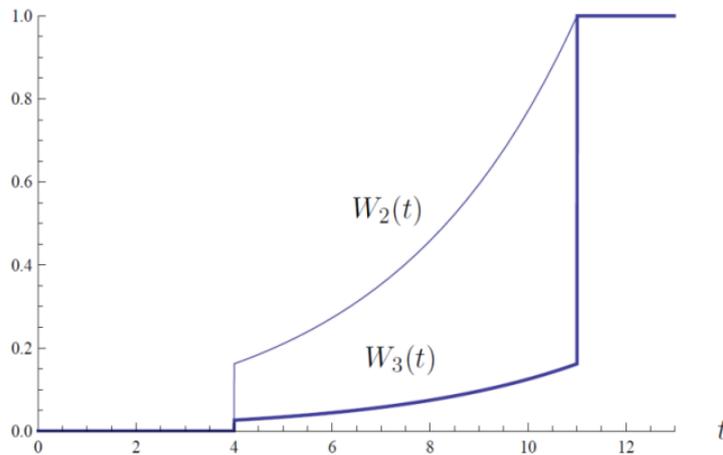


Рисунок 12 - Функции распределения выходных интервалов

Закключаем, что влияние задержки на отдаленные поезда в цепи достаточно мало: при  $k > 3$  функция  $W_k(t)$  близка к  $W(t) := I(t > t_0 + T)$ ; исходный размер интервала быстро восстанавливается.

В расширенной модели учитывается случайный характер как неграфических задержек в пути, так и моментов отправления поездов со станций. Интервал отправления во многих случаях подчиняется нормальному закону:

$$\psi = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{(x-T)^2}{2\sigma^2}} = \varphi(x, T, \sigma^2)$$

Распределение интервалов прибытия поездов для этого случая получено также с использованием операции свертки входных функций. Рисунок 13 показывает, что с увеличением номера кривые распределения сближаются, в пределе - совпадают. Это отражает тенденцию к стабилизации вероятностных характеристик интервалов прибытия последующих поездов, на которые распространяется задержка.

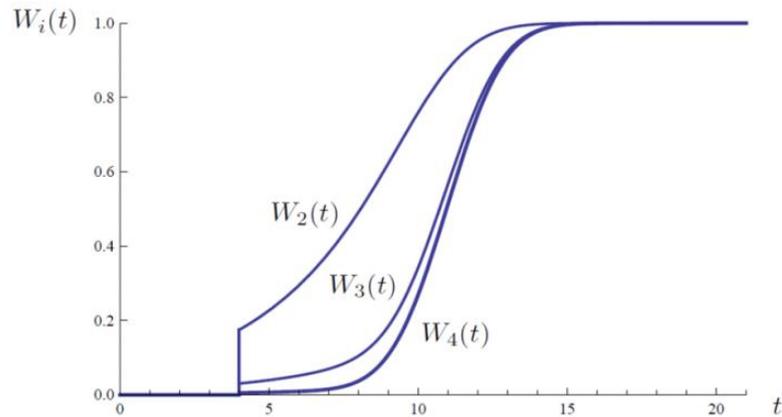


Рисунок 13 – Распределение интервалов с учетом рассеяния при отправлении

Предложенная модель позволяет определить значение интервала, который гарантирует определенное число задержек. Если задана вероятность  $p$  того, что произойдет не менее  $m$  вторичных задержек (уровень риска), то интервал рассчитывается по формуле:

$$T(m, p, \lambda) = \frac{1}{m\lambda} \ln \frac{1}{p}.$$

На рисунке 14 показано поведение величины  $T(m, p, \lambda)$  как функции от числа задержек  $m$  при уровнях риска  $p = 0.1$  и  $p = 0.05$ .

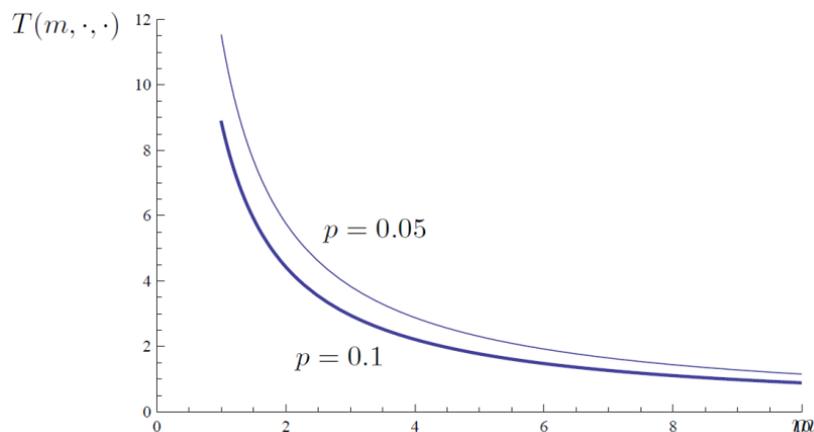


Рисунок 14 - Зависимость минимального интервала от допустимого числа задержек

Рассчитаны величины интервала пакетного следования, исходя из статистики моментов отправления и отклонений времен хода по участкам сети РЖД. Так, условие обеспечения не более, чем двух вторичных задержек, выполняется при отправлении грузовых поездов со средним интервалом, равным 8,5 мин. Если гарантируется не более одной задержки, эта величина составляет 13 мин. Полученные оценки согласуются со значениями графика интервала, устанавливаемого на железных дорогах России (10 - 14 мин.). Такое нормативное значение интервала принято эмпирически, на основе предшествующего опыта. При этом удается поддерживать среднее число неграфиковых задержек на уровне 1-1,5 ед. на 100 км. пути.

Принимая описанный модельный механизм формирования задержек, следует ожидать интенсивного роста дисперсии моментов прибытия по мере продвижения поезда по маршруту. На практике эффект расширения поля рассеяния выражен слабо, что обусловлено наличием регулирования, производимого машинистом и диспетчером. Машинист, стараясь прибыть по расписанию, в некоторой точке  $s_3$  изменяет скоростной режим (рисунок 15б). Это отражается сужением зоны рассеяния. Скобкой на графике отмечена проекция носителя плотности  $f(t; s_2)$  моментов прибытия на  $s_2$ .

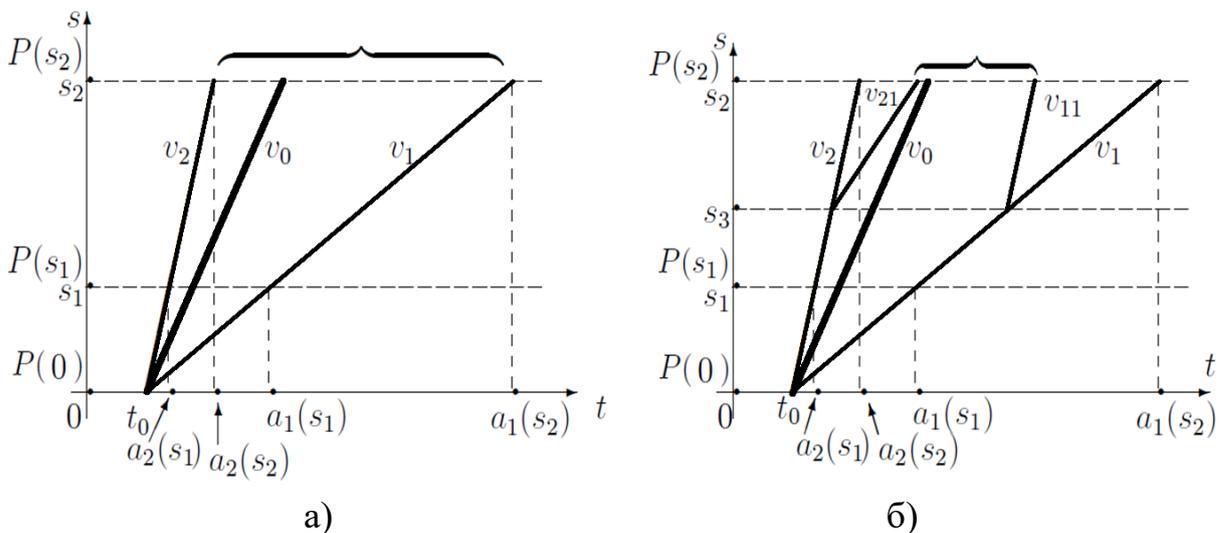


Рисунок 15 - Модель движения поезда с учетом рассеяния времени хода  
а) при отсутствии подстройки скорости; б) при наличии подстройки

Показано, что плотность распределения моментов в произвольной точке пути  $s$  связана с плотностью в предшествующей точке  $s_1$  зависимостью:

$$f(t; s) = \frac{1}{|A(s)|} f\left(\frac{t-B(s)}{A(s)}; s_1\right), \quad s_1 \leq s \leq s_2,$$

где  $A(s) = \frac{a_1(s)-a_2(s)}{a_1(s_1)-a_2(s_1)}$ ,  $B(s) = \frac{a_2(s)a_1(s_1)-a_2(s_1)a_1(s)}{a_1(s_1)-a_2(s_1)}$ ,  $a_i(s)$  – моменты прохождения соответствующих точек пути.

Характер функции распределения моментов прибытия в результате текущей коррекции скорости не изменяется. Регулирование предотвращает «расползание» распределения, что, в свою очередь, приводит к меньшему риску возникновения отклонений от графика.

Результаты анализа статистических данных о движении поездов подтверждают выявленную закономерность. Рассеяние моментов прибытия подчиняется гамма-распределению, характер его сохраняется при движении поездов по маршруту. Характер среднеквадратического отклонения (СКО) всегда возрастающий (см. рисунок 16); скачки СКО наблюдаются в пунктах, где присутствует влияние интенсивных возмущений, например, на станциях массовой посадки/высадки пассажиров. Отклонения математического ожидания (МО) моментов прибытия существенно слабее - благодаря усилиям диспетчерского персонала, работников станций и машинистов.

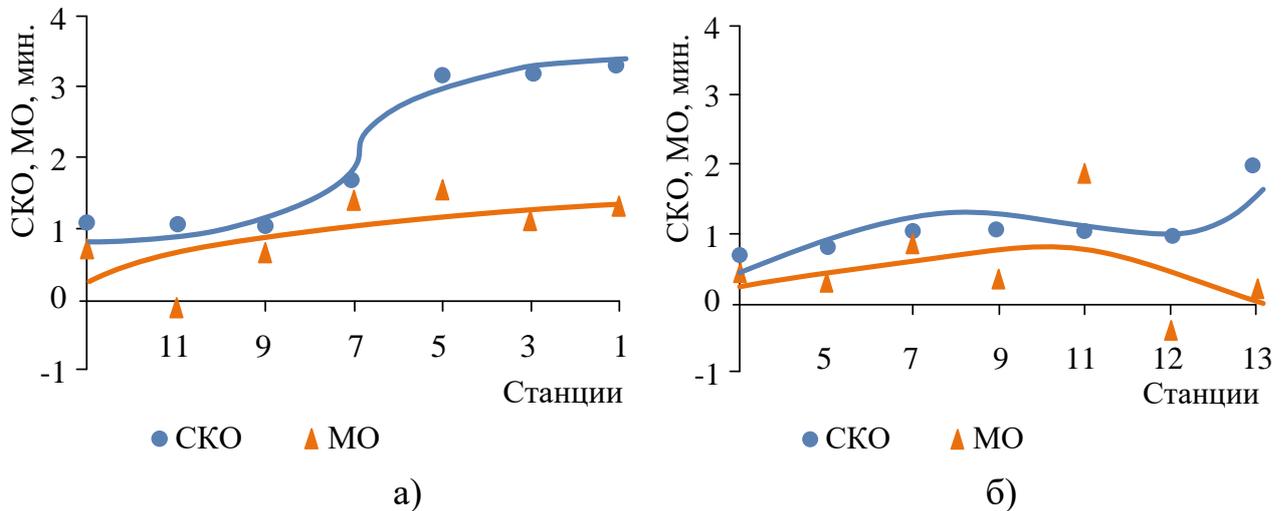


Рисунок 16 - Показатели рассеяния моментов прибытия пригородных поездов

а) в нечетном направлении (к центру мегаполиса), б) в четном направлении

Устранение отклонений с целью обеспечения графикового движения реализуют поездные диспетчеры путем изменения продолжительности плановых остановок – снижения времени обработки на технических станциях. Данные показывают, что коррекция задержек, приобретенных в пути следования по участкам, к примеру, трансконтинентального контейнерного маршрута, приводит к устранению опозданий по прибытию на станцию назначения (рисунок 17).



Рисунок 17 - Отклонения от графика движения контейнерных поездов

В разделе 4 исследуется проблема энергетически эффективного управления движением в режиме реального времени. Большинство опубликованных работ решает задачи построения статического энергоэффективного графика. В реальном движении возникают отклонения, при корректировке которых необходимо провести выбор траекторий поездов, которые обеспечивают минимальный дополнительный расход энергии. Оптимальные траектории могут быть рассчитаны как в ДЦУП, так и в бортовых системах.

При умеренном снижении ходовой скорости поезда расход энергии уменьшается. Чувствительность величины энергозатрат к снижению скорости, равному 1 км/ч, имеет порядок 0,1 проц. Экономия энергии при увеличении времени хода тяжеловесного поезда на 10 мин. оценивается значениями: по равнинному участку - 10-15 кВтч, в условиях горного рельефа – до 50 кВтч.

Детальный анализ влияния коррекции движения грузовых поездов по реальному участку (164 км) показывает, что оптимизация траектории на равнинной части сопровождается скромной экономией – порядка 0,2 проц. от полного расхода за поездку. Рациональный выбор скорости, при которой переходят от режима выбега к режиму торможения, позволяет сэкономить 7 проц. от расхода на тягу груженого поезда и 3 проц. - порожнего поезда. Установлено, что влияние неплановых остановок значительно превышает потери, обусловленные отклонением скоростной траектории от оптимальной. Каждый из циклов торможения/ускорения груженого поезда требует дополнительных затрат энергии в объеме 150-300 кВтч, порожнего - более 100 кВтч. Прицельное торможение - целенаправленное уменьшение скорости последующего поезда с целью предотвращения вторичной остановки - дает экономию, превышающую 180 кВтч. При регулярном использовании этой меры расход энергии по потоку снижается на 3-5 проц.

Задача оперативного управления расходом предполагает расчет отклонений от норм потребления энергии отдельными поездами или их совокупностью в режиме реального времени. Традиционно норма трактуется как расход, который наблюдается при точной реализации нормативного графика. Согласно нашей, вновь предложенной трактовке, значение нормативного расхода характеризует движение, откорректированное поездным диспетчером с учетом фактической ситуации. При назначении нормы учитываются компоненты, которые отражают ограничения скорости, пере-рывы в движении, а также отличия технических характеристик локомотивов и вагонов от стандартных. В этом случае величина отклонения фактического расхода от нормы отражает действия оперативного персонала – машинистов и диспетчеров – более адекватно.

При измерении расхода энергии возникает ошибка, обусловленная потерями в контактной сети. Моделирование процесса формирования потерь при движении пакета поездов с массой 6 тыс. т., показывает (см. график на рисунке 18): уменьшение интервала пакетного движения до 8 мин. ведет к значительному росту погрешности - до 4,7 проц.

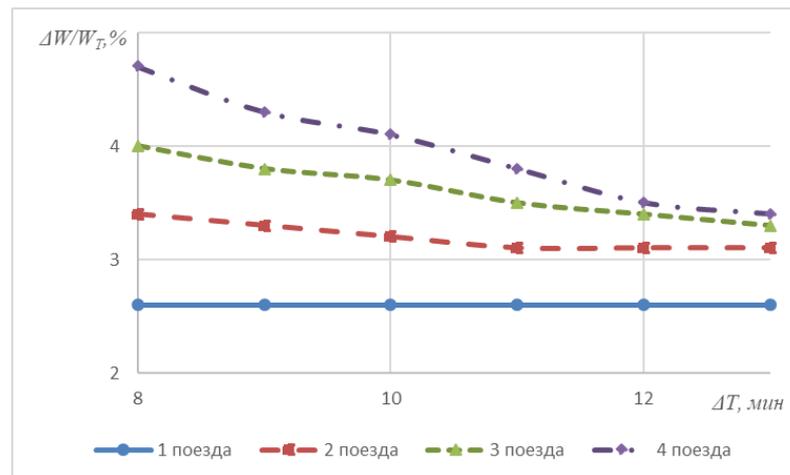


Рисунок 18 - Уровень потерь в контактной сети при различных интервалах

При оперативном назначении добавочного времени хода пакета грузовых поездов необходимо решить задачу оптимального перераспределения резерва по перегонам. С целью выполнения расчета в режиме он-лайн, предложена упрощенная методика распределения добавочного времени на основе использования показателей чувствительности расхода энергии (или зависящих эксплуатационных расходов) к изменению скорости. Решены тестовые примеры движения грузовых поездов массой 3-4 тыс. т. по участку Транссибирской магистрали протяженностью 300 км. Расчеты показывают, что увеличение времени хода поезда на 41 мин. (на 12,5 проц.) сверх графического значения приводит к экономии электроэнергии в размере 1,6 тыс. кВтч, или более 17 проц. от полного расхода. Экономия расходов по пропуску при этом составляет 5-6

проц. от суммарных затрат. Алгоритм приближенных вычислений оптимального распределения добавочного времени дает решение за время порядка 1 с. с погрешностью менее 5 проц.

**Раздел 5** предлагает новые методические подходы к решению проблемы интеллектуальной поддержки работы диспетчерского персонала. Определение оптимальных корректировок графика осуществляется с использованием «подсказок» со стороны автоматизированной аналитической системы (СППР). Вариант централизованного управления предполагает расчет скорректированной траектории движения каждого поезда в ДЦУП. В распределенной системе кривая скорости рассчитывается на тяговом средстве на основе нового расписания, полученного по каналу связи из центра. Вариант корректировки выбирается с учетом экономического результата, рассчитанного по методике, которая описана в разделе 6.

Проведена оценка возможности решения оптимизационной задачи по локальной корректировке графика в режиме реального времени. Проанализированы результаты экспериментов по поиску решений для микроуровня моделирования движения в границах диспетчерского круга. Расчетное время при использовании точных алгоритмов (ветвей и границ, поиска с запретами) превышает 100 с. При использовании генетического алгоритма решение задачи такой же размерности получается с погрешностью менее 5 проц. за 95 с. (в среднем). Более качественные характеристики показывает вероятностный вариант поиска с запретами. Погрешность не превышает 4 проц., а расчетное время – 21 с. Таким образом, при использовании приближенных методов реальным является определение последствий корректировки графика на участке протяженностью 200 км за время менее одной минуты.

Использование энергетического критерия в процессе текущего управления движением требует наличия актуальных данных. Информация о текущем расходе поступает в реальном времени из автоматизированной системы учета электроэнергии «Ресурс-Э», разработанной автором. Основными функциями системы являются сбор, обработка и отображение данных об энергии, расходуемой на тягу поездов, с привязкой к объему перевозочной работы. Расход энергии определяется путем контроля показаний счетчиков на тяговых подстанциях - на фидерах контактной сети.

При определении оптимальных корректировок графика предложено в интеллектуальной СППР использовать игровые методы и методы теории исследования операций. Рассмотрена игровая модель ситуации выбора порядка следования тяжеловесного и контейнерного поездов по участку с временно закрытым вторым путем. «Природа» (совокупность неконтролируемых факторов) пытается противодействовать усилиям диспетчера по предотвра-

щению неплановых остановок. Каждый из вариантов пропуска отражается элементом платежной матрицы вида:

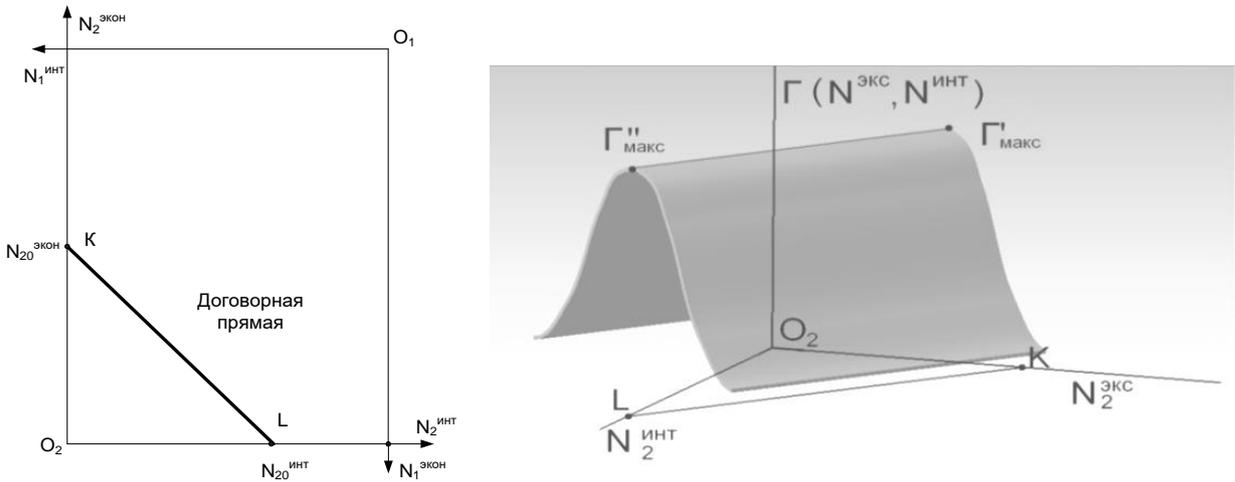
$$\Delta A_{ij} = \Delta A_{проф\ ij}^{тяж} + \Delta A_{проф\ ij}^{лег} + \Delta A_{след\ ij}^{тяж} + \Delta A_{след\ ij}^{лег} + p'_{ост\ ij} A_{ост}^{тяж} + p''_{ост\ ij} A_{ост}^{лег},$$

в которой учтены затраты энергии на выполнение профилактических мер ( $\Delta A_{проф\ ij}$ ), потери из-за следования «по удалению» ( $\Delta A_{след\ ij}$ ) и при остановках ( $A_{ост}$ ), а также вероятность возникновения неграфиковой задержки  $p_{ост\ ij}$ . Анализ показывает, что оптимальной регулировкой (при малом риске возникновения случайных препятствий,  $p_{ост} \rightarrow 0$ ) служит замедление обоих поездов, проследование станции с исключением задержки. Если же остановка становится неизбежной ( $p_{ост} \rightarrow 1$ ), более рационально использовать противоположное решение – ускорить следование поездов.

Исследована задача определения оптимального сочетания режимов экономичного и ускоренного пропуска грузовых поездов в предположении, что функционирование интенсивного сегмента контролируется диспетчером направления (ДГП). Диспетчер же поездного участка (ДНЦ) уделяет больше внимания поездам с массовым грузом. Решая задачу роста дохода, ДГП стремится к максимально возможному увеличению числа пропущенных поездов; поездной же диспетчер отстаивает позицию уменьшения интенсивности потока при улучшении качества (и экономики) движения. Процесс выработки компромиссного решения моделируется игровой задачей кооперативного типа.

Критерием выбора эффективного сценария – соотношения числа «экономичных» и «интенсивных» поездов ( $N^{экон}$ ,  $N^{инт}$ ) – служит провозная способность участка. Для сегмента экономичного управления размер грузопотока  $\Gamma_1$  определяется функцией  $\Gamma_1(N) = N^{\alpha_1}$ , для интенсивного – функцией  $\Gamma_2(N) = N^{\alpha_2}$ . Пространство возможных решений кооперативной игры представляется в виде диаграммы Эджворта-Боули (рисунок 19а). Пространство ограничено двумя парами сопряженных систем координат  $O_1$  и  $O_2$ , первая из которых соответствует стратегиям (решениям) ДГП, вторая – стратегиям ДНЦ.

Величина грузопотока зависит от решений игроков; максимальный его размер отражается линией  $[\Gamma'_{макс} \Gamma''_{макс}]$  (рисунок 19б), которая соответствует договорной прямой  $KL$ . Эта линия отражает множество стратегий, оптимальных по Парето. Выбор конкретного варианта решения – точки на договорной прямой – производится путем переговоров (достижения компромисса) между



а)

б)

Рисунок 19 - Диаграмма Эджворта-Боули и график функции изменения величины грузопотока

поездным диспетчером и диспетчером направления..

Исследована задача поиска компромисса в конфликтной управленческой ситуации с использованием экспертных оценок по методике анализа иерархий (МАИ). Позиции диспетчеров, принимающих коллективное решение по выбору регулировки, нередко различаются. В рассмотренном примере требуется выбрать очередность пропуска поездов по участку для ликвидации нарушения графика. Процесс выбора очередности формализуется с помощью иерархической модели, приведенной на рисунке 20. Главной целью (фокусом) служит максимальный экономический эффект при выполнении данной регулировки.



Рисунок 20 - Иерархическая модель в задаче выбора очередности поездов

Приоритетность мнений каждого  $m$ -го участника учитывается путем введения взвешивающего коэффициента. Этот коэффициент  $w_{mk}$  лежит в интервале  $[0...1]$ , показывает уровень компетентности и (или) информированности актора

в данном сегменте процесса. Так, к примеру, в области коммерческого оценивания поездов более высоким уровнем обладает руководитель диспетчерской смены – по сравнению с ДНЦ. Процедура синтеза множественных суждений в результате дает компромиссный план действий.

С помощью методики прямого МАИ-анализа построена обобщенная модель, ориентированная на решение спектра задач текущего управления движением. Рассмотрен пример использования модели - выбор одного из грузовых поездов, который нужно временно оставить на станции. Поезд №1 – контейнерный, имеющий большую длину (100 платформ, длина 2,5 км) и относительно небольшую массу (2000 т.). Два других поезда имеют малую длину. Угольный маршрут №2 обладает массой 6000 т., сборный поезд №3 – 3200 т. Анализ, проведенный по методике МАИ, показывает, что в период интенсивного пропуска приоритетным вариантом является оставление на станции поезда №3. Если же используется экономичный режим, более правильным решением оказывается остановка контейнерного поезда. Эффективное решение отличается от традиционно используемого диспетчером, когда контейнерный поезд пропускается в первую очередь, – вне зависимости от наличия у него резерва времени.

Разработаны элементы гибкой технологии диспетчерского управления, в частности, способ локального профилактического снижения скорости поезда при возникновении препятствия. В случае кратковременной остановки ведущего на время  $\Delta t_{осм}$  предотвращается остановка последующего поезда при соб-

людении условия:  $v_2 < \frac{\Delta s_{y\partial}}{\Delta t_{осм}} \left( \frac{\Delta s_{граф}}{\Delta s_{y\partial}} - 1 \right)$ , где  $\Delta s_{y\partial}$  - протяженность двух блок-участков,  $\Delta s_{граф}$  - графический интервал; при этом снижется потеря энергии.

Рассмотрен вопрос экономического оценивания комплекса мер текущего управления. Показано, что в качестве показателя эффективности целесообразно использовать удельный расход энергии на тягу поездов в границах поездного диспетчерского круга. Фактический удельный расход сравнивается с нормативным, установленным на период диспетчерской смены. Норма определяется как среднее по ряду значений расхода, зафиксированных на месячном интервале для каждого из поездных диспетчеров данного круга. Результаты опробования предложенной методики на Дальневосточной железной дороге показали ее эффективность, позволили получить реальный экономический выигрыш. Определено, что потенциал экономии электроэнергии в границах диспетчерского круга превышает 30 тыс. кВтч за период одной смены, или более 3,5 млн. кВтч за год.

В разделе 6 исследуется проблема назначения критериев, которые используются при выборе оптимальных диспетчерских решений. При пропуске пассажирских и ускоренных поездов эффективность текущего управления оценивается по показателям пунктуальности. Использование критериев этого вида в грузовом сегменте часто дает нерациональные решения. Построение адекватного критерия основывается на модели формирования экономического результата, которая учитывает цену отклонений от нормального хода процесса - дополнительные затраты и штрафы.

В традиционной постановке критерием считают суммарные зависящие расходы по всем поездам, следующим по участку:  $\sum_i P_i \rightarrow \min$ . Предлагается новый подход, когда целевой функцией, используемой при разработке оптимального плана пропуска поездов, является **локальный экономический результат** как часть прибыли, приходящаяся на участок диспетчерского управления:  $\sum_i \Pi_i \rightarrow \max$ . При построении модели доходной и расходной частей локального результата используется процессный подход к анализу работы участка дороги, который заключается в выделении бизнес-процессов и декомпозиции их на более мелкие составляющие (подпроцессы) с последующим оцениванием каждого из них. В расходной части учитываем, помимо прямых расходов, ущерб, связанный с потенциальными штрафами за опоздания пассажиров и просрочку в доставке грузов. Кроме того, принимаем во внимание вероятные потери из-за снижения оборота локомотива и вагонов. Методику, основанную на исчислении затрат по объему деятельности, дополняем учетом ресурсной (энергетической) составляющей.

Предложенная эконометрическая модель перевозки отражает процесс дискретного позиционирования поезда в пространстве "координата – время – стоимость". Траектория изменения его координаты и состояния (рисунок 21)

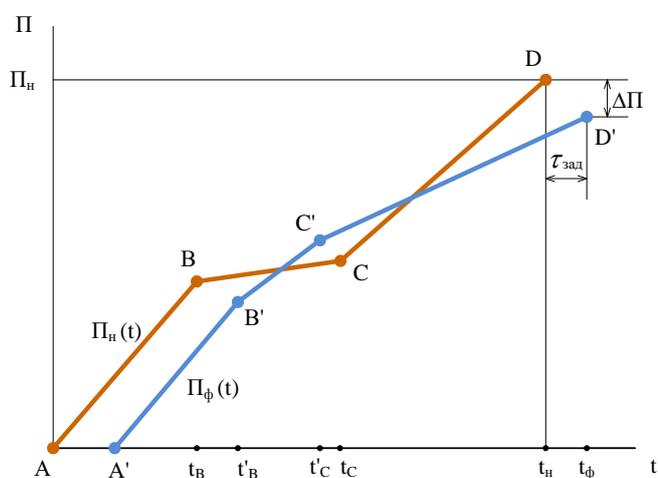


Рисунок 21 - Модель формирования экономического результата в процессе движения

представляется совокупностью точек, каждой из которых приписывается пространственное (станция), временное положение и экономический показатель – прибыль  $\Pi$ , накопленная с момента начала перевозки.

Отметки на шкале времени соответствуют моментам начала и окончания операций: следования по участкам (элементы  $AB, A'B', CD, C'D'$ ) и обслуживания на станции ( $BC, B'C'$ ). В момент окончания каждой операции фиксируется новое (накопленное с начала перевозки) значение экономического результата. Функция изменения прибыли  $\Pi_n(m_i)$ , где  $m_i$  – номер операции, рассматривается в качестве нормативной при условии следования по графику. Отклонения от графика приводят к отличию фактической зависимости  $\Pi_\phi(m_i)$  от нормативной. В приведенном примере прибыль (ордината точки  $B'$ ) оказывается сниженной из-за прогнозируемого штрафа за опоздание в доставке груза. Ускоренная обработка на станции (элемент  $B'C'$  на рисунке) приводит к некоторому повышению планируемой прибыли; однако некачественный пропуск поезда на завершающем участке приводит к возникновению опоздания и штрафа  $\Delta\Pi$ .

Доминирующей в плотном потоке является компонента потерь, возникающих в циклах замедления/разгона поездов при неграфиковых задержках. При возникновении случайного отклонения или целенаправленной остановки поезда по распоряжению диспетчера экономический результат от перевозки снижается на величину:

$$\Delta\Pi = (\Delta\Pi_{ваг} + \Delta\Pi_{лок} + \Delta\Pi_{штраф}) + \Delta P_{аморт} + \Delta P_э,$$

где  $\Delta\Pi_{ваг}$ ,  $\Delta\Pi_{лок}$ ,  $\Delta\Pi_{штраф}$  – потери из-за уменьшенного оборота подвижного состава и штрафов,  $\Delta P_{аморт}$  – дополнительные затраты на амортизацию вагонов и локомотива,  $\Delta P_э$  – изменение расходов на оплату энергии.

Выбор одного из поездов при разрешении конфликта определяется на основе оценки:

$$\Delta\Pi_{12} = (\Delta\Pi_2 - \Delta\Pi_1) - (\Delta P_2 - \Delta P_1)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют вариантам первоочередного пропуска соответствующих поездов.

Целенаправленная корректировка ходовой скорости ведет к снижению величины текущих затрат по пропуску поезда. Изменение скорости оказывает влияние на временную и энергетическую компоненты расходов по пробегу:  $P(\Delta v) = P^{np} + P^{6p}(\Delta v) + P^{эп}(\Delta v)$ . В диапазоне изменения скорости наблюдается минимум функции расходов (рисунок 22).

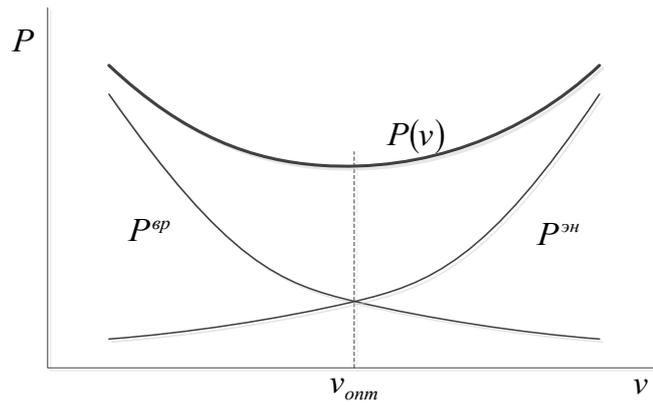


Рисунок 22 - Зависимость расходов по пробегу от скорости движения поезда

В работе показано, что увеличение энерготарифов ведет к смещению  $v_{онм}$  в область более низких значений. В настоящее время соотношение компонент расходов на Российских железных дорогах таково, что эта скорость лежит вблизи 40 км/ч. Реально достигнутая техническая скорость движения грузовых поездов превышает значение  $v_{онм}$ . Следовательно, снижение расходов может быть получено при некотором уменьшении скорости.

Величина экономического выигрыша (иногда - потери) при производстве диспетчерской регулировки, которая сопровождается увеличением времени хода  $\Delta\tau_j$  на  $j$ -м элементе пути, составляет:

$$\Delta\Pi = \delta\Pi_{опозд} \left( \Delta T - K_э \tau_{нл}^k + \sum_j \Delta\tau_j \right) + \left( e_{зн} \Delta\tau_j - e_{ээ} \sum_j K_{эj} \Delta\tau_j \right),$$

где  $\delta\Pi_{опозд}$  - размер штрафа за час опоздания;  $K_{эj}$  - коэффициент чувствительности (по энергии);  $e_{зн}$  - часовая оплата труда;  $K_{уск}$  - доля буферной добавки времени;  $\Delta T$  - величина опоздания по прибытию на конечную станцию маршрута;  $\tau_{нл}^k$  - время, которое остается до планового момента прибытия. Величина  $\Delta\Pi$  служит критерием выбора оптимального решения.

Исследованы особенности использования графовой модели в задачах выбора варианта коррекции с использованием экономического критерия. Так, фрагмент графа (рисунок 23) отражает ситуацию выбора очередности пропуска по станции. Узлы графа обозначают фазы реализации процесса - операции движения и остановки; дуги соответствуют зависящей части расходов при следовании по элементам участка.

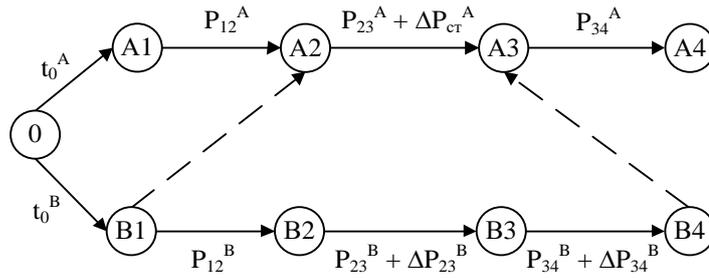


Рисунок 23 – Модель формирования расходов, связанных с остановкой поезда

В тестовой задаче по поиску варианта обгона, необходимого для разрешения межпоездного конфликта, при использовании критерия затрат более эффективной оказывается кратковременная остановка контейнерного поезда на станции, транзитный пропуск тяжеловесного поезда. При этом снизится объем энергии на 320 кВтч, произойдет экономия эксплуатационных расходов (более 1,5 тыс. руб). Использование критерия полного экономического результата обосновывает эффективность противоположного решения - первоочередного пропуска контейнерного поезда. Если этот поезд прибыл на вход участка с опозданием, существует риск штрафа, который будет уплачен грузовладельцу за задержку доставки. Размер штрафа за опоздание превысит 3 тыс. руб. в то время, как перерасход затрат составит величину порядка 300 руб.

Нелинейная реакция железнодорожной системы на увеличение числа поездов приводит к различному характеру изменения доходной и расходной частей экономического результата при пропуске плотного смешанного потока (рисунок 24а).

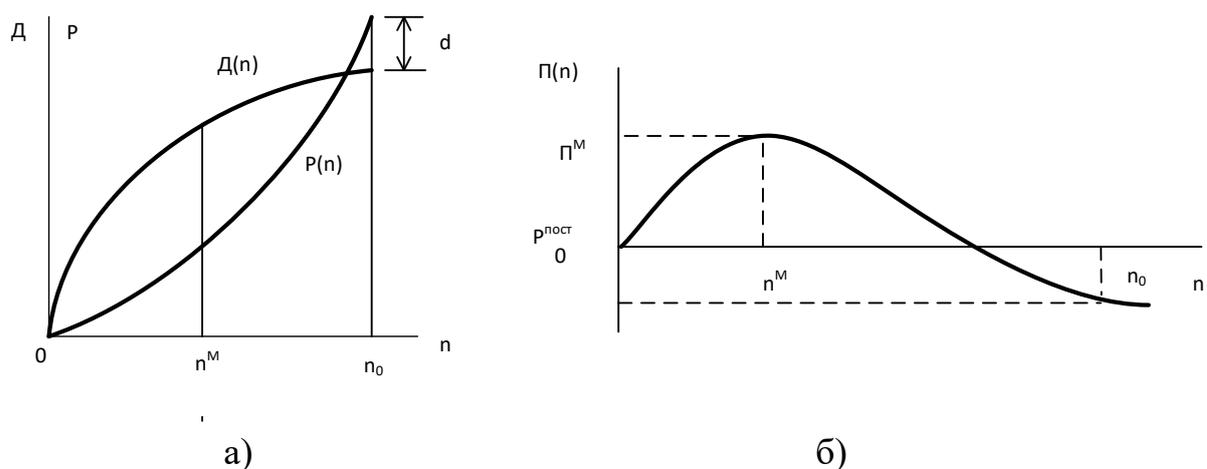


Рисунок 24 - Зависимость дохода, расхода (а) и прибыли (б) от интенсивности потока поездов

Используя квадратичную модель роста доходной и расходной частей при увеличении числа поездов, определяем, что зависимость прибыли от интенсивности  $n$  потока:  $\Pi(n) = [d_0 - p_0 - (A + B)n]n - P^{ном}$  - приобретает максимум при определенном значении  $n^M$  с дальнейшим спадом (рисунок 24б). На конечном участке кривая переходит в отрицательную область, характеризует убыток. Здесь  $A, B$  – коэффициенты влияния интенсивности потока на доходы и расходы;  $d_0, p_0$  - средние значения доходной и расходной частей при условии беспрепятственного движения поездов.

Расчет показывает, что в период пропуска потока поездов с массовым грузом (перевозки, обладающие малой рентабельностью - порядка 10 проц.) реальностью является обнуление прибыли (или даже убыточность) компании–перевозчика.

В качестве примера получена оценка эффективности корректирующих действий персонала по ликвидации опоздания грузового поезда массой 6,3 тыс. т. В середине маршрута протяженностью 2 тыс. км. (в точке  $x=1000$  км) зафиксирована задержка относительно графика на 3 ч. Рациональные диспетчерские регулировки предотвращают опоздание поезда по прибытию на станцию назначения, исключают штраф в размере 20,5 тыс. руб. и обеспечивают экономию текущих эксплуатационных расходов в сумме 7,6 тыс. руб.

Диссертация содержит **Приложение**, в котором представлены акты внедрения разработок, выполненных соискателем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы диссертации заключаются в следующем:

1. Разработана модель процесса оперативного планирования и руководства движением поездов - результат системного анализа принципов организации информационных и управляющих процессов в системе диспетчеризации. Предложенная модель служит теоретической основой совершенствования системы текущего управления движением.

2. Разработан способ оперативной коррекции графика движения поездов, предусматривающий выделение периодов с целенаправленно увеличенными нормативами ходовых времен (зон экономичного пропуска) при снижении интенсивности потока. Технология превентивного регулирования, гибко использующая различные режимы пропуска грузового потока, позволяет на порядок снизить уровень риска экономических потерь, в максимальной степени реализовать потенциал интеллектуализации и цифровизации в оперативном управлении движением поездов.

3. Развиты теоретические основы стохастического моделирования процесса движения поездов. Предложены вероятностные модели, учитывающие реальную статистику движения. Результатами исследования служат методика расчета отклонений от графика и описание механизма причинно-следственных связей в процессе формирования опозданий. Вероятностное прогнозирование нарушений графика с использованием новой методики позволяет повысить эффективность диспетчерских регулировок, уменьшить число неграфиковых остановок в 2-3 раза.

4. Разработана методика выделения сегмента потока с экономичным режимом пропуска, основанная на предложенной автором обобщенной стохастической модели движения. Определено, что в результате оперативной корректировки графика с использованием моделирования потока поездов пунктуальность движения увеличивается не менее, чем на 10 пунктов, текущие эксплуатационные затраты снижаются на 8 проц. и более.

5. Определена возможность решения задачи по поиску оптимальных регулировок в границах поездного диспетчерского участка в режиме реального времени, что подтверждает реализуемость идеи оперативной корректировки графика. Показано, что в алгоритмах поиска решений по управлению потоком поездов целесообразно использовать модели движения меза-уровня и эффективные эвристики. При этом время, требуемое для моделирования процесса и расчета оптимальных решений, уменьшается на порядок - до 30-50 с.

6. Разработан новый экономический критерий качества решений по корректировке графика, учитывающий локальную эффективность пропуска грузовых поездов. Критерий основан на модели накопления экономического результата в процессе перевозки, построенной с использованием процессного подхода. Появление такого критерия является важным шагом в направлении алгоритмизации поиска оптимальных диспетчерских регулировок.

7. Разработана методика оперативной корректировки графика движения с учетом критерия энергетической эффективности. Определено, что рациональное управление движением потока грузовых поездов позволяет получить экономию топливно-энергетического ресурса, составляющую не менее 5 проц. от полного расхода на тягу, или 2 млн. кВтч за год по одному диспетчерскому кругу.

8. Предложено использование игровых и экспертных методов при коллективном поиске рациональных решений персоналом диспетчерского центра. Разработана методология выработки решений с помощью указанных методов, с учетом технических и коммерческих факторов. Это позволяет повысить уровень интеллекта системы поддержки принятия решений, эффективность регулировок в условиях недостатка и нечеткости оперативной информации.

9. Определено, что реализация предложенных алгоритмов корректировки графика при решении практических задач, комплексном использовании критериев пунктуальности и эффективности позволяет получить годовую экономию расходов по пропуску в границах участка поездного диспетчерского управления в размере более 3,5 млн. руб. за счет снижения потерь от неграфиковых остановок и штрафов за просрочку доставки грузов.

Рекомендовано по результатам диссертационного исследования реализовать следующие мероприятия:

- применить положения созданной теоретической базы при разработке прогрессивной системы гибкого поездного управления в условиях динамического изменения интенсивности потока грузовых поездов;

- доработать руководящие документы ОАО «РЖД», регламентирующие текущее управление, с учетом усиления мотивированности персонала, обеспечения его средствами интеллектуальной поддержки;

- проводить работы по совершенствованию программного обеспечения системы ИСУЖТ с учетом методических подходов, предложенных в диссертации.

Перспективами дальнейшей разработки темы являются:

- углубление исследований по использованию стохастического подхода при моделировании процесса размножения задержек поездов в границах

широкого пространственно-временного горизонта, решении задач управления в реальном времени;

- усовершенствование методики меза-моделирования с целью ее использования в алгоритмах корректировки графика движения смешанного грузо-пассажирского потока поездов.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **а) в рецензируемых научных изданиях**

1. Давыдов, Б.И. Потери в тяговой сети переменного тока при пакетном пропуске поездов / Б.И.Давыдов, О.Г.Заволока // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2002. - №3. - С. 39-40.

2. Давыдов, Б.И. Энергетическая эффективность рационального управления потоком поездов / Б.И.Давыдов, Л.А.Мугинштейн // Железнодорожный транспорт. – 2003. - №10. - С. 60-62.

3. Давыдов, Б.И. Нормирование энергоресурса, расходуемого потоком поездов / Б.И.Давыдов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2004. - №1. - С. 39-41.

4. Давыдов, Б.И. Показатель энергетической эффективности тяги поездов / Б.И.Давыдов, О.А.Култашова // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2006. - №2. - С. 43-47.

5. Давыдов, Б.И. Нормирование ресурсов транспортной системы / Б.И.Давыдов // Наука и техника транспорта. – 2007. - №4. - С. 121-123.

6. Давыдов, Б.И. Об измерении потерь энергии в контактной сети / Б.И.Давыдов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2007. - №1. - С. 42-44.

7. Давыдов, Б.И. Экономическое обоснование рациональной скорости движения поездов / Б.И.Давыдов, Е.В.Котлярова // Экономика железных дорог. – 2008. - №4. - С. 17-23.

8. Давыдов, Б.И. Экономические критерии управления перевозочным процессом на участке и направлении / Б.И.Давыдов, Е.В.Котлярова // Экономика железных дорог. – 2009. - №5. - С. 17-23.

9. Давыдов, Б.И. Модель потребления энергии потоком транспортных средств на малых интервалах времени / Б.И.Давыдов // Наука и техника транспорта. – 2009. - №3. - С. 70-74.

10. Давыдов, Б.И. Экономически эффективное управление движением поездов / Б.И.Давыдов // Экономика железных дорог. – 2012. - №3. - С. 28-37.

11. Давыдов, Б.И. Оперативный контроль потребления энергии потоком поездов / Б.И. Давыдов, В.Н. Гопкало // Транспорт: наука, техника, управление. – 2012. - №10. - С. 29-31.

12. Давыдов, Б.И. Модель формирования экономического результата при движении грузового поезда / Б.И. Давыдов // Экономика железных дорог. – 2012. - №9. - С. 62-65.

13. Давыдов, Б.И. Профилактическое регулирование движения поездов в условиях сбоя / Б.И. Давыдов // Экономика железных дорог. – 2013. - №3. - С. 86-92.

14. Давыдов, Б.И. Оптимальное регулирование движения грузовых поездов в условиях возникновения отказов / Б.И. Давыдов // Экономика железных дорог. – 2014. - №2. - С. 62-67.

15. Давыдов, Б.И. Оптимальные режимы движения потока грузовых поездов / Б.И. Давыдов, В.И. Чеботарев // Транспорт: наука, техника, управление. – 2015. - №1. - С. 65-67.

16. Давыдов Б.И. Вероятностная модель движения транспортного средства / Б.И. Давыдов, В.И. Чеботарев, К.С. Каблукова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2016. - №11. - С. 13-19.

17. Давыдов Б.И. Моделирование движения поезда с учетом статистических связей элементов траектории / Б.И. Давыдов, К.С. Каблукова, Ю.О. Пазойский, В.И. Чеботарев // Наука и техника транспорта. – 2022. - № 3. - С. 81-91.

**б) в изданиях, входящих в международные системы цитирования SCOPUS и WoS**

18. Davydov, V. Checking and forecasting method for the rail traction energy consumption [Электронный ресурс] / V. Davydov, A. Lokhatch, L. Muginstain // Symposium on Formal Methods for Railway Operation and Control Systems, Budapest, Hungary, 2003. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

19. Davydov, V. Real Time Energy Consumption Monitoring as a Tool for the Freight Trains' Dispatching / V. Davydov, V. Hopkalo // IET Seminar Digest, 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring, Derby, UK, 2008. - P. 18-22.

20. Davydov, V. DSS for the effective group estimating of the graduation papers [Электронный ресурс] / V. Davydov, V. Kuzmitskiy // 17th Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education, Haifa, 2012. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

21. Davydov, V. Optimal rescheduling for the mixed passenger and freight line / V. Davydov, B. Dynkin, V. Chebotarev // WIT Transactions on the Built Environment, COMPRAIL 2014, Rome, Italy. - 2014. - P. 649-661.

22.Davydov, B. Stochastic Traffic Models for the Adaptive Train Dispatching / B.Davydov, V.Chebotarev, A.Godyaev // Advances in Intelligent Systems and Compu. – 2016. – vol. 451. - P. 323–333. DOI: 10.1007/978-3-319-33816-3\_32.

23.Davydov, B. Prediction of the train traffic in a transport corridor /B.Davydov, K.Kablucova,A.Godyaev // Procedia Engineering. – 2016. – vol. 165 - P. 1430-1436. DOI: 10.1016/j.proeng. 2016.11.875.

24.Davydov, B. Stochastic model for the real-time train rescheduling / B.Davydov, V.Chebotarev, K.Kablucova // International Journal of Transport / Railway Engineering, Design and Operation, COMPRAIL 2016. – 2017. - vol. 1. - N. 3. - P. 307-317.

25.Davydov, B. Online energy-efficient train traffic adjustments / B.Davydov, V.Gopkalo // Advances in Intelligent Systems and Computing, EMMFT 2017. – 2018. - Vol. 692. - P. 236-244. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1\_25.

26.Davydov, B. Online Train Traffic Adjustments: Probabilistic Modeling and Estimating / B.Davydov, V.Chebotarev, K.Kablukova // Advances in Intelligent Systems and Computing. TSTP 2017, Katowice. – 2018. - vol. 631. - P. 50-60.

27.Chebotarev, V. Probabilistic model of delay propagation along the train flow (book chapter) / V.Chebotarev, B.Davydov, K.Kablukova; ed.: Dr. A. Kostogryzov // [S. I.] : InTechOpen, 2018. – P. 220-231.

28.Davydov, B. Random delays forming in the dense train flow / B.Davydov,V.Chebotarev, K.Kablukova // WIT Transactions on the Built Environment, COMPRAIL 2018. – 2018. - vol. 181. - P. 307-317.

29.Chebotarev, V. Some Features of Formatting the Arrival Time Distribution / V.Chebotarev, B.Davydov, K.Kablukova, V.Gopkalo // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), ICCSA 2019. – 2019. - vol. 11620. - P. 148-161.

30.Davydov, B. Basic Framework for Adjusting the Freight Train Schedule / B.Davydov, V.Esaurov, V.Gopkalo, K.Kablukova // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), ICCSA 2019. – 2019. - vol. 11620. - P. 162-176.

31.Gopkalo, V. Basic Framework for the Energy-Effective Train Dispatching / V.Gopkalo, B.Davydov, A.Godyaev // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – vol. 844. - P. 3–12.

32.Davydov, B. Methodology for Optimal Solution Search during the Freight Train Schedule Creation / B.Davydov, V.Esaurov, V.Gopkalo // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – vol. 459(2), – P. 022-036.

33.Davydov, B. The model of arrival time distribution forming in the dense vehicle flow / B.Davydov, V.Chebotarev, K.Kablukova, V.Gopkalo // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. - vol. 1083. - P. 69–78.

34. Davydov, B. On the distribution of the random arrival time / B. Davydov, V. Chebotarev, K. Kablukova // WIT Transactions on the Built Environment. - 2020. - vol. 199. - P. 193–205.

35. Chebotarev, V. Stochastic modeling of train delays formation / V. Chebotarev, B. Davydov, K. Kablukova // International Journal of Transport Development and Integration. - 2020. - vol. 4(4). - P. 295–307.

36. Davydov, B. Evolution of Probabilistic Characteristics in the Train Traffic Process / B. Davydov, V. Chebotarev, K. Kablukova // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – vol. 352 LNNS. - P. 101–109.

#### **в) патент на изобретение**

37. Пат. №2763015 РФ, МПКВ61L23/00. Способ и система децентрализованного интервального регулирования движения поездов / Давыдов Б.И., Муляр Н.В., Гопкало В.Н., Давыдов И.Б.: заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС); заявл. 19.04.2021, опублик. 24.12.2021, Бюл. № 36.

#### **г) в других изданиях и материалах конференций**

38. Давыдов, Б.И. Рациональная система автоматизированного учета расхода электроэнергии на тягу поездов / Б.И. Давыдов // Локомотив. – 2005. - №1. - С. 38-39.

39. Давыдов, Б.И. Теоретико-игровое решение задач поездного диспетчерского управления / Б.И. Давыдов, В.И. Чеботарев // Вестник транспорта. - 2007. - №10. - С. 37-39.

40. Давыдов, Б.И. Оперативное управление движением поездов: формализация процесса принятия решений / Б.И. Давыдов, В.Н. Гопкало // Транспорт России: проблемы и перспективы: Всероссийская научно-практическая конференция. - ИПТ РАН, 2008. - С. 59-60.

41. Давыдов, Б.И. Оптимальное управление совокупностью тяговых средств на участке железной дороги / Б.И. Давыдов, В.Н. Гопкало // Вестник института тяги и подвижного состава: материалы международной конференции «Подвижной состав XXI века». – 2008. - Вып. 5. - С. 125-128.

42. Davydov, B. Optimization of the Dispatching Decision Employing the Real Time ANP Approach / B. Davydov // 4th International Seminar on Railway Operations Modeling and Analysis, Roma, Italy, 2011. - P. 66.

43. Давыдов, Б.И. Адаптивное диспетчерское управление движением поездов на магистральных железных дорогах: проблемы и перспективы / Б.И. Давыдов, В.Н. Гопкало, А.И. Годяев // Современный транспорт: инфраструктура, инновации, интеллектуальные системы : сб. трудов Российского

международного конгресса по интеллектуальным транспортным системам. - М., 2013. – С. 211-214.

44. Давыдов, Б.И. Концепция двухэтапности процесса адаптивного управления движением грузовых поездов / Б.И. Давыдов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте : научно-техническая конференция с международным участием : сб. трудов. - Москва, 2014. – С.105-109.

45. Chebotarev, V. Prediction of the train traffic when random failures occur / V. Chebotarev, B. Davydov, B. Dynkin, K. Kablucova // The 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis, RailTokyo 2015, Japan. – P. 181-187.

46. Давыдов, Б.И. Стохастическое моделирование потока поездов при решении задач диспетчерского управления / Б.И. Давыдов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте : научно-техническая конференция с международным участием : сб. трудов. - Москва, 2015.

47. Чеботарев, В.И. Математическая модель процесса размножения задержек поездов / В.И. Чеботарев, Б.И. Давыдов, К.С. Каблукова // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления : IV Всероссийская научно-практическая конференция. - Хабаровск, 2017. – С. 212-216.

48. Давыдов, Б.И. Вероятностная модель распространения задержек по цепи поездов / Б.И. Давыдов, К.С. Каблукова, В.И. Чеботарев // Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматике и инфокоммуникациях : Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. – Хабаровск: ДВГУПС, 2017. – С. 86-92.

49. Davydov, B. Adaptive Stochastic Model for the Train Rescheduling / B. Davydov, V. Chebotarev, K. Kablucova // 7th Intern. Conference on Railway Operations Modelling and Analysis : Planning, Simulation and Optimization Approaches, Lille, France, 2017. - P. 1532-1548.

50. Эсаулов, В.А. Использование показателя доходности при оптимизации процесса пропуска грузовых поездов / В.А. Эсаулов, Б.И. Давыдов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование: труды 7-й научно-технической конференции. – М., 2018. - С. 91-94.

51. Davydov, B. The criterion for optimal rescheduling the mixed train traffic [Электронный ресурс] / B. Davydov, A. Mishra // 15<sup>th</sup> World Conference on Transport Research, 26-31 May 2019, Mumbai, India. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Давыдов Борис Израильевич

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ СНИЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И  
ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ В ПРОЦЕССЕ ТЕКУЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ  
ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени доктора технических наук

2.9.4. Управление процессами перевозок

---

Подписано в печать «    » \_\_\_\_\_ 202 г.    Заказ №  
Объем 2,0 п. л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Издательства ДВГУПС  
680021, Хабаровск, Серышева, 47