

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Дальневосточный государственный университет путей сообщения»
(ДВГУПС)

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

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
ПАЗОЙСКИЙ Юрий Ошарович

Хабаровск - 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕКУЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ	15
1.1 Основные положения текущего планирования и руководства движением	15
1.2 Состояние проблемы оперативного управления движением поездов	19
1.3 Зарождение и развитие идеи гибкого управления движением поездов	22
1.4 Системный анализ процесса оперативного управления движением поездов	27
1.4.1 Классификация задач оперативного управления движением	27
1.4.2 Обобщенная модель процесса диспетчерского руководства	28
1.5 Конфликты в движении поездов и способы их разрешения	31
1.6 Новый подход к проблеме текущего управления движением поездов	34
1.7 Способ оперативной профилактической коррекции движения	37
1.8 Оптимальный сценарий функционирования участка дороги	41
1.9 Проблема моделирования движения поездов и корректировки графика	42
1.10 Новая меза-модель возмущенного движения: дерево взаимовлияний	47
1.11 Постановка задач исследования	51
Выводы по разделу 1	52
2. КОРРЕКТИРОВКА ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ: ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД	54
2.1 Постановка задачи корректировки графика	54
2.2 Общие положения моделирования движения потока поездов	56
2.3 Поиск корректирующего решения как задача теории расписаний	59
2.4 Обобщенная модель движения поездов	62
2.5 Вариантный граф и его использование при поиске оптимальных решений	67
2.5.1 Графовая модель движения потока поездов	67
2.5.2 Обнаружение конфликта и изменение порядка движения	69
2.5.3 Подстройка скоростных характеристик поездов	76
2.6 Методика оперативной корректировки графика движения	78

2.7 Поиск оптимального решения графической задачи	80
2.8 Алгоритм корректировки графика движения	83
2.9 Результаты решения тестовых задач	89
2.10 Оценка экономии затрат энергии при корректировке графика	93
Выводы по разделу 2	94
3. КОРРЕКТИРОВКА ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ: СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД	95
3.1 Обобщенная стохастическая модель движения поездов	95
3.2 Базовая модель формирования интервалов прибытия поездов	99
3.3 Распределение интервалов прибытия при пакетном движении	104
3.4 Распределение интервалов прибытия с учетом реальной статистики	108
3.5 Уточненная модель формирования интервалов прибытия поездов	112
3.6 Модель процесса оперативной коррекции случайных отклонений	115
3.7 Трансформация распределения моментов прибытия при регулировке	119
3.8 Статистические характеристики движения поездов по участкам	124
Выводы по разделу 3	129
4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ	131
4.1 Оптимизация энергозатрат в процессе регулирования движения	131
4.2 Модели формирования энергозатрат при движении поезда	133
4.3 Энергооптимальная траектория движения поезда	137
4.4 Динамика расхода энергии при изменении режима движения поезда	139
4.5 Оптимальное распределение добавочного времени хода по участку	143
4.6 Ограничения в процессе выбора энергоэффективного режима	144
4.7 Упрощенная методика распределения добавочного времени хода	145
4.8 Анализ и нормирование расхода энергетического ресурса на тягу	150
Выводы по разделу 4	153
5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА РАБОТЫ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПЕРСОНАЛА: ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ	154
5.1 Система поддержки принятия корректирующих графических решений	154

5.2	Реализуемость оптимизационных алгоритмов в СППР	158
5.3	Контроль расхода электрической энергии в реальном времени	160
5.4	Когнитивные методы и модели в процессе решения диспетчерских задач	163
5.4.1	Теоретико-игровая модель выбора рациональной корректировки графика	163
5.4.2	Задача оптимального фрагментирования потока поездов	167
5.4.3	Использование экспертных методов в диспетчерских задачах	170
5.4.4	Решение графической задачи с использованием аппарата МАИ	173
5.4.5	Иерархическая модель в задаче выбора оптимальных регулировок	175
5.4.6	Использование аппарата МАИ при решении задач реального времени	177
5.5	Элементы гибкой технологии диспетчерского руководства	179
5.5.1	Превентивное регулирование движения потока поездов	179
5.5.2	Приемы эффективного ситуационного поездного управления	181
5.6	Оценка эффективности работы диспетчерского персонала	185
5.7	Исследование эффективности работы диспетчеров в реальных условиях	189
	Выводы по разделу 5	191
6.	ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ	193
6.1	Постановка задачи оптимизации по экономическому критерию	193
6.2	Экономическое оценивание процесса движения пассажирских поездов	195
6.3	Показатели качества грузового движения	196
6.4	Модель формирования экономического результата грузовой перевозки	199
6.5	Критерий оптимальности в задаче оперативной корректировки графика	202
6.6	Пример использования экономического критерия в диспетчерском управлении	205
6.7	Оптимизация движения поездов на основе обобщенной затратной модели	207
6.8	Моделирование расходной части локального экономического результата	209
6.9	Влияние скоростного режима движения на экономический результат	210
6.10	Влияние интенсивности потока поездов на экономический результат	215
	Выводы по разделу 6	218
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	219

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	222
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	254
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акты внедрения результатов исследований и разработок	256

ВВЕДЕНИЕ

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 работы 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, динамических 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 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 по перегонам и интервала пакетного пропуска грузовых поездов.
3. Методика построения оптимального сценария функционирования участка железной дороги, предусматривающая оперативное назначение интервалов времени с различными режимами пропуска поездов.
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. Методология использования энергетического критерия при выборе решений по корректировке графика в реальном времени и при оценке качества диспетчерского управления.
10. Методика выбора корректирующих графических решений, основанная на положениях теории исследования операций (методологии анализа иерархий) и теории игр.

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, Czech.Rep., 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, 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.

1. ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ТЕКУЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ

1.1 Основные положения текущего планирования и руководства движением

А. Основу организации железнодорожного перевозочного процесса образуют график движения и план формирования. Эти документы разрабатываются на длительный (годовой) период времени. Отличительной чертой нормативного графика является наличие резервов времени, введение которых позволяет учесть неопределенность условий протекания реальных процессов. Отклонения времени выполнения отдельных составляющих процесса (*операционных интервалов*) возникают из-за технических, технологических отказов и внешних влияний, в частности, изменений погоды.

Перевозку пассажиров и грузов рассматривают как процесс, протекающий в условиях ресурсных ограничений [23]. Основные затруднения вызваны ограниченной пропускной, перерабатывающей способностью инфраструктуры, конечным ресурсом локомотивной тяги. Периодически возникающие трудности, в том числе, дефицит ресурсов (станционных путей, локомотивов), не должны отражаться на внешних результатах работы – выполнении обязательств перед клиентами. Для этого закладываются резервы и осуществляется оперативное управление, которое, по сути, есть *маневр ресурсами*.

Текущее управление грузовым движением реализуется на основе вариантного графика. В вариантном графике сохраняются нормативные значения времен хода. Однако в тех случаях, когда прогнозируется спад интенсивности потока поездов, целесообразно вносить коррективы в некоторые нормативы графика, чтобы получить снижение эксплуатационных расходов. В периоды, когда интенсивность использования ресурсов приближается к максимальной, не возможно вести речь о высоком качестве пропуска поездов. Например, реализация ходовых времен на основе предельных возможностей тяговых средств делает нереальным применение энергоэффективных приемов. Задачу оптимизации движения можно

трактовать как **поиск такого распределения резервов времени и технических ресурсов между подвижными единицами, при котором достигается наибольший эффект по заданному критерию.**

Б. При наличии случайных отклонений во многих случаях исходное (нормативное) распределение резервов оказывается неэффективным, что вызывает опоздания. График движения грузовых поездов выполняется менее точно, чем пассажирских. Процент отправления по графику с узловых станций достаточно велик (более 90 проц.), однако пунктуальность прибытия на промежуточные отдельные пункты и узловые станции низка. С целью стабилизации работы системы, используют методы *ситуационного* управления, что предполагает сочетание заблаговременной профилактики вероятных проблем с быстрым и эффективным реагированием на уже возникшие затруднения. Существующая технология управления движением поездов в недостаточной степени ориентирована на оперативную подстройку процессов в условиях возникновения возмущений. Пути обеспечения гибкости оперативного управления движением широко обсуждаются исследователями проблем транспорта (см., например, [218]). Признано, что ключевым моментом повышения качества обслуживания пользователей и улучшения экономических показателей является корректировка графика движения в реальном времени.

Задача создания на Российских железных дорогах механизма внесения оперативных корректировок в план формирования и в график движения поездов поставлена недавно [67, 84]. Препятствием на пути использования технологии гибкого графика служит отсутствие технических и программных средств для моделирования, поиска оптимальных решений по управлению движением поездов, которые применимы в реальном времени.

В железнодорожной отрасли России, охваченной процессом реформирования, произошло разделение сфер коммерческих отношений (клиент - оператор) и продвижения вагоно- и поездопотоков [3]. Комплекс функций по организации и управлению движением по Российским дорогам осуществляет Дирекция перевозок ОАО «РЖД». Перечень и содержание функциональных процессов,

обязанности и ответственность участников определяет «Единый технологический процесс железнодорожных перевозок» (ЕТП ЖДП) [66]. Текущее планирование поездной работы на уровне Региональной дирекции перевозок, согласно требованиям ЕТП, охватывает процессы составообразования, пропуска, подвода поездов к станциям, а также обеспечения локомотивами и бригадами.

Плотность потока грузовых поездов изменяется как от суток к суткам, так и в пределах каждого суточного периода. Обычно плотность возрастает вблизи отчетного часа (18 мск) (см. рисунок 1.1). Причинами колебаний являются также ремонтные «окна» и неравномерность поступления грузов. Эта неравномерность возрастает при рыночных условиях функционирования экономики [133]. На загруженных железнодорожных направлениях коэффициент вариации колебаний достигает 0,12. Это означает, что в некоторые сутки (по статистике – в пяти процентах случаев) наблюдается двукратный спад числа поездов.

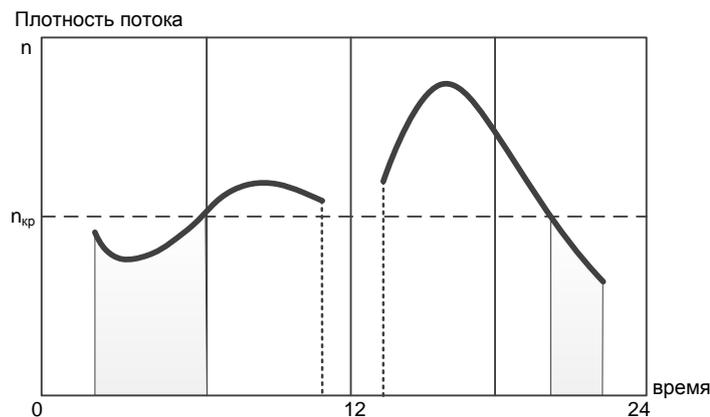


Рисунок 1.1 - Динамика плотности потока поездов в течение суток

Работа транспорта в конкурентной среде предполагает обеспечение гибкого реагирования на запросы грузовладельцев. В частности, функционирует механизм удовлетворения срочной заявки на перевозку. Так, в Западной Европе доступными для грузоотправителей являются заявочные сроки, составляющие несколько суток или даже несколько часов [134]. Нередко возникающие проблемы на смежных видах транспорта, на пограничных переходах вызывают потребность ускорения или замедления доставки некоторых видов груза. Периодически случаются

ситуации острого дефицита вагонов определенного типа. Очевидно, во всех указанных случаях процесс движения должен оперативно подстраиваться.

При высокой степени использования пропускной способности возрастает влияние каждого отклонения на движение других поездов. Наши исследования [54] свидетельствуют, что на участке магистральной линии протяженностью 210 км (при наличии резерва времени хода в 54 мин.) в график не укладывается 70 проц. грузовых поездов. Энергия, теряемая при неплановых торможениях, достигает 35 проц. от полного объема.

Прогноз развития ситуации на широком полигоне управления позволяет намечать корректирующие мероприятия. К примеру, в работе [80] предложены методы предупредительного регулирования, которые предусматривают выбор оптимального режима взаимодействия станций и участков.

Движение подвергается корректировке при возникновении или исчезновении препятствий следованию поездов. Сигналами, которые инициируют применение регулировочных мер, служат (а) отклонения от графика и (б) сообщения об отказах или возникновении новых тактических задачах. Сегодня оперативную подстройку процесса осуществляет диспетчерский персонал, руководствуясь субъективными оценками ситуации, без должного просчета экономического результата. Выбирая вариант действий в сложной ситуации, диспетчер ориентируется на нормативный график лишь при регулировании движения пассажирских поездов. Отсутствие оптимальности принимаемых решений приводит к значительным потерям. Например, повышенный расход энергии при регулярном использовании «нагона» в грузовом движении сопровождается таким перерасходом затрат, которое может нивелировать выигрыш за счет ускорения движения. Выходом из положения является ослабление требования жесткого соблюдения графика в грузовом сегменте в тех случаях, когда затраты на ликвидацию массовых отклонений превышают экономический выигрыш. Это производится путем целенаправленной корректировки времен хода в определенные периоды времени. Параметры коррекции рассчитываются интеллектуальной системой поддержки

принятия решений [14] с учетом экономического результата. Указанное направление исследований развито слабо, нуждается в дальнейшем осмыслении.

1.2 Состояние проблемы оперативного управления движением поездов

А. Проблемы оперативного управления на железнодорожном транспорте исследовали российские ученые А.Д. Каретников, Л.П. Тулупов, Е.А. Сотников, В.Ю. Горелик, А.В. Кутыркин, Д.Ю. Левин, В.А. Ивницкий, Е.М. Тишкин, В.И. Уманский и многие другие. Основные проблемы в области управления также анализировали зарубежные исследователи, в частности, G. Sahin, D. Jovanovic, D. Kraay, P. Harker, S. Hallowell.

Авторы основополагающих работ в указанной области придерживаются следующих исходных позиций. Движение пассажирских поездов безусловно подчинено нормативному графику. В сегменте грузовых перевозок существуют два способа организации перевозочного процесса:

- с ориентацией на объемы грузовых перевозок (tonnage-based system);
- с опорой на график движения (schedule-based system).

Опыт работы дорог ряда ведущих стран показал эффективность работы по графику. Многие перевозчики, к примеру, Северо-Американские железные дороги совершили переход к графической системе в 90-х годах XX века.

Проблеме построения эффективного графика движения поездов посвящены исследования советских ученых А.Г. Барткуса, Б. Дел Рио, И.Т. Козлова, Г.А. Тихонова, Е.М. Тишкина и других. На современном этапе исследования в области оптимизации графика проводили В.А. Ивницкий, В.И. Некрашевич, Б.А. Лёвин, В.С. Климанов, В.И. Уманский и другие. Зарубежные работы в рассматриваемой области отражены в обзоре [184]. Из исследований последнего времени следует отметить статьи [2, 244]. Первая из них использует мультиагентный подход при построении оптимального графика, вторая рассматривает классический алгоритм решения этой задачи.

Авторы современных основополагающих работ по организации движения поездов [286, 288] предлагают следующую классификацию графиков. *Стратегический график* (strategic train schedule) является элементом долговременного планирования работы сети дорог. На этапе среднесрочного планирования разрабатывается *тактический график* (tactical, master schedule). Тактический график фиксирует расписания пассажирских поездов и «графиковых» грузовых поездов (ядра движения), а также задает параметры следования рядовых грузовых поездов.

Основными характеристиками, которые отражают качество перевозочного процесса, являются *надежность исполнения графика* и *экономический результат* деятельности перевозчика. Под *надежностью* понимается, в первую очередь, точность отправления и прибытия пассажирских поездов в точки плановых остановок. Эту задачу персонал решает, не считаясь с затратами. Надежность движения грузовых поездов следует понимать в другом смысле: обеспечение пропуска заданного числа поездов и отсутствие опозданий на станции назначения.

Общими характеристиками графика движения в условиях случайных возмущений принято считать его устойчивость и стабильность. Под *устойчивостью графика* (timetable robustness) понимают способность поглощать (гасить) малые текущие возмущения [165, 277]. Система управления, которая обеспечивает устойчивость, эффективно противостоит возникающим отклонениям. С увеличением интенсивности движения компенсаторный механизм начинает отказывать, что приводит к размножению задержек (knock-on effect). Характеристика *стабильность графика* (timetable stability) [231] соотносится с интервалом времени, который необходим для восстановления нормативного движения после сбоя.

Отметим, что на зарубежных железных дорогах (Европа, США) нормативный (руководящий) график регламентирует лишь точки отправления и прибытия грузовых поездов на узловые станции – без фиксации моментов проследования промежуточных станций.

Поток грузовых поездов на дорогах смешанного движения распределяется по временным зонам, свободным от влияния пассажирских поездов. Периоды, в которые пассажирские поезда не оказывают влияния на ход грузовых, могут трак-

товаться как зоны свободной прокладки с гибким выбором альтернативных ниток (*вариационный график* [76, 207]).

Детальная проработка плана функционирования направлений и участков дороги – вплоть до отдельного поезда и отдельной станции – производится до начала очередных суток. Регламентирование процесса при этом осуществляют с помощью *оперативного (вариантного) графика движения* (operational schedule).

При организации движения используют представление о различных горизонтах планирования (rolling time–operational horizon). Горизонт макроуправления в пространственном измерении охватывает железнодорожное направление (2-3 тыс. км), во временном – декаду и отдельные сутки. При решении управленческих задач этого уровня в качестве критериев выступают объем тоннокилометровой работы и размер парка вагонов.

При моделировании поездной работы с детализацией до единичного перегона (модели меза-уровня [110]) горизонт планирования составляет 12 и 24 часа. При переходе к микро-уровню горизонт сужается до диспетчерского круга и интервала времени продолжительностью не более 3-4 часов.

Оптимизация пропуска по участку пассажирского поезда или грузового поезда, следующего по твердой нитке, производится на основе критерия минимального отклонения исполненного движения от нормативного расписания. В периоды, когда поток поездов велик, критерием оптимальности движения грузового потока является коэффициент использования пропускной способности. В периоды спада интенсивности потока управление целесообразно производить по критерию эксплуатационных расходов, используя гибкий график движения.

Б. В ходе перевозочного процесса возникают отклонения, вызванные воздействием случайных факторов. Возвращение системы в нормативное состояние производится путем *оперативного перепланирования* (real-time rescheduling), то есть корректировки графика движения в реальном времени. Такой оптимизированный план называют *актуальным* (actual dispatching plan), его реализация ведет к улучшению использования пропускной способности и снижению затрат.

Корректировка графика является функцией диспетчерского управления любого уровня – сетевого, регионального (дорожного) или линейного.

Решение графической задачи на разных горизонтах планирования имеет различия. Сетевой уровень предполагает определение расписания движения по укрупненным участкам полигона железных дорог. При этом используют макро-модели движения потоков поездов. Построение расписания для локальной пространственно-временной области производится на основе мезо-модели. Детальный график локального уровня, который регулирует движение поездов внутри станций и в зонах путевых скрещений, строится на основе микро-модели участка.

Одним из основных звеньев, снижающих эффективность работы направления, являются сортировочные станции. На их долю приходится основная часть (около 80 процентов) задержек грузовых поездов. Ситуация улучшается, когда график производства операций по расформированию и формированию составов непрерывно отслеживается и корректируется [22, 112].

1.3 Зарождение и развитие идеи гибкого управления движением поездов

А. Основной функцией оперативного диспетчерского управления является компенсация отклонений в процессе движения поездов. Свойство противостоять случайным воздействиям - *адаптивность* – предполагает наличие таких способов корректирования, которые обладают гибкостью, превентивностью (способностью производства профилактических действий) и синхронностью (минимальным отставанием управляющих воздействий от моментов появления отклонений).

Первые идеи и конкретные способы адаптации появились в конце 30-х годов прошлого столетия в задачах по оптимизации работы предприятий. Изложение прикладной теории поиска и поддержания оптимального состояния системы содержится в работах [124, 167, 169]. Согласно [264], адаптация (саморегулирование) означает постепенное изменение усредненных свойств системы в стохастической среде. Отличие от процесса регулирования заключается в том, что адаптивная система способна изменять свою структуру, подстраиваться в соответ-

ствии с изменениями среды [22, 291]. В фундаментальной работе по теории адаптации [142] Дж. Траксел отметил: «...перспективной чертой принципа адаптации является возможность введения механизма обучения... Когда обучение комбинируется с приспособливанием, система управления получает гибкость и способность решать серьезные задачи».

Наличие всех указанных выше признаков позволяет считать процесс тонкого регулирования движения поездов с оперативной корректировкой графика типичным адаптивным процессом [28]. Адаптация проявляется в том, что перед решением оптимизационной задачи в аппаратно-программном комплексе производится выбор и настройка модели, соответствующей текущей ситуации.

Идея адаптации движения грузовых поездов к реальной ситуации возникла в 30-х годах прошлого века, когда наметился интенсивный рост объемов перевозок, А.Н. Фроловым было показано, что жесткое регулирование движения поездов значительно снижает использование пропускной способности, ухудшает экономику дороги. Автор заявил о необходимости подстраивать график движения в соответствии с требованиями реальной ситуации. При этом он опирался на теоретические расчеты и на исторический опыт Российских железных дорог: «... в довоенные времена разрешалось отправлять товарные поезда и не по расписанию, если такое отправление выгодно. Теперь ... ведется кампания за движение товарных поездов по расписанию и ведется весьма жестко. Нужно бороться не просто за движение по расписанию вообще, а за хорошее расписание, вполне отвечающее потребностям места и времени» [150]. Недостаточное развитие технических средств тогда не позволило реализовать подстройку графика движения в реальном времени. Перспективы внедрения гибкой технологии возникли тогда, когда началось массовое оснащение железных дорог прогрессивными системами связи, сигнализации и автоблокировки.

Проблему реализации эффективного диспетчерского руководства в современной постановке исследовали представители «управленческого» отряда железнодорожной науки: А.Д. Каретников, Д.Ю. Левин, Л.П. Тулупов, И.Н. Шапкин, П.В. Куренков, И.Н. Тимошек, Л.А. Баранов, В.А. Ивницкий и другие [10, 72, 93,

104, 143, 156]. Работы в указанном направлении проводились также в ряде стран Европы (см., например, обзор [287]). Однако способов тонкой подстройки движения к меняющимся условиям предложено не много. Причиной является отсутствие достаточного арсенала средств информационного обеспечения и теоретического аппарата, позволяющего выбрать оптимальное решение.

Быстрый рост объема грузовых перевозок в 70-х годах прошлого столетия привел к исчерпанию пропускной способности основных железнодорожных направлений. Это вызвало новый всплеск интереса к проблеме ситуационного управления перевозочным процессом. Одним из первых В.С. Климанов подверг детальному рассмотрению круг задач в области оперативной корректировки графика грузового движения [80]. Полученные им результаты подтверждают положение, что реальные ситуации на железной дороге далеко не всегда разрешаются с использованием нормативных (предписанных заранее) технологических решений.

Реформирование Российских железных дорог в начале 21 века актуализировало задачи повышения экономической эффективности перевозочного процесса. Управление перевозками становится одним из наиболее важных факторов улучшения экономики ОАО «РЖД». Это вызывает увеличение числа работ, в которых рассматривается проблема гибкого, эффективного управления [70, 104]. Растет число исследований, направленных на совершенствование графика движения. Идея использования грузового графика с жесткими нитками (нитками ядра) и дополнительными (факультативными) нитками [109], по существу, является попыткой ввода элементов адаптивного управления в каждодневную практику. Пример использования механизма оперативной коррекции приведен в работе [147], в которой решается задача автоматизированного перерасчета параметров графика непосредственно перед началом ремонтного «окна».

Во многих работах, в которых исследуются пути совершенствования процесса движения поездов (например, в [93, 161]), в качестве исходного принимается следующее положение: предпосылкой для смягчения требований к временным характеристикам техпроцессов служат резервы, которые заложены в график. Это означает, что продолжительность операций на перегонах и станциях должна —

в необходимых случаях - устанавливаться индивидуально для конкретных подвижных единиц. Эти обоснованные, экономически целесообразные регулировки определяются при текущем планировании.

Следует отметить, что идея корректировки графика движения в реальном времени еще 15-20 лет назад рядом ведущих российских исследователей не признавалась актуальной. Так, в обзорной работе [105] полностью отсутствует информация о гибком управлении и его эффективности.

Б. Наиболее активно в последнем десятилетии исследуется проблема оперативной корректировки пассажирского графика в условиях возникновения случайных отклонений. Пристальное внимание к решению указанной проблемы связано с увеличением объема перевозок в густонаселенных районах мира: Европе, Японии, Юго-Восточной Азии и др.

Задача обеспечения гибкого управления в приложении к пассажирскому сегменту железнодорожных перевозок, по-видимому, впервые исследована в работе [76]. В начале 2000-х годов европейскими учеными предложена концепция динамического управления движением пассажирских поездов (Railway Dynamic Traffic Management - RDTM) [278]. В этой концепции определяется, что устойчивость движения по отношению к отклонениям обеспечивается путем оперативного перераспределения резервов времени, изменения последовательности и маршрутов пропуска поездов.

Технология RDTM основывается на принципах замены точных моментов прибытия/отправления поездов интервалами («окнами») при сохранении жесткого публичного расписания, а также корректирования графика в реальном времени. В развитие указанной концепции разработана методология моделирования [258, 266]. Большинство работ по проблеме текущего перепланирования использует детерминированные модели движения по участку. В процессе поиска оптимальных регулировок решаются два вида задач: обнаружения, разрешения конфликтов (CDR) и согласования скорости движения поездов (TSC) [179, 215, 270].

В качестве критериев при решении оптимизационных задач по корректировке пассажирского движения используются показатели пунктуальности. Как правило, рассматривается суммарная величина опозданий по всем поездам в заданный период времени (чаще всего, за час). Работы, в которых пытаются применять экономические показатели качества пропуска пассажирского потока, так или иначе, интерпретируют опоздания поездов. Поиск регулировок, которые уменьшают опоздания, производится с использованием дискретных моделей и методов линейного программирования [217, 240].

Исследований, которые используют при решении локальной оптимизационной железнодорожной задачи в явном виде экономический критерий – величину прибыли или расходов, – автору не известно. В некоторых работах [257, 289] лишь высказывается идея оценивания результатов мероприятий по улучшению пропуска грузовых поездов на основе анализа затрат. Аналогичная задача формулируется и для сферы автомобильных грузовых перевозок [282].

Имеется ограниченное число публикаций (например, [57]), в которых показывается определяющая роль расходов по оплате энергии (топлива) в формировании переменной части эксплуатационных затрат. Опубликовано много работ (например, [87, 173]), в которых рассчитывается траектория движения поезда, обеспечивающая минимальный расход энергетического ресурса. Вопрос оперативной подстройки движения потока по энергетическому критерию рассматривается лишь в единичных работах, нуждается в дальнейшем уточнении и развитии.

Последние годы ознаменованы значительным увеличением интереса исследователей и разработчиков к проблеме создания интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Концепция ИТС предполагает использование механизма адаптации в качестве одного из главных принципов построения системы управления. Наиболее интенсивно развивается это направление в области автомобильного транспорта (см., например, источники [27, 229, 230]).

Идея создания интеллектуальной системы управления железнодорожными перевозками впервые высказана учеными США в последней декаде XX века [221]. Концепция железнодорожной ИТС окончательно сформулирована в трудах

ученых КНР [298] и поддержана работами российских ученых [20, 99, 146, 155, 158]. На современном этапе высокий уровень развития информационных технологий, алгоритмического и программного обеспечения позволяет реализовать идею адаптации всего транспортного процесса к меняющейся среде.

1.4 Системный анализ процесса оперативного управления движением поездов

1.4.1 Классификация задач оперативного управления движением

В работе [72] приведена классификация задач управления сложными системами, к классу которых относится железнодорожный транспорт. В качестве главного признака, определяющего особенности управления, названо развертывание процесса во времени. Соответственно, управляющие задачи характеризуют как *динамические*. Задачи, где невозможна строгая формализация с использованием анализа на уровне тонкой структуры, к классу оптимизационных не относят. Эти задачи называют «управлением по отклонениям». При этом авторы обходят молчанием другое важнейшее свойство транспортного процесса – его стохастичность. В управленческих задачах, когда будущие реальные условия можно спрогнозировать лишь с определенной вероятностью, никакая детализация не дает надежного решения оптимизационной задачи.

Управление производственным процессом можно разделить по виду механизма выработки решений на консервативное и превентивное. *Консервативное* (корректирующее) управление предполагает действие лица, несущего ответственность за ход процесса и принимающего решения (ЛПР), в ответ на уже возникшее отклонение от заданного состояния. Такой вид называют *управлением по событиям* (event-driven control). *Превентивное* управление есть производство профилактических мер, предназначенных для исключения (или смягчения последствий) вероятных отклонений в предстоящем развитии процесса. Если же сбой, вопреки прогнозу, не реализуется, резерв используется для получения выигрыша в затратах ресурсов.

Концепция непрерывного *управления по времени* (time-driven control) предполагает, что данные мониторинга дают органу управления возможность заблаговременного обнаружения уже возникших и будущих конфликтов, выработки мер по их предупреждению. Такое алгоритмическое решение принято называть *корректировкой (перепланированием) в реальном времени* (real-time rescheduling).

1.4.2 Обобщенная модель процесса диспетчерского руководства

А. Исследуя особенности диспетчерского руководства, ориентированного на использование адаптационных механизмов, предлагаем модель процесса оперативного управления на железной дороге. Применив методологию системного анализа [137], заключаем, что сфера управления перевозками построена по иерархическому принципу. Обобщенная модель процесса текущего управления при этом представляется в виде набора колец регулирования разного уровня (рисунок 1.2). Каждое из колец включает элемент контроля и элемент выработки управляющего воздействия.

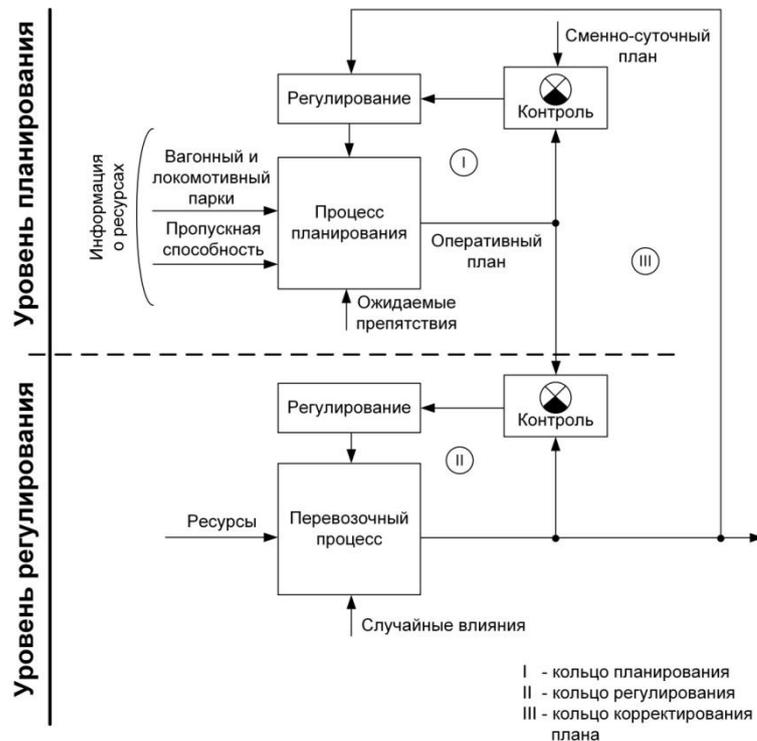


Рисунок 1.2 - Модель процесса оперативного управления

Задания - исходные установки - поступают с верхнего уровня управления. При переходе с вышестоящего уровня на нижестоящий изменяются характер целевых установок и совокупность показателей плана. Оперативное управление макро-уровня направлено, преимущественно, на выполнение объемов перевозок, то есть, на обеспечение доходов корпорации. В то же время, целеполагание на нижних уровнях более ориентировано на максимально эффективное использование основных средств и ресурсов, то есть, на снижение затрат. Многоэтапность процесса отражается в разделении на долговременное (на период года и более), среднесрочное (квартальное, месячное) и оперативное планирование [302].

Б. В ряде исследований (например, в [26]) цель диспетчерского руководства понимают как безусловное соблюдение графика движения – без учета приоритетности пропуска поездов. При таком подходе можно утверждать, что в качестве диспетчера способен успешно работать автомат. Отклонения от графика устраняются в результате срабатывания кольца регулирования. Диспетчер вместе с техническими средствами, его обслуживающими, – телекоммуникациями, системой ДЦ и др. – в таком контексте представляется в виде цепи регулирования, описываемой детерминированной функцией $A[\varepsilon(t)]$, где $\varepsilon(t)$ - рассогласование между фактическим и нормативным графиками. Результатом действий диспетчера является такое изменение скоростных характеристик поездов, которое ведет к уменьшению отклонений.

Корректировка траектории движения каждого средства в адаптивной системе осуществляется путем сочетания двух видов воздействий – от бортовой системы управления и от диспетчера [117]. Чтобы обеспечить высокую эффективность процесса, необходимо согласовать между собой указанные воздействия. Согласование производят, реализуя двухуровневое позиционное управление [5]. Первый уровень предполагает полностью заданной программную траекторию объекта. Если программное движение объекта нарушается, идентификацию функции движения решает второй уровень.

Задачи полуавтоматического управления распространены в диспетчерской практике. Как явствует из функциональной схемы (рисунок 1.3), второй уровень



Рисунок 1.3 - Структура системы двухуровневого управления

представлен оператором, который, используя собственные данные о движении объекта, управляет им. Первый уровень управления вступает в действие в экстремальной ситуации. Создав первый уровень, работающий в автоматическом режиме («автодиспетчер»), удаётся помочь оператору, так как теперь для формирования стратегии второго уровня необходимо знание только вырожденной системы.

В. Опыт создания и эксплуатации АСУ промышленными объектами показал, что в условиях возникновения нестандартных (экстремальных) ситуаций, когда высок уровень неопределенности и имеется дефицит времени, простое наращивание объема информации малоэффективно. В основе нового подхода к управлению лежит когнитивная концепция действий оператора [153], которая признает определяющую роль знаний в задаче выработки оптимального решения.

На рисунке 1.4 приведена схема реализации информационных процессов в интеллектуальной АСУ. В автоматизированную систему, поддерживающую работу оператора, поступает актуальная информация с объекта. Система имитирует процесс, включающий обобщение ситуации, выбор тактики разрешения конфликта, нахождение решений, близких оптимальному. Набор решений предлагается оператору, который вправе отвергнуть или принять любое из них.

На первых этапах создания интеллектуальных управляющих систем в 80-х годах XX века казалось, что во многих сферах автоматы заменят человека-оператора. Таких изменений не произошло; созданы и успешно функционируют когнитивные системы, где человек и техника кооперируют в осуществлении эффективного управления. Причины отсутствия полной замены: ненадежность решений,

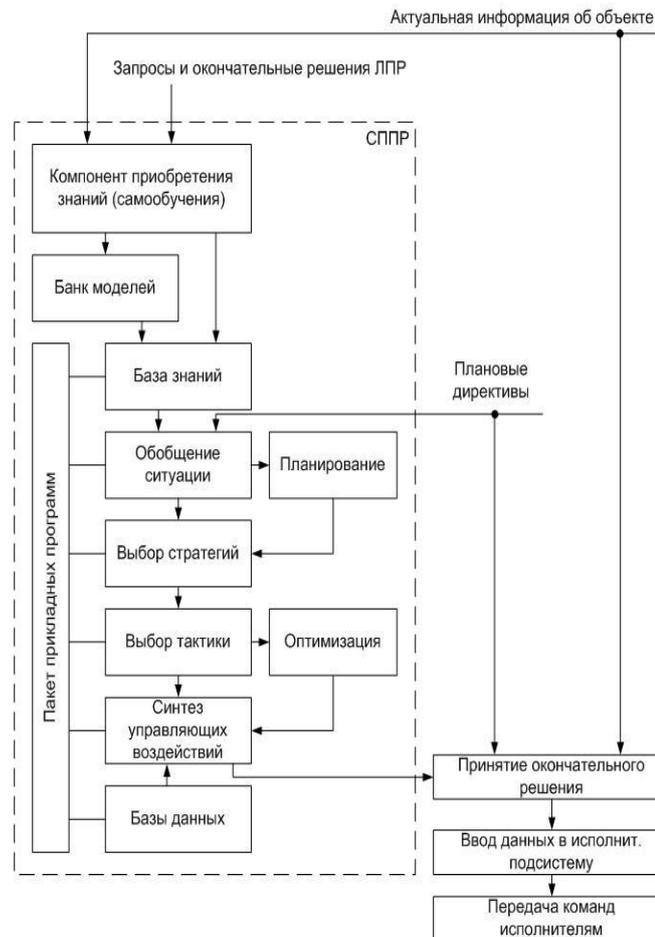


Рисунок 1.4 - Информационные процессы в интеллектуальной АСУ

принимаемых автоматом в сложных условиях, и неполное доверие человека к работе техники в потенциально опасных ситуациях. К примеру, в результате изучения работы поездных диспетчеров сделан вывод: следует проявлять осторожность в использовании таких человеко-машинных систем, в которых существенно снижена информированность оператора о состоянии объекта [283].

1.5. Конфликты в движении поездов и способы их разрешения

Целью корректировки графика движения в реальном времени является ликвидация возникших отклонений и максимально возможное исключение будущих конфликтов между поездами. Конфликт возникает при стремлении использования двумя (или более) поездами элемента путевой инфраструктуры (блок-

участка) на протяжении одного и того же отрезка времени. Признаком конфликта является уменьшение интервала между поездами до критического значения.

Причинами появления конфликта являются:

- нарушения процесса пропуска на предшествующих участках;
- различие скоростных характеристик и тягового потенциала поездов;
- потери скорости, остановки, вызванные техническими и технологическими отказами.

Отклонения от графика происходят также из-за нерасчетливых действий людей – машинистов поездов и работников станций. Например, значительная часть отклонений обусловлена несоответствием параметров и характеристик поездов (тяги, веса и др.) стандартным. Машинисты по-разному учитывают эти особенности, а также реагируют на спорадические изменения условий пропуска, допуская нарушения графика.

Задержки поездов разделяют на первичные и вторичные. *Первичная* задержка возникает, если происходит отказ оборудования поезда или если система безопасности выдает запрещающий (ограничительный) сигнал, свидетельствующий об отказе инфраструктуры. Если же затруднение вызвано тем, что элемент занят другим поездом, задержку считают *вторичной*. События, приводящие к задержкам (или ускорениям) в продвижении поезда, могут быть детерминированными или случайными (внезапными).

Меры повышения отказоустойчивости графика движения в известной степени снижают взаимовлияние поездов при возникновении задержек. К примеру, имеются предложения ежемесячно подстраивать грузовой сегмент графика под размеры движения. Очевидно, использование такого варианта малоэффективно вследствие неучета «быстрых» колебаний размера движения. Анализ реальных данных показывает, что и суточное планирование слабо улучшает ситуацию.

Статистические данные свидетельствуют о низком уровне исполнения графика движения поездов на сети железных дорог России. Так, за один квартал 2010 г. число нарушений графика на дорогах РФ составило около 1,4 млн. [122]. Одной из главных причин является увеличение интенсивности движения поездов. В

рыночных условиях неравномерность потока грузовых поездов возрастает [133]. На загруженных направлениях с интенсивностью более 3000 вагонов в сутки коэффициент вариации посуточных колебаний достигает значения 0,12, при этом пунктуальность снижается [149]. Так, например, в 2010 году показатель грузооборота по РЖД увеличился на 58 млрд. ткм. При этом процент выполнения графика проследования уменьшился на 2,8 проц. Число отказов растет также вследствие повышения массы поездов. Средняя масса в период с 1998 г. по 2010 г. выросла на 770 т., что повлекло увеличение количества боксований и остановок на критических подъемах [100]. Степень использования пропускной способности магистральной линии значительно снижается (на 15-20 проц.) вследствие технических отказов и ремонтных «окон» [92].

В процессе разрешения конфликта оптимизируется траектория движения каждого из поездов, планируется их рациональный подвод к станциям. Малые отклонения устраняются путем регулирования скоростных характеристик поездов (*delay management*), серьезные сбои – посредством изменения порядка их следования (*disruption management*) [272]. Процедуру корректировки графика в режиме реального времени характеризуют как *оперативное перепланирование* движения поездов. Операцию перепланирования проводят с заданной периодичностью (1 или 10 мин.) или в моменты поступления информации о возникших отклонениях.

Чтобы избежать конфликта, производится смещение линий хода по шкале времени или изменение скорости одного из поездов – вплоть до полной остановки. В ряде случаев используют смену порядка следования поездов (обгон). Оптимизация графика заключается в выборе такой совокупности траекторий, которая наилучшим образом удовлетворяет требованиям заданного критерия. *Основной проблемой* текущего управления является балансирование требований пунктуальности и экономической эффективности при пропуске потока поездов.

Типичной ситуацией, приводящей к возникновению попутного конфликта, служит уменьшение интервала в пакете при рассогласовании скорости поездов. Существуют три варианта реакции последующего поезда на ограничивающий сигнал, которые необходимы для разрешения конфликта (рисунок 1.5) [168]:

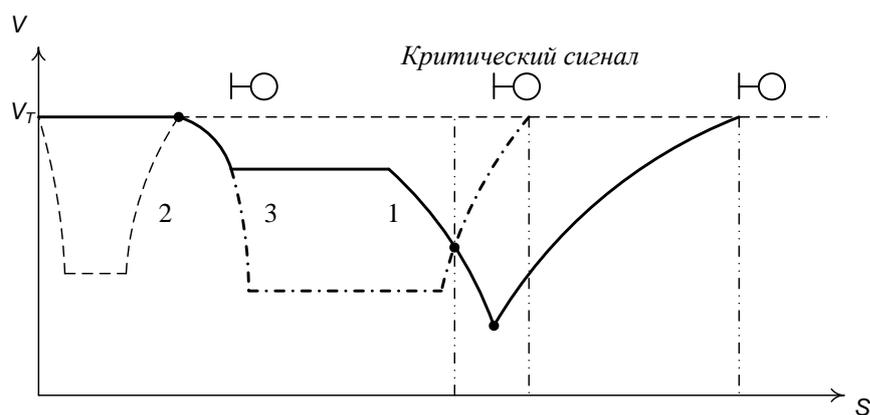


Рисунок 1.5 - Кривые изменения скорости при типовых вариантах движения

1 ——— максимальный режим; 2 - - - режим "зеленая волна"; 3 - · - · - режим оптимального движения

- с использованием стандартного (максимального) режима (кривая 1);
- с использованием оптимальной (по времени) траектории (кривая 2);
- по энергооптимальной траектории (кривая 3).

Встретив желтый сигнал, включенный передним поездом, данный (регулируемый) поезд может двигаться по стандартной траектории 1 – с двумя торможениями и плавным ускорением при входе в зону действия зеленого сигнала. Если же применить максимальные режимы торможения и ускорения (траектория 2), удастся сократить время задержки и снизить потерю энергии.

1.6 Новый подход к проблеме текущего управления движением поездов

А. Традиционная парадигма централизованного управления участком дороги основана на идее обеспечения движения всех типов поездов по жесткому графику с фиксированными (нормативными) временами хода. При этом естественными являются стремление к увеличению «твердого» ядра грузового графика, повышению скорости следования грузовых поездов, а также ослабленное внимание к экономии расходов. Такой подход не предполагает корректировку технологии управления в периоды, характеризуемые различной интенсивностью потока поездов и измененным состоянием инфраструктуры. В рамках традиционного подхода основное требование текущего управления движением понимается как

безусловное (не зависящее от ситуации) обеспечение нормативного времени выполнения всех операций, как при движении, так и при обработке поездов на станциях. В условиях потока возникших отклонений требование неукоснительного соблюдения нормативов, в конечном счете, ведет к общему высокому уровню опозданий и перерасходу ресурсов.

Одним из примеров использования традиционного подхода является технология ГДПР [109], в которой адаптивное движение к пульсациям грузового вагонопотока осуществляется путем назначения графика, включающего нитки «ядра» и факультативные нитки. Расписание движения всех поездов по промежуточным станциям принимается жестким. Полагают, что экономический выигрыш получается от ежемесячной корректировки графика грузового движения – в отличие от существующей (годовой). Эффективность такой методики низка, так как экстраполяция по данным предыдущего месяца или прошлого года не учитывает фактического состояния инфраструктуры и пульсации потока.

Основными предпосылками, приводящими к смене парадигмы текущего управления движением поездов, служат повышение требований к эффективности перевозок и улучшение оснащенности железных дорог средствами автоматизации и получения информации. Прогрессивный подход к решению проблемы исходит из идеи, что **требования к временным характеристикам техпроцессов в грузовом сегменте железнодорожного движения должны быть гибкими, зависящими от складывающейся ситуации.** Пооперационные нормы на перегонах и станциях должны жестко соблюдаться лишь при невозмущенных условиях работы участка дороги. Если же график движения нарушен, требование к соблюдению норм должно смягчаться. Продолжительность операций на станциях, расписание движения для конкретных подвижных единиц в этих условиях устанавливается индивидуально, исходя из требований наиболее экономичного преодоления конфликтных ситуаций. Неизменным для управления движением остается лишь требование доставки грузов в сроки, не вызывающие штрафных санкций.

Таким образом, новый подход к проблеме текущего управления движением поездов предполагает **признать законным вариативность операционных норм**

работы звеньев перевозочного процесса на перегонах и станциях с целью ликвидации отклонений от графика или предотвращения возможных отклонений. Скорректированные нормы принимаются к реализации и, кроме того, служат базой для оценки качества функционирования звеньев процесса. Основные положения, которые кладутся в основу прогрессивной технологии текущего управления, в той или иной форме высказаны в работах [143, 161].

Б. В соответствии с новым подходом, реализуются два варианта пропуска потока грузовых поездов. По первому варианту используется жесткое расписание в периоды, когда происходит сгущение потока. Критерием оптимизации при этом сузит показатель пунктуальности. Второй вариант предполагает оперативное введение особого (энергосберегающего) режима с увеличенными резервами времени хода в тех внутрисуточных интервалах, когда наблюдается спад интенсивности потока. Результатами служат снижение числа неграфиковых остановок в пути и более точный подвод поездов к техническим (участковым) станциям.

Такой подход используют авторы работ [111, 162] при решении отдельных задач текущего управления. В частности, предлагают разрабатывать варианты энергетически оптимальных расписаний движения поездов для использования в заранее заданные периоды суток (что эффективно в пригородном движении) или по мере возникновения условий. Последний вариант вводит в действие диспетчер при изменении поездной (инфраструктурной) ситуации на участке.

С целью повышения устойчивости, также предложено использовать *вариативный* график движения [76]. В этот график включают основные и резервные нитки грузовых поездов. Участковая скорость на резервных нитках понижена из-за увеличения числа остановок. Технология ГДПР является развитием предложенной идеи. Поезда «ядра» отправляются с участковой станции в жестко фиксированные моменты времени. Масса и длина поездов при этом могут не соответствовать нормативам. Утверждается, что использование этой технологии позволяет снизить влияние флюктуаций числа поездов. Однако быстрые колеба-

ния потока все равно приводят либо к недостаточному вывозу поездов со станций, либо к простоям локомотивов и отмене локомотивных бригад.

Подчеркнем, что можно уменьшить число отклонений путем ужесточения технологической (исполнительской) дисциплины, но полностью они устранены быть не могут. Более эффективным является тонкое регулирование движения поездов на участке железной дороги, что называют *диспетчерским маневром* [118]. Свобода маневра ограничивается требованиями безопасности и нагрузочной способностью системы тягового электроснабжения.

1.7 Способ оперативной профилактической коррекции движения

А. Решения по урегулированию конфликтов, принимаемые поездным диспетчером, основываются на системе установленных правил и на собственном опыте. Кроме того, диспетчер руководствуется соображениями коммерческого плана. Можно выделить два существенно различных способа коррекции движения поездов: групповой и индивидуальный (прицельный). *Групповой* способ ориентирован на профилактику множественных конфликтов. Одним из вариантов является введение добавок к перегонным временам. Другой вариант регулирования заключается в принудительном увеличении интервала попутного следования (по всему пакету грузовых поездов), что создает дополнительный временной резерв. При снижении угрозы возникновения конфликта этот резерв может быть использован для повышения энергоэффективности.

В реальных условиях функционирования железной дороги ежедневно присутствуют периоды, которые характеризуются снижением интенсивности потока; в эти периоды интервал в пакете увеличивается до $T_{\text{п}}^{\text{уд}}$. Временная полоса, занимаемая пакетом, расширяется до значения $T_{\text{пак}}^{\text{уд}}$ (рисунок 1.6б). Увеличение интервала предотвращает распространение задержек по цепи поездов. Дополнительный резерв времени, который появляется при снижении интенсивности

потока, может быть использован для реализации режима, при котором экономится энергетический ресурс.

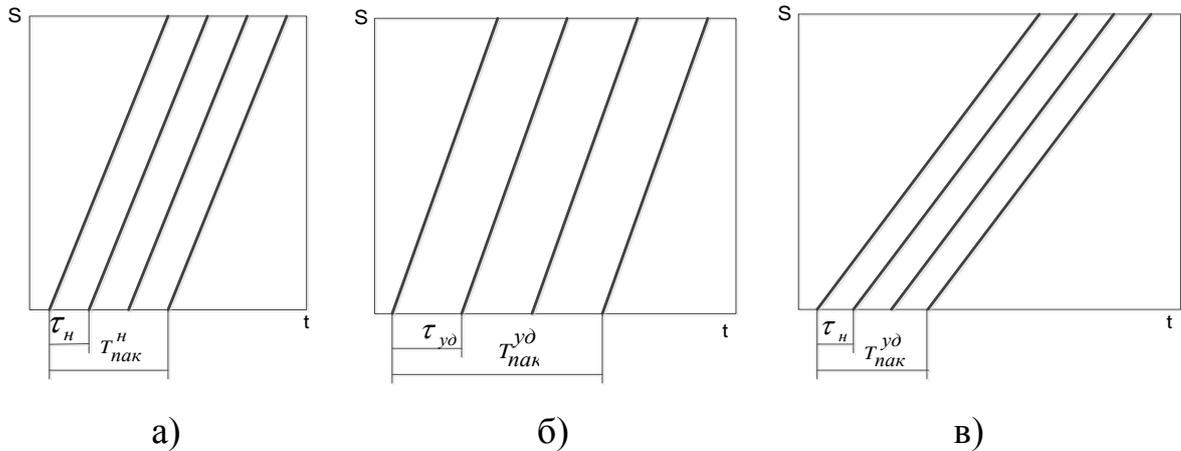


Рисунок 1.6 - Варианты пропуска пакета грузовых поездов по участку дороги
 а) по графиковым нормам; б) по разреженному графику; в) с увеличенным временем хода

Способ коррекции графика - увеличение времени хода $t^{y\delta}$ (рисунок 1.6в) – позволяет снизить число задержек в период, когда появляется свобода маневра.

Дадим оценку резерва чистого времени хода, который возникает при реализации замедленного (экономичного) режима. Этот резерв используется при разрешении межпоездных конфликтов. Суммарное время движения $t_{сумм}$ при реализации графикового (нормативного) интервала составляет:

$$t_{сумм} = Nt \quad (1.1)$$

В случае, если интервал пакетного следования увеличивается до значения $T_{зр}^{y\delta}$, время $T_{нак}^{y\delta}$, по истечении которого перегон освобождается, равно:

$$T_{нак}^{y\delta} = t_{y\delta} + (N - 1)T_{зр}^{y\delta} \quad (1.2)$$

Допустим, в качестве оптимизирующей регулировки используется вариант с удлиненными временами хода $t^{y\delta}$ и произвольным периодом T . Если при этом сохранить интервал $T_{нак}^{y\delta}$, показатель суммарной продолжительности следования всех поездов $t_{сумм}$ увеличивается до значения:

$$t_{сумм}^{y\delta} = Nt^{y\delta} + N(N - 1)(T_{зр}^{y\delta} - T) \quad (1.3)$$

Максимальное добавочное время хода образуется при реализации графика с удлинненными временами хода и наиболее плотным отправлением поездов со станции, когда межпоездной интервал равен $T_{сп}$. Добавка составляет:

$$t_{сумм}^{доб} = N(N - 1)(T_{сп}^{уд} - T_{сп}) \quad (1.4)$$

Назначение удлинненных времен хода приводит к экономии топливного ресурса за счет использования оптимальных режимов тяги. Увеличение же интервала способствует снижению числа неграфиковых задержек, что также приводит к устранению потерь энергии. При выборе оптимального решения нужно учитывать тот факт, что оба указанных вида регулировок между собой конкурируют; при определенном их сочетании расход энергии минимален. Алгоритм выбора оптимального решения рассматривается в параграфах 2.4, 2.8.

Б. Способ *прицельного регулирования* заключается в корректировке расписания движения отдельного поезда для выполнения двух задач:

- использования режима подхода к точке потенциального конфликта, позволяющего избежать собственной задержки и (или) сэкономить расходы;
- обеспечения минимального влияния на другие поезда.

Комплекс действий, которые должен реализовать персонал ДЦУП при использовании прогрессивной технологии текущего управления, можно разделить на три блока. Первый из них (блок I) заключается в определении полос графика, в которых будут применены интенсивный или экономичный режимы пропуска.

Блок II предполагает определение порядка отправления грузовых поездов с узловых (технических) станций с учетом их приоритетности – коммерческой и технической. Рассматривают сценарий вынужденного ожидания поездов на станциях из-за случайных отклонений при различных вариантах отправления. Такой подход аналогичен поиску оптимальных регулировок в телекоммуникационной пакетной сети [151].

Блок регулировок III предусматривает назначение каждому поезду или группе поездов траектории движения, оптимизированной по критериям локального экономического результата или расхода энергоресурса. Траектория движе-

ния подстраивается одним из двух способов: вводом опаздывающего поезда в график или назначением такого скоростного режима, который минимизирует потери. Так, например, в случае кратковременной неграфиковой остановки ведущего поезда диспетчер может целенаправленно назначить режим замедления поезду, следующему сзади. При этом будет исключена остановка этого поезда, следовательно, и потеря топливно-энергетического ресурса.

Принцип превентивного регулирования предусматривает также целенаправленное изменение скорости грузовых поездов и при отсутствии препятствий их следованию - с целью получения наилучшего экономического результата. Эта подстройка производится в те внутрисуточные периоды времени, когда наблюдается спад интенсивности потока. Диспетчером оперативно вводятся специальные добавки к временам хода с целью получения экономии за счет использования энергосберегающих режимов. В статье [119] предложена идея тонкой подстройки перегонных времен с учетом фактических показателей нагрузки на ось вагона.

В работе [147] рассматривается задача адаптивного регулирования движения поездов в периоды ремонтных «окон». График корректируется при значительных отклонениях фактического следования от нормативного. Недостатком предложенного подхода является отсутствие механизма прогнозирования случайных возмущений на участке «окна» и выполнения профилактических мероприятий по предотвращению конфликтов между поездами.

Определение видов и параметров корректирующих мер облегчается, если используется СППР, поддерживающая работу диспетчера. В этой системе автоматически генерируются варианты траекторий, увязываются с линиями хода других поездов – с целью минимизации конфликтов между поездами. Корректировка графика производится в диалоговом режиме, который организуется между диспетчером и системой интеллектуальной поддержки. Выбранные решения, преобразованные в распоряжения диспетчера, передаются на станции и на локомотивы.

1.8 Оптимальный сценарий функционирования участка дороги

Под оптимальным сценарием функционирования участка дороги в настоящем рассмотрении понимаем такое сочетание различных режимов пропуска потока поездов, которое обеспечивает лучший экономический результат [46]. *Интенсивный* режим вводится в период, когда коэффициент использования пропускной способности велик. Текущее управление в этот период направлено на максимально точное соблюдение графика. В период, когда интенсивность потока снижена, может решаться задача другого плана – экономии затрат на пропуск поездов. Это касается, в первую очередь, рядовых грузовых поездов, которых на магистральных направлениях РЖД большинство. Такой режим отнесем к виду *экономичных*. В период экономичного пропуска вводятся добавки к времени хода за счет появившихся резервов (см. рисунок 1.7). Целенаправленное снижение скорости на некоторых элементах пути приводит к уменьшению числа неграфиковых задержек и, кроме того, к экономии энергии при использовании оптимальных режимов тяги [47].

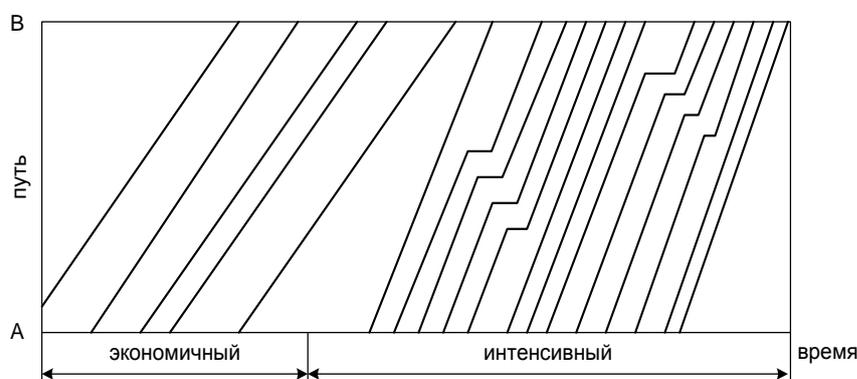


Рисунок 1.7 - Пример использования экономичного и интенсивного режимов в гибком графике движения грузовых поездов

Граница, которая разделяет периоды экономичного и интенсивного пропуска грузовых поездов, определяется с использованием результатов стохастического моделирования [211]. Экономичный режим вводится, когда интервал в пакете достигает значения $T_{отп}^{сп}$; при этом вероятность возникновения не менее k вторичных задержек не превышает заданного уровня α . Методика расчета этой

величины приводится в п. 3.4. В реальном примере показывается, что если интервал отправления грузовых поездов составляет 5,8 мин., следствием сбоя является возникновение четырех неплановых задержек с вероятностью 0,9.

1.9 Проблема моделирования движения поездов и корректировки графика

А. Корректировка графика производится с учетом прогноза развития ситуации в заданном временном и пространственном горизонтах. Детерминированные методы прогнозирования строят модель движения на основе точной информации об их текущем местоположении, ходовых характеристиках и «узких» местах инфраструктуры [59, 140]. При вероятностном прогнозировании учитывается возможность возникновения внезапных событий в плановом периоде. В основе прогнозирования, помимо точной информации о текущей ситуации, лежит совокупность статистических характеристик отказов, полученная на основе анализа исторических данных [193]. Результатами расчета являются распределения отклонений моментов прибытия поездов на станции. На основе этих распределений определяются вероятность возникновения конфликтов, их опасность, а также профилактические меры. Основными проблемами при краткосрочном планировании являются построение адекватной модели движения на участке диспетчерского управления и выбор оптимальных регулировок.

Следование группы поездов по участку сети, включающему технические станции и соединяющие их линии, отражается *макроскопической* моделью. Траектория движения поезда в локальных зонах – с учетом дискретности инфраструктуры (блок-участков) – описывается *микроскопической* моделью. При решении ряда задач управления движением удобной формализацией является *меза-модель*, в которой абстрагируются от некоторых деталей инфраструктуры и траекторий движения поезда (локальных ускорений и др.).

Основная часть моделей реализует детерминистский подход к отражению динамичной поездной ситуации [3, 89, 247]. Каждый поезд в модели представляется в виде материальной точки или нерастяжимой нити. Детерминированная модель использует точные данные о координатах поездов и препятствиях на пути

движения. При моделировании учитываются моменты входа поездов на участок, их динамические характеристики и текущее состояние инфраструктуры.

Основным недостатком детерминированных моделей, используемых при поиске диспетчерских решений, является отсутствие учета риска возникновения случайных возмущений. Это приводит к упущению таких регулировок, которые позволяют наилучшим образом осуществлять профилактику опозданий и снижать расходы. Указанный недостаток в значительной степени компенсируется, если использовать стохастическую модель, позволяющую прогнозировать процесс возникновения случайных задержек и их распространения по цепи поездов. В одной из первых работ, рассматривающих эту задачу, предложен аналитический метод для определения опозданий путем свертки распределений исходных (на входе участка) и вновь возникающих задержек [262]. Анализ носит ограниченный характер, так как используется предположение о равномерном распределении вторичных задержек. В реальности это допущение не подтверждается [90].

Существуют модели и методы разработки, которые дают расписания, устойчивые к отклонениям в движении поездов на локальных сегментах [165, 294, 302]. Методы оперативной подстройки графика ориентированы, главным образом, на минимизацию суммарных задержек поездов. Используются простые правила диспетчерских регулировок (например, «первый пришел – первым обслужен») или статические перечни реакций на сбои [192].

Задачи оптимизации движения на обширной сети решаются с большим трудом. Алгоритмы корректировки графика движения работают неэффективно в реальном времени, требуют значительных вычислительных мощностей. Современные работы (например, [175]) разрабатывают модели и методы для оптимизации движения по большой сети железных дорог. Методология автоматической выработки решений по динамичному управлению движением на участке дороги требует дальнейшего развития.

Б. Алгоритмы обоснования корректирующих решений строятся на основе выводов теории расписаний [191]. Типовая методика, которая при этом исполь-

зуются, предполагает перебор всех возможных вариантов изменения добавок времени к операционным интервалам. Альтернативным способом реализации устойчивого графика является выбор определенной совокупности стандартных решений, которые применяются при возникновении затруднений [270].

Основные мероприятия, которые эффективны при повышении отказоустойчивости железнодорожного графика, предложил М. Carey [178]. В дальнейшем он разработал компьютерную модель, используемую для тестирования надежности графика движения. Для получения устойчивого графика, помимо оптимального распределения добавочного времени, предложено группировать пакеты поездов с идентичными тяговыми (и скоростными) характеристиками.

Обмен между максимальным использованием железнодорожной инфраструктуры и надежностью пропуска поездов – между величинами «физического максимума» и «экономической оптимальности» - есть ключевой вопрос в контексте оперативного управления [164, 241]. Нередко принудительное снижение интенсивности потока грузовых поездов практикуют поездные диспетчеры. Инструкций, регулирующих указанный обмен, нет. Выходом является моделирование процесса, назначение корректирующих действий с учетом их экономической эффективности и точное выполнение диспетчерских распоряжений.

Устойчивость к отклонениям от графика повышается при уменьшении интенсивности потока поездов. Снижение числа поездов в обмен на увеличение отказоустойчивости рассматривают как *плату за устойчивость* [172]. Разработаны аналитические измерители отказоустойчивости SSHR и SAHR [165, 296], отражающие связь между однородностью графика и распространением задержек. В работах [178, 234] предложено использовать показатель дисперсии рассеяния межпоездных интервалов для оценивания устойчивости. Компьютерное моделирование, проводимое при расчете оценки, заключается во введении отклонений в график, его подстройке и определении эффективности нового графика в сравнении с исходным. Устойчивость отражается (а) средней задержкой поездов из-за совокупности сбоев и (б) временем, которое необходимо для восстановления невозмущенного графика.

В. Предпосылкой использования вероятностного подхода служит всегда присутствующая неопределенность в структуре, поведении системы и характеристиках ее компонентов (поездов, элементов инфраструктуры, персонала). В этих условиях адекватной методологией является использование аппарата теории нечетких множеств [115].

Продуктивным является подход, при котором ожидаемые значения операционных времен получают из статистики предшествующих периодов. Для определения этих величин используется ситуационно-эвристический метод (СЭМН), который при построении прогноза позволяет учесть своеобразие условий пропуска в плановом периоде [156]. Случайными факторами, которые приводят к рассеянию операционных времен, являются:

- характеристики поезда: масса, длина, тип и состояние локомотива;
- квалификация локомотивной бригады;
- характеристики участка: временные ограничения скорости, насыщение перегонов и станций поездами;
- характеристики условий видимости и погодных условий.

Аналогичный подход используется и в работе [76], в которой моделирование проводится с использованием средних значений времени обработки поездов. Следует отметить, что попытка построения некоего среднестатистического графика движения поездов, основанного на складывающейся ситуации, чревата консервированием проблем, существующих на участке. Например, недостаточное развитие технической станции приводит к регулярным неграфиковым остановкам поездов на соседних промежуточных станциях и на перегонах.

Г. Методы компьютерного расчета оптимальных решений по динамичному управлению движением поездов, реализуемые в СППР, стали разрабатываться лишь в последнем десятилетии. Проблемами, которые приходится преодолевать разработчикам, являются:

- сложность генерирования графика для сети большого масштаба;
- значительное число ограничений, нечеткость исходной информации;

- проблемы численного анализа больших массивов данных.

Моделирование в процессе коррекции графика производится с использованием методологии, разработанной в рамках теории расписаний. Основные операции – ход и остановка, - а также порядок их выполнения отражаются элементами направленного графа. Поиск оптимальных решений по устранению конфликтов производится, как правило, с помощью алгоритмов смешанно-целочисленного линейного программирования [183, 219, 293]. Отличительной чертой большинства работ является использование исключительно критериев, характеризующих пунктуальность движения поездов.

В последних публикациях по проблеме управления на макро-уровне [187, 220, 251] предлагаются модели совместного управления маршрутами движения и пропускной способностью сети железных дорог. В работе [220] излагается идея: при решении задачи диспетчерского регулирования движения на большой сети применить иерархическое (двухуровневое) управление. Локальные планировщики вырабатывают оптимальные решения, принимая во внимание ограничения, которые им выдает региональный координатор – центр макро-управления. По аналогичному принципу строится и система централизованного управления работой совокупности («куста») железнодорожных станций [251].

Развитые математические модели и методы могут помочь в выполнении ретроспективного анализа стабильности и надежности графика движения по большой сети [172, 232]. Целью исследований является определение критических путей, необходимых резервов времени и, следовательно, эффективного способа улучшения железнодорожных расписаний.

Решение задачи обнаружения графических конфликтов на большой сети дорог и оптимального их разрешения требует наличия серьезных вычислительных мощностей и большого расчетного времени. Поэтому развитие области оперативного анализа идет в направлении методов и моделей, служащих для определения квазиоптимальных решений за малое, приемлемое для практики, время [190].

1.10 Новая меза-модель возмущенного движения: дерево взаимовлияний

В модели функционирования меза-уровня элементы инфраструктуры и траектории движения поездов представляются укрупнено (см. рисунок 1.8). В момент t_0 , соответствующий началу прогнозного интервала, часть поездов следует по участку, некоторые стоят на станциях (возможно, и на перегонах).

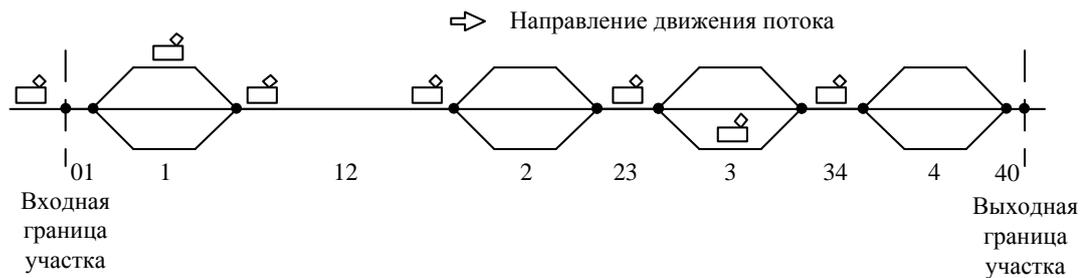


Рисунок 1.8 - Схема движения поездов одного направления по участку

Предложен новый подход к моделированию, при котором узлы событийного графа отражают изменение (или сохранение) параметров движения каждого поезда в ключевых точках пути [210]. К последним можно отнести участки временного ограничения скорости, а также точки возникновения конфликтов.

Новый подход предполагает унифицированное описание операций движения и остановки как элементов процесса формирования временной траектории. Построение графа основывается на упрощенной, мезоскопической модели представления процесса, в которой каждый узел соответствует точке изменения скорости при возникновении ограничительного сигнала.

Возмущенное движение поездов отображается в виде *дерева взаимовлияний*. Такая формализация представляет собой граф, узлы которого отражают наличие конкуренции между поездами за занятие элемента инфраструктуры в конфликтных точках (операционных пунктах - по терминологии [275]). Ограничивающими элементами могут быть блок-участки, скрещения путей и др. Предлагаемая модель отличается от графа, используемого в ряде работ (например, в [233]) тем, что в нее включаются только те точки, в которых отменяется (или восстанавливается) графиковый режим. В указанных точках либо возникает конфликт, либо скорость меняется принудительно по распоряжению диспетчера.

Конфликт на входной границе участка вследствие позднего прибытия лидирующего поезда 1 отражается фрагментом графа, показанным на рисунке 1.9а.

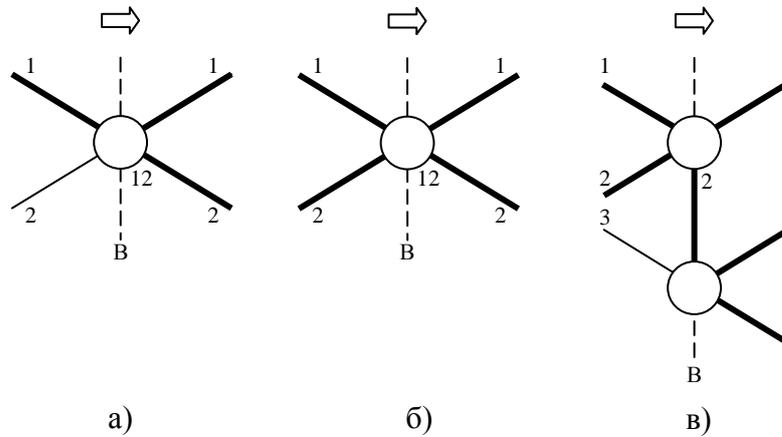


Рисунок 1.9 - Моделирование конфликта на входной границе участка

Следующий по графику поезд 2 приобретает опоздание после акта взаимодействия с поездом 1. Утолщенные линии (дуги графа) отражают операции хода и остановок, которые реализуются с задержками. Длина дуги соответствует продолжительности выполнения операции. Вариант сохранения опозданий обоих поездов после прохождения станции показан на рисунке 1.9б. Влияние конфликта может распространиться и на последующие поезда (например, на поезд 3; рисунок 1.9в).

На рисунке 1.10 изображены компоненты дерева, соответствующие задержкам из-за различия скорости поездов. Правый график иллюстрирует распростра-

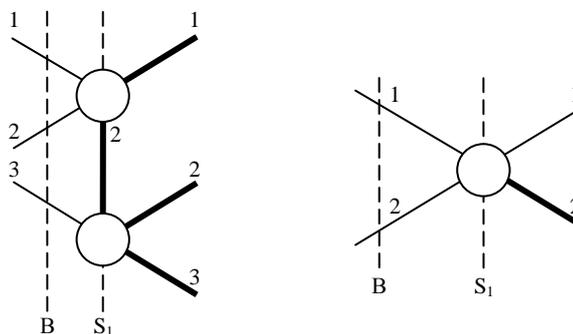


Рисунок 1.10 – Элемент, отражающий конфликт на перегоне

нение задержек на поезда 2 и 3 вследствие неграфиковой остановки поезда 1 на перегоне; на левом отражен конфликт при попутном движении в точке, где скоро-

стной поезд догоняет более медленный.

В дерево взаимовлияний также включаются узлы, которые отражают принудительное изменение режима движения поездов. На рисунке 1.11а показан фрагмент, в котором узлы соответствуют точкам введения (s_1) и отмены (s_2) режима нагона. В точке s_2 исчезает опоздание поезда благодаря движению с

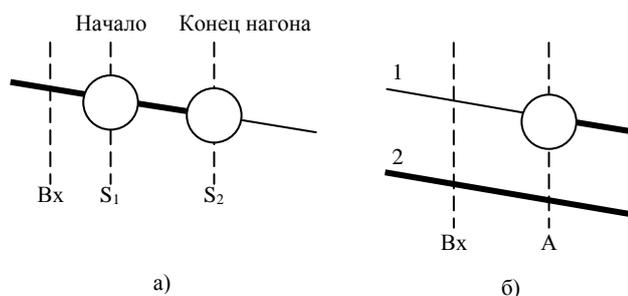


Рисунок 1.11 - Элементы дерева, отражающие смену режима движения
а) нагон графика на участке $[s_1, s_2]$ б) обгон поезда 1 поездом 2 на станции A

повышенной скоростью. На рисунке 1.11б приведен фрагмент, соответствующий обгону на станции A поезда 1 опаздывающим поездом 2. В результате остановки поезд 1 приобретает задержку.

Пример, показанный на рисунке 1.12, отражает процесс распространения задержек по сети в результате конфликтов различного характера. На входной станции IN при опоздании лидирующего поезда 1 возникает конфликт с последу-

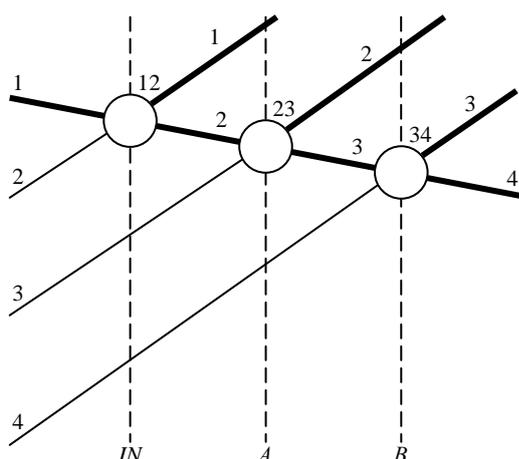


Рисунок 1.12 - Фрагмент дерева, иллюстрирующий размножение опозданий на станциях и на скрещениях

ющим поездом 2, который приобретает вторичную задержку. График движения нарушается, что вызывает новый конфликт, а именно, одновременное прибытие

поездов 2 и 3 к пункту A . В результате конфликта поезд 3 приобретает вторичную задержку. Это вызывает дальнейшее размножение опозданий на станции B , где производится пересадка, - позднее отправление поезда 4.

Поиск точек, в которых траектории искажаются вследствие возникновения конфликтов, производится путем решения цепочки двухпоездных задач. При поступлении сигнала о фактически возникшем отклонении от графика определяется ближайший по времени поезд, который может попасть под влияние возмущения. Это может быть поезд, идущий вслед опаздывающему, или поезд, прибывающий в точку скрещения маршрутов.

В предложенной модели состояние k -го поезда в конфликтной точке представляется отклонением τ_i^k фактического момента подхода поезда от соответствующего графического момента. Поезд движется по участку, проходя последовательно пункты с номерами i , $(i+1)$, $(i+2)$ и т. д. В каждой из операций им приобретает дополнительную задержку $\tau_{i,i+1}^k$. При следовании по маршруту опоздания накапливаются. Это позволяет трактовать структуру, отражающую взаимовлияние поездов, как *дерево текущих задержек*.

В процессе расчета определяется интервал времени Δt_i^0 , по прошествии которого поезд $(k+1)$ должен прибыть в точку конфликта после поезда k :

$$\Delta t_i = \Delta t_i^0 + \tau_i^{k+1} - \tau_i^k,$$

Величины τ_i^k , τ_i^{k+1} рассматриваются как опоздания, накопленные поездами на предшествующих частях маршрутов. Конфликт возникает, когда нарушается условие: $\Delta t_i < \Delta t_i^s$, где Δt_i^s – безопасный интервал. Это условие может быть записано в виде:

$$\tau_i^{k+1} - \tau_i^k > \Delta t_i^{ad},$$

где Δt_i^{ad} – добавочное (буферное) время, вводимое в нормативный график.

Заметим, что интервал Δt_i в процессе построения прогноза носит характер случайной величины. При моделировании для каждой потенциально конфликтной точки рассчитывается вероятностное распределение задержки на основе совоку-

ности времен всех предшествующих операций. При заданной границе, определяющей опоздание, рассчитывается вероятность возникновения конфликта. Ветвление дерева приостанавливается в тех узлах, где вероятность конфликта признается исчезающе малой.

1.11 Постановка задач исследования

Анализ литературных источников, проведенный в рамках диссертационной работы, позволил представить иерархию задач текущего управления движением (рисунок 1.13) и выделить направления, требующие углубленной разработки [44].



Рисунок 1.13 - Классификация задач текущего планирования и руководства движением поездов

Исследование показало, что основными направлениями совершенствования поездного диспетчерского управления являются корректировка графика в режиме реального времени и четкое исполнение запланированных мер. Приоритетные задачи выделены на рисунке желтым цветом. Наиболее эффективными признаются направления превентивного регулирования и стимулирования персонала.

Основной проблемой, которая препятствует реализации качественного текущего планирования движения поездов, является разработка коррективов графика с учетом реально складывающейся поездной и инфраструктурной ситуации. Решения по перепланированию должны обеспечивать улучшение пунктуальности движения, степени использования пропускной способности и экономической эффективности. Поэтому в настоящем исследовании ставится задача: оценить

возможность построения компьютерной модели и поиска совокупности оптимальных регулировок движения поездов на участке железной дороги за приемлемое время. При решении этой задачи необходимо провести анализ методик построения детерминированных и стохастических моделей процесса, а также вопросов поиска оптимальных решений по его корректировке.

В процессе анализа также определено, что существующие критерии оптимизации в недостаточной степени отражают специфику смешанного грузо-пассажирского движения. Поэтому задача определения новых критериев (экономического, энергетического), которые учитывают указанную специфику и ориентированы на гибкое управление, подлежит исследованию и разрешению.

В системах интеллектуальной поддержки работы диспетчерского персонала недостаточно используются методы, разработанные в рамках теории исследования операций, и когнитивные методы. В настоящей работе ставятся задачи: привлечь методы анализа иерархий, игровых моделей к определению управленческих решений в диалоге человек-машина. Кроме того, необходимо предложить новые способы стимулирования диспетчерского персонала к повышению эффективности текущего планирования и управления, а также оценки результатов его деятельности.

Выводы по разделу 1

1. Процесс текущего управления движением поездов должен строиться на принципах адаптивности, предполагающих обучаемость СППР, вариативность модели движения, максимально эффективное использование текущей информации, гибкость и своевременность мер по корректировке графика.

2. Анализ предметной области подтверждает обоснованность позиции: принятие окончательного решения по выполнению регулировки остается прерогативой человека-диспетчера, который использует объективные данные, неформализованную информацию, а также свои опыт и интуицию при выборе эффективного варианта.

3. Предложенная обобщенная модель процесса диспетчерского руководства служит основой для разработки, оценки методов и алгоритмов поиска решений по корректировке движения поездов в условиях потока возмущений.

4. Новый подход к управлению движением поездов обосновывает легитимность целенаправленного изменения операционных норм работы звеньев процесса в условиях ликвидации отклонений от графика движения или предотвращения возможных нарушений.

5. Предложено использовать групповой способ коррекции движения поездов в пакете при ликвидации отклонений от графика и предупреждении их возникновения, ориентированный на профилактику множественных конфликтов.

6. Оптимальный сценарий функционирования участка дороги предполагает сочетание периодов с различными режимами следования грузовых поездов – интенсивным и экономичным.

7. Детерминированное моделирование движения поездов эффективно при поиске решений в локальных зонах, стохастическое - при широком горизонте планирования. Новая меза-модель движения – дерево взаимовлияний – позволяет достичь компромисса между этими методами.

2. КОРРЕКТИРОВКА ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ: ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД

2.1 Постановка задачи корректировки графика

А. Детерминированная задача корректировки графика с использованием модели движения микро-уровня и критерия пунктуальности формулируется следующим образом. Необходимо построить бесконфликтный график с допустимыми перекрытиями блокировочных интервалов при следующих условиях:

- на железнодорожной сети задано множество графиковых моментов проследования (остановки) поездов в конкретных пунктах и ограничений скорости;
- поезд моделируется в виде нерастяжимой нити, обладающей массой;
- в начальный момент известны положение и скорость каждого поезда.

Под *блокировочным интервалом* понимают интервал времени, в течение которого блок-участок занят одним поездом. При моделировании процесса может возникнуть ситуация, когда не соблюдается минимальный интервал, который необходим для обеспечения безопасности и безостановочного движения поезда. Эту ситуацию характеризуют как *виртуальное перекрытие* блокировочного интервала. Для того, чтобы устранить затруднение, нужно снизить скорость заднего поезда; при этом возникает вторичное опоздание.

Минимальный интервал понимаем как время между выходом хвостовой части поезда с блок-участка и вступлением на него поезда, идущего следом. В график вводятся резервы - *время восстановления* и *буферные интервалы*. Первая составляющая - добавка к времени хода - позволяет снизить риск опоздания. Опоздание также устраняется за счет сокращения времени плановых остановок. Буферная компонента добавляется к минимальному интервалу, предотвращает распространение задержек на другие поезда.

При оптимизации графика пассажирского движения, в основном, используют критерии пунктуальности. Лишь в некоторых работах производят выбор маршрутов при ликвидации опозданий по критерию минимума расходов [235].

Все чаще исследуют двухкритериальные задачи определения оптимальных расписаний движения. Так, в работе [173] рассматривают задачу минимизации цены топливного ресурса и времени движения пассажирских поездов по сети дорог. При поиске оптимальных решений в грузовом движении используют критерий эксплуатационных расходов [228].

Б. Оптимизированным по критерию времени считается график движения, при реализации которого обеспечивается прибытие поездов в ключевые пункты с минимально возможными опозданиями. Для определения качества принятия оперативных решений используется показатель *суммарное опоздание по группе поездов* в заданном временном интервале [192].

Задача поиска оптимального графического решения может рассматриваться в следующих трех вариантах:

1. определение расписаний движения поездов при фиксированных маршрутах и измененных временах хода по элементам пути и перегонам;
2. определение расписаний при фиксированных скоростных режимах и смещенных моментах отправления поездов со станций;
3. комбинированная задача: поиск решения путем изменения маршрутов и временных параметров движения поездов.

Последняя разновидность задач решается в два этапа. На первом этапе определяются оптимальные скоростные режимы и последовательность пропуска поездов по участку. Затем производится улучшение полученного решения путем локальной перестройки маршрутов некоторых поездов. При этом используются алгоритмы локального поиска, ориентированные на решение задачи оптимизации маршрутов [218]. В упрощенном виде задача поиска бесконфликтного графика предполагает расчет интервалов занятия блок-участков без учета фаз замедления и разгона поездов при появлении препятствий.

На момент начала корректировки грузового графика известны:

- параметры базового графика – расписание, времена хода и стоянок;
- расписание планируемого (фактического) отправления поездов;

- статистический показатель состояния станций: средний ожидаемый интервал приема поездов (возможно, с разбивкой по часам);

- показатели фактического состояния инфраструктуры.

Поездной диспетчер при принятии решений по изменению порядка следования поездов учитывает степень их приоритетности. В задачу оперативного перепланирования при этом добавляется процедура отбора поездов различных типов и первоочередного пропуска «срочных» поездов. Основные моменты, которые необходимо учитывать при решении рассматриваемой задачи, описаны в [188].

Задача по предотвращению распространения задержек поездов значительно усложняется, если участок протяженный и возникают серьезные технические неисправности (например, нарушение электроснабжения) или резкое ухудшение погодных условий. Анализ ситуации и оперативную корректировку графика при этом приходится производить в большом временном горизонте (3-4 часа) и на полигоне протяженностью до 500-700 км.

Полагают, что при определении корректирующих графиковых решений допустимое расчетное (компьютерное) время не должно превышать одной минуты. Чтобы ускорить поиск оптимального решения, используют методы декомпозиции, разбивая график на зоны по временной или пространственной координатам [189]. Решения определяют автономно по каждой из зон, затем проводят стыковку графиковых событий на границах между ними.

2.2 Общие положения моделирования движения потока поездов

А. График движения в границах диспетчерского участка подвергается корректировке, когда поступают сообщения о возникших отклонениях моментов отправления со станций, перегонных интервалов (более 3 мин.) или об изменениях условий пропуска поездов. Исходными данными для расчета служат нормативный (вариантный) график движения и информация о фактическом положении поездов. Необходимы также сведения об ограничениях скорости, заполненных станционных путях, о резервах рабочего времени поездных машинистов.

В графике, в первую очередь, корректируются траектории пассажирских, пригородных и выделенных грузовых поездов, которые следуют по твердому расписанию. Межпоездные конфликты устраняются путем подстройки скоростных траекторий, изменения порядка отправления со станций или организации обгона на промежуточных станциях. При решении оптимизационной задачи ограничениями служат величины минимального межпоездного интервала, наибольшей и наименьшей скорости. Кроме того, при поиске оптимального решения учитываются нескоростные ограничения, вытекающие из алгоритмов работы автоматики, конечных технических возможностей системы электроснабжения.

Поиск оптимального решения включает два этапа [25, 36]. На первом этапе производим обнаружение конфликтов между поездами. Конфликтные ситуации урегулируются путем смещения соответствующих слотов по оси времени без изменения порядка следования поездов или – в необходимых случаях – с изменением порядка. Во многих случаях требуется изменение размера слотов, то есть, времени следования на элементах участка, что производится на втором этапе. На каждом шаге локальной корректировки графика проверяется, как изменение режима движения данного (регулируемого) поезда отразится на других поездах. Описанный алгоритм определения и разрешения конфликтов отличается от порядка действий, обычно используемого диспетчерами при ликвидации отклонений. Пытаясь разрешить конфликт, поездной диспетчер, как правило, рассматривает двухпоездную модель, не уделяя внимания вероятному размножению задержек.

Б. В имитационной микро-модели движения по участку каждый поезд описывается пространственной, временной координатами и режимом управления (тяга, выбег, торможение) [27]. Непрерывный процесс дискретизируется, продвижение поезда сводится к событиям занятия и освобождения блок-участков. Для каждой операции следования поезда по элементу пути имеется ограниченный набор скоростных траекторий, которые предварительно получены на основе

тягового расчета. Режим работы локомотива на каждом элементе определяется, исходя из профиля пути, сигналов системы безопасности и ограничений скорости.

При расчете траектории движения поезда выполняются следующие условия:

- соблюдается заданное время хода по перегону $t_{ход}$ или момент прибытия на станцию $T_{с\text{приб}}$;

- выполняются граничные условия по тяговым, тормозным и энергетическим характеристикам локомотива;

- соблюдаются требования по скорости и ускорению, обеспечивающие условия безопасности движения поездов, а также комфорта для пассажиров.

Шкала времени в модели ведется с момента $t_0=0$; начальные моменты выполнения операций t_0, t_1, \dots , в том числе, и прибытия поездов на участок, отсчитываются от нулевой точки. При моделировании интенсивного движения на участке дороги учитывают основные положения теории блокировочных интервалов, разработанной авторами работ [255, 278]. Полагают, что графиковый межпоездной интервал τ_{zp} включает минимально допустимый (по условиям безопасности) интервал приближения $\tau_{без}$ - разницу моментов проследования поездами (их головными частями) одной точки пути - и буферную добавку $\tau_{буф}$. Текущее значение интервала зависит от уклона пути (площадка, спуск, подъем), скорости и массы заднего поезда.

Если поезда при максимально возможном сближении разделяются одним блок-участком, интервал приближения включает время хода $\tau_{зан}^A$ поезда, следующего первым, по занятому им элементу, время $\tau_{осв}^A$ ухода хвоста поезда с блок-участка и время реакции $\tau_{реак}^B$ машиниста заднего поезда на запрещающий сигнал:

$$\tau_{без}^B = \tau_{зан}^A + \tau_{осв}^A + \tau_{реак}^B = \tau_{зан}^A + a_{мин}.$$

Интервал разграничения a в случае предельно плотного движения совпадает с величиной $a_{мин}$, в реальном же графике дополняется буферной добавкой. При трехзначной системе интервал приближения включает, кроме указанных соста-

вляющих, еще и время $\tau_{зан}^B$ хода поезда, следующего вторым, по блок-участку, предшествующему участку следования ведущего поезда.

2.3 Поиск корректирующего решения как задача теории расписаний

А. Задача обнаружения и разрешения конфликтов в движении поездов может трактоваться как планирование работ производственного цикла, особенностями которого являются отсутствие пооперационных запасов и невозможность замены оборудования на каждой операции. Решение подобных задач рассматривает специальный раздел дискретной математики, который является частью теории расписаний [13, 160, 163]. В задачах производится поиск рационального процесса обслуживания конечного множества требований в системе, содержащей ограниченные ресурсы [90, 91]. Этим модели теории расписаний отличаются от сходных с ними моделей теории массового обслуживания, где, в основном, рассматриваются бесконечные потоки заявок.

Задачи определения очередности пропуска и режима следования поездов принадлежат к одному из классов задач теории расписаний – упорядочения или согласования [68, 136]. Эти задачи рассматривают процесс движения как последовательность операций, выполняемых в условиях ограниченных возможностей инфраструктуры. В качестве приборов в задаче построения графика используются блок-участки, в качестве требований (заявок) – поезда.

Модели с фиксированной скоростью и локальными маршрутами следования пассажирских поездов в загруженных зонах используются в работах [185, 236]. Поиск оптимальных решений по исключению конфликтов рассматривается в этих работах как задача целочисленного или частично-целочисленного программирования. Дальнейшим развитием является работа [272], в которой учитываются ограничения, налагаемые системами сигнализации и безопасности. Дополнительными ограничениями служат интервалы времени, необходимые для удовлетворения запросов пассажиров и (или) выполнения работ по обслуживанию поездов. Например, на станциях массовой пересадки пассажиров предусматривается мини-

мальное время для бесконфликтной реализации этого сервиса. На электрифицированных участках дороги присутствует особый вид ограничений, связанных с конечной нагрузочной способностью системы тягового электроснабжения.

При поиске оптимального корректирующего решения предлагается использовать двухуровневую математическую модель [201]. На верхнем уровне решается задача определения порядка и траекторий движения поездов, минимизирующих конфликты. При этом определяется совокупность регулировочных мер, которые наилучшим образом обеспечивают пропуск графиковых поездов. На нижнем уровне производится оценка эффективности вариантов урегулирования ситуации по критерию эксплуатационных затрат, выбор наилучшего из них. В результате порядок следования графиковых поездов может несколько измениться, что требует дополнительной проверки на верхнем уровне. Таким образом, при поиске квазиоптимального решения реализуется итеративная процедура расчетов.

Б. При создании обобщенной модели под локальным расписанием понимаем однозначно организованную совокупность данных, ставящую в соответствие каждому требованию (поезду) в каждый момент времени определенный набор ресурсов (элементов инфраструктуры). Задача составления расписания в терминах ЦЛП формулируется следующим образом. Пусть имеется система из n работ и m машин. В качестве работы рассматриваем движение поезда по маршруту, под машиной понимаем блок-участок. Работа состоит из g_i операций, каждой из которых приписано три индекса: i - номер работы, содержащей эту операцию; j - номер операции внутри работы, $j=1, \dots, g_i$; k - номер машины, на которой операция должна выполняться.

Вводим ограничения на время и порядок выполнения операций:

- каждая машина выполняет одновременно не более одной операции;
- операции выполняются в точно фиксированной последовательности;
- никакие две операции одной работы не выполняются одновременно.

Положим t_{ik} - длительность выполнения i -й работы машиной k ; t_{ik} - момент начала выполнения работы i . Из того, что каждая машина в один момент времени

может выполнять не более одной работы, следует, что для каждой пары работ I и J выполняется лишь одно из неравенств:

$$t_{Ik} - t_{Jk} \geq t_{Jk} \quad - \text{выполнению работы } I \text{ предшествует выполнение работы } J$$

$$\text{или } t_{Jk} - t_{Ik} \geq t_{Ik} \quad - \text{выполнению работы } J \text{ предшествует выполнение } I.$$

Такое ограничение типа «или-или» нельзя описать в рамках обычного ЛП, требуется введение целочисленных переменных. Полагаем, что:

$$Y_{Ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если работа } I \text{ предшествует работе } J \text{ на машине } k, \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Теперь сформулированные выше ограничения типа «или-или» можно записать в виде двух условий, каждое из которых должно быть выполнено:

$$\begin{aligned} (M + t_{Jk})Y_{Ijk} + (t_{Ik} - t_{Jk}) &\geq t_{Jk}; \\ (M + t_{Ik})(1 - Y_{Ijk}) + (t_{Jk} - t_{Ik}) &\geq t_{Ik}, \end{aligned}$$

где $M = \sum_i \sum_k t_{ik}$ - достаточно большая константа, выбранная так, чтобы выполнялось только одно из двух условий: $Y_{Ijk} = 0$ или $Y_{Ijk} = 1$.

В качестве целевой функции при поиске оптимального расписания графических поездов принимаем минимальное время завершения всех плановых заданий (маршрутов), что равносильно минимизации суммы начальных моментов выполнения их последних операций:

$$F(m) = \min \sum_i \sum_k r_{ikm} t_{ik}.$$

Задача обеспечения пунктуальности разделяется на две подзадачи. Первая заключается в определении расписания выполнения операций по пропуску поездов по элементам пути (блок-участкам) при исходно заданных маршрутах. Подзадача включает два раздела: определение порядка прохождения поездами конфликтных элементов и корректировку скоростных характеристик поездов.

Некоторые критические отказы могут потребовать мер по локальному изменению маршрутов поездов или частичной их отмены, что производится в рамках решения второй подзадачи. Оптимальное решение определяется путем выбора

одного из маршрутов, набор которых задан заранее. Решение приближается к глобальному оптимуму путем использования итеративного метода, то есть, поочередного обращения к указанным подзадачам.

Объединение обеих технологий в одну модель при работе на большой сети дорог приводит к значительным вычислительным трудностям. Время расчетов растет нелинейно (ускоренно) при увеличении длины участка, числа поездов и станций. Существенное упрощение дает последовательное (каскадное) использование моделей с фиксированной и переменной скоростью.

Число переменных и ограничений в реальных задачах весьма велико. Для задачи с m машинами и n работами для переменных $t_{ik} \geq 0$ это число равно $m \cdot n$. При введении ограничения на порядок выполнения операций число переменных возрастает до значения $m \cdot n \cdot (n-1)/2$. Например, в задаче с 5 машинами и 10 работами число переменных равно 220, ограничений - 290. Для сокращения расчетного времени используют эффективные алгоритмы, в частности, эвристики.

2.4 Обобщенная модель движения поездов

Описанная микро-модель движения поездов используется как инструмент обеспечения низкого уровня опозданий. При решении задачи корректирования движения смешанного потока необходима новая модель, ориентированная на экономически эффективное использование ресурсов. Формализованное описание процесса с учетом показателей пунктуальности и затрат рассматриваем как *обобщенную модель движения поездов по участку* [201].

Сформулируем задачу поиска оптимального графического решения как динамическую задачу размещения ресурсов, в которой присутствуют ограничения по мощности. Предположим, необходимо выполнить заданное число работ - пропустить n поездов – в течение определенного планового периода. Период протяженностью L (диспетчерская смена) разделен на интервалы равной длины (например, часовые), составляющие счетное множество $T = \{1, \dots, l\}$. Множество

технических средств обозначим через $I = \{1, \dots, m\}$, множество работ (поездов), подлежащих выполнению, - через $J = \{1, \dots, n\}$. Допустим, множество I разбито на непересекающиеся подмножества I_t , $t \in T$. Каждый j -й поезд обрабатывается на последовательности элементов i_1, \dots, i_k . Работа поезда, входящая в состав множества $J = \{1, \dots, n\}$, выполняется в процессе движения по блок-участкам. Объем выполненной работы определяется протяженностью пройденного пути; долю работы j , приходящуюся на i -й элемент, обозначаем как x_{ij} . Удельный расход ресурса (энергетического или денежного) при следовании поезда по данному элементу пути в расчете на 1 км. составляет c_{ij} . Величина расхода не постоянна, зависит от режима ведения поезда. Для каждого блок-участка зависимость $c_i(\tau_i)$ считается известной. Расход ресурса C_{ij}^{ocm} на тех элементах пути, где реализуется остановка, принимается для каждого из типов поездов постоянным. Переменная x_{pi} принимает значение 1, если поезд j проходит по определенному элементу p .

Каждой паре $p \in P$, $j \in J$, характеризующей конкретный элемент, сопоставляется величина расходов $C_{pi} = c_{pi} x_{pi}$. Эта величина отражает потребление энергии или расход денежных средств при пропуске поезда по элементу пути. Это приводит к тому, что задача превращается в частично-целочисленную. Например, расходы на дополнительную оплату труда локомотивной бригады, вызванные увеличением времени на Δt , составляют:

$$\Delta c_{pi}^{\delta p} = C^{\delta p} \Delta t,$$

где $C^{\delta p}$ - часовая ставка оплаты труда.

Сверхнормативные затраты на оплату электроэнергии также нецелочисленны; их размер определяется по следующей формуле:

$$\Delta c_{pi}^{\delta \delta} = C^{\delta \delta} \Delta E,$$

где $C^{\delta \delta}$ - тариф на оплату электроэнергии;

ΔE - приращение расхода электроэнергии при увеличении скорости.

Также полагаем, что каждый поезд к моменту отправления с исходной станции данного участка характеризуется накопленным объемом эксплуатационных затрат C_j^0 . Полные расходы C_j по пропуску поезда включают эту величину и затраты $C_j^{уч}$, произведенные на рассматриваемом участке.

По времени процесс обслуживания - пропуска потока по участку – разбит на этапы (временные интервалы). На первом этапе обслуживаются поезда из множества $J_1 \in J$, на втором – из $J_2 \in J$ и т. д., при этом:

$$J = \bigcup_{l=1}^L J_l, \quad J_l \cap J_k \neq \emptyset, \quad k \neq l, \quad |J_l| = n_l$$

Маршрут поезда может включать как предписанные пути следования по станциям и перегонам, так и нестандартные пути – из-за отказов. Совокупность элементов инфраструктуры, которые реально функционируют в планируемый период, задается бинарной матрицей $\|Z_{ij}^t\|$, показывающей включение каждого i -го элемента в маршруты следования поездов заданных типов.

Комбинаторная структура задачи планирования движения по участку подобна задаче расчета графика производства с ограничением в виде запрета на накопление обрабатываемых компонентов в ожидании операции. Это означает, что поезд не должен вступить на последующий блок-участок раньше, чем его покинет передний поезд и истечет защитное время. Поиск наилучшего варианта пропуска поезда по цепи элементов (по маршруту P) осуществляется в соответствии с целевой функцией, которая объединяет затраты при выполнении всех операций:

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} C_{pj} X_{pj}$$

Формализуя задачу, полагаем, что заданы следующие величины:

C_{jt}^0 - накопленный начальный объем эксплуатационных затрат по j -му поезду, который отправляется на участок в интервале t ;

C_{ij} - удельный объем расхода ресурса (энергетического или денежного) на единицу работы при следовании j -го поезда по i -му блок-участку;

C_{ij}^{ocm} - затраты на выполненную остановку j -го поезда при нахождении на i -м блок-участке;

v_{it}^0 - число технических средств (участков) i -го типа на начальный момент t -го часового интервала времени.

Переменные задачи имеют следующий смысл:

$$z_{jt} = \begin{cases} 1, & \text{если в } t\text{-м интервале на участок вступает } j\text{-й поезд,} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$x'_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если имеется остановка } j\text{-го поезда на } i\text{-м участке,} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$x_{ij} \geq 0$ - доля работы поезда j , приходящаяся на i -й блок-участок.

Динамическую задачу определения наилучшего сценария пропуска потока поездов сформулируем следующим образом:

$$\text{найти} \quad \min \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \left(C_{jt}^0 z_{jt} + \sum_{i \in I_t} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I_t} C_{ij}^{ocm} x'_{ij} \right) \quad (2.1)$$

$$\text{при условиях:} \quad \sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad j \in J, \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J_t} p_{ij} x_{ij} \leq v_{it}^0, \quad i \in I, \quad t \in T, \quad (2.3)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\}, \quad j \in J, \quad t \in T. \quad (2.4)$$

Целевая функция (2.1) отражает затраты на пропуск всех поездов. Условие (2.2) гарантирует полную реализацию всех работ, условие (2.3) ограничивает возможности выполнения работ имеющимися в наличии техническими средствами. Если в t -м интервале времени выходит из строя определенная доля s_{it} участков i -го типа, второе ограничение приобретает вид:

$$\sum_{j \in J_t} p_{ij} x_{ij} \leq v_{it}^0 - \sum_{\tau=1}^{t-1} s_{i\tau} \sum_{j \in J_t} p_{ij} x_{ij}, \quad i \in I, \quad t \in T$$

Экономический критерий (2.1) дополняется величиной суммарного штрафа за задержку в окончании работ (за опоздание поездов):

$$F(s) = \sum_{a \in N} \varphi_a(t_a(s)),$$

где $t_a(s)$ - момент завершения обслуживания требования a в расписании s , N - множество требований, $\varphi_a(\cdot)$ - неубывающие функции, именуемые функциями штрафа. В практических постановках функции штрафа имеют конкретный экономический смысл, например, ущерб от потери части потребителей транспортной услуги или объема перевезенного груза.

Б. Оценим величину компьютерного времени, когда решение оптимизационной задачи поиска корректировок графика по критерию суммарных затрат производится с использованием методики Лагранжевых релаксаций [10]. Считаем, что известен удельный объем затрат C_{ij} при следовании j -го поезда по i -му элементу пути. Расход энергии зависит от режима движения; в расчете используются фиксированные значения расхода – в соответствии с типовыми режимами тяги.

При поиске оптимального решения рассматривается следующая задача релаксаций $R(\varphi)$, эквивалентная исходной (2.1):

найти

$$\min \sum_{j \in J} \left(\left(C_j^0 - \sum_{l=1}^L v_j^0 \varphi_{jl} \right) x_j + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in I} \left(C_{ij} + p_{ij} \left(\varphi_{jl} + \sum_{t=l+1}^L s_{jt} \varphi_{jt} \right) \right) x_{jt} + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in I} \left(C_{ij}^{ocm} + p_{ij} \left(\varphi'_{jl} + \sum_{t=l+1}^L s_{jt} \varphi'_{jt} \right) \right) x'_{jt} \right)$$

при условиях: $\sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad j \in J, \quad 0 \leq x_{ij} \leq x_j, \quad x_j \in \{0,1\}$.

Отличие рассматриваемой задачи от исследованной ранее [10] заключается в учете экономических индикаторов – штрафов за опоздания поездов и сверхнормативных затрат. Особо отметим, что в целевую функцию вводятся компоненты, которые отражают предшествующие расходы C_{jt}^0 , - расходы по пропуску, накопленные к моменту перепланирования.

При любом выборе множителей Лагранжа величина $v(\bar{P}(\varphi_j))$ является нижней оценкой целевой функции. Для получения такой оценки в задачах частично-целочисленного ЛП используется линейная релаксация, при которой условие булевости переменных заменяется требованием их принадлежности единичному отрезку: $0 \leq x_i \leq 1, \quad i \in I$. Сформулированная таким образом задача представляет собой одну из задач размещения и, как следствие, является NP -трудной. Время,

затрачиваемое на поиск наилучшей совокупности операций по пропуску поездов, изменяется полиномиально при увеличении размерности задачи.

Чтобы оценить реальность использования рассматриваемой методики в оперативной работе, рассмотрим результаты экспериментов по решению динамической задачи размещения технических средств, полученные с использованием Лагранжевых релаксаций. Решалась задача средней размерности, которая определялась числом технических средств (элементов) $m=50$ и работ $n=50$, а также числом периодов последовательного обслуживания групп работ $l=10$. В результате проведения экспериментов определено, что время решения задачи в среднем составляет 2-3 мин., в отдельных случаях превышает 10 мин. Микро-модель участка диспетчерского управления на РЖД содержит существенно большее число элементов m – до 400-500 единиц. Время расчета оптимального графического решения по рассматриваемой методике превышает десять минут, что является недопустимым при поддержке работы диспетчера. Более подходящим решением является применение эффективных эвристик.

2.5 Вариантный граф и его использование при поиске оптимальных решений

2.5.1. Графовая модель движения потока поездов

Микро-моделью движения по участку, которая используется в детерминированной графической задаче, является вариантный граф [189]. Траектория поезда отображается в графе совокупностью дуг, вес каждой из которых соответствует продолжительности операции движения или остановки поезда. Операциям соответствуют узлы графа. Если поезд k следует по элементу L , то эту операцию будем обозначать через (k, L) , а длительность ее выполнения через $t(k, L)$. Каждые две операции (k_1, L_1) и (k_2, L_2) могут быть зависимы или независимы в том смысле, что календарное время выполнения одной из них оказывает (или не оказывает) влияние на время выполнения другой.

В задачах движения транспортных средств по направляющей системе используется специфическое построение – направленный путь: подграф G , определенный как фиксированная последовательность вершин и дуг $v_{i_1}(i_1, i_2)$, $v_{i_2}(i_2, i_3), \dots, v_{i_{k-1}}(i_{k-1}, i_k)$, v_{i_k} с соблюдением требования предшествования между соседними операциями. Это требование выполняется тогда, когда момент $t_{\mu(i)}$ начала последующей операции O_i наступает после момента окончания предыдущей O_{μ} продолжительностью $\tau_{\mu(i)}$: $t_i \geq t_{\mu(i)} + \tau_{\mu(i)}$. Графической интерпретацией упорядоченного множества является ориентированный граф (N, \vec{U}) – граф отношения строгого порядка. Граф не содержит петель и контуров, является транзитивно замкнутым.

В вариантном графе пара узлов, характеризующих движение соседних поездов, соединена встречными (альтернативными) дугами $((k, j), (h, i))$ (рисунок 2.1). В процессе поиска кратчайшего пути производится выбор одной из дуг: $(k, j) \vee (h, i)$. В качестве решения графа S рассматривают совокупность альтернативных дуг, полученных путем извлечения одного из элементов каждой пары.

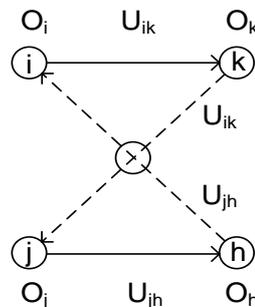


Рисунок 2.1 - Фрагмент графа, отражающий выбор варианта пропуска поездов

Вариантный граф гибко представляет динамику процессов на участке с учетом существующих алгоритмов функционирования систем железнодорожной автоматики, сигнализации, а также правил выполнения диспетчерских регулировок. Если работает система автоматики с фиксированными блок-участками, в графе каждый узел соответствует сигналу, а дуга представляет собой интервал блокировки соответствующего элемента пути. При компьютерном моделировании

отношения между узлами графа отражаются с помощью матрицы инциденций, матрицы циклов и матрицы сечений [85].

В основу работы интеллектуальной диспетчерской СППР кладется модель, представляющая собой совокупность вариантных графов. Каждый из первичных графов служит для решения локальной оптимизационной задачи в границах круга диспетчерского управления. Граф сетевого уровня обеспечивает координацию решений, выработанных локальными планировщиками, для получения наилучшего результата в масштабе железнодорожного направления. Узлы этого графа соответствуют операциям проследования поездами границы между кругами, дуги – интервалам времени следования по участкам.

2.5.2. Обнаружение конфликта и изменение порядка движения

А. Полагаем, что задан фиксированный маршрут поезда L_m на участке дороги. В граф включаются два узла O_0 и O_n , соответствующие моментам вступления поезда на рассматриваемый элементарный участок дороги и выхода с этого участка. Операция O_i начинается в момент t_i , отсчитываемый от начального момента t_0 , и имеет протяженность, равную b_{ik} . Часть дуг графа задана фиксировано, другие являются переменными (альтернативными). Фиксированная направленная дуга u_{ik} отражает отношение предшествования операций O_i и O_k . Если операция O_k выполняется по завершении O_i , для ее начального времени t_k должно соблюдаться условие: $t_k \geq t_i + b_{ik}$.

В графе выделяется множество путей F , которое включает дуги, исходящие из начального узла 0 и входящие в конечный узел n . Наиболее длинный путь в графе $G(S)$ от узла i до узла j обозначим $l^S(i, j)$. Самому протяженному маршруту от начального узла 0 до конечного узла n – критический путь - соответствует множество $C(S)$. Задача оптимизации есть поиск такого момента t_n выполнения

конечной операции O_n , который соответствует кратчайшему маршруту из всех реализуемых путей $l^s(0, n)$. Формально задача по поиску наилучшего варианта продвижения поезда записывается следующим образом:

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

В процессе оптимизации определяется такая очередность прохождения всех элементов пути, при которой минимизируются опоздания.

Каждой операции O_i соответствует фиксированная дуга $u_i \in F$ длиной $b_i^{\bar{a}}$ (блокировочный интервал) - время ожидания момента t_i , когда можно начинать эту операцию после завершения предыдущей (в момент t_i^{np}). Это ограничение записывается в виде:

$$t_i \geq t_i^{np} + b_i^{\bar{a}},$$

При разрешении конфликта рассматривают пару альтернативных дуг $(u_{hi}, u_{kj}) \in L$, где множество L представляет собой часть маршрута в графе. Веса дуг определяются защитными интервалами времени, которые гарантируют соблюдение минимального безопасного расстояния. Выбор подходящей дуги: $u_{hi} \vee u_{kj}$ - является основной процедурой при поиске решения. В результате отбора дуг из множества L образуется подграф $C(S)$. Совокупность S называют согласованной, если в графе $C(S)$ отсутствуют циклы положительной протяженности.

Б. Типичной ситуацией, возникающей на границе «станция-перегон», является конфликт между отправляющимися (проходящими) поездами при отклонениях от графика. Разрешение конфликта предполагает выбор оптимального порядка следования поездов по скрещению пути (рисунок 2.2а). Граф, моделирующий указанную ситуацию, приведен на рисунке 2.2б. Фиксированные дуги отражают движение поездов A и B по блок-участку, содержащему скрещению. Их веса соответствуют ходовым временам b_{ik} и b_{jh} . Конфликтная ситуация фиксиру-

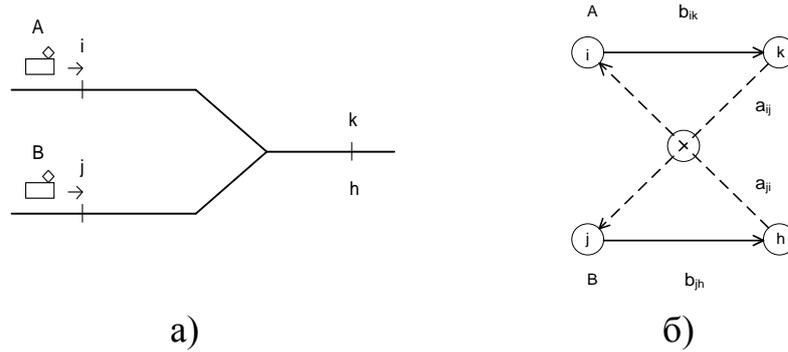


Рисунок 2.2 - Схема движения поездов по участку со скрещением (а) и соответствующий фрагмент вариантного графа (б)

ется тогда, когда $t_i < t_j < t_k + a_{ij}$, где a_{ij} - вес дуги u_{ij} . Порядок следования поездов по блок-участку со скрещением определяется путем назначения одной из дуг $(u_{jk}, u_{ih}) \in L$. Если планируется первым пропустить поезд A , выбирается дуга u_{jk} . При этом выполняется ограничение по интервалу: $t_j \geq t_k + a_{ij}$. Если же первым пропускается поезд B , выполняется ограничение: $t_i \geq t_h + a_{ji}$. Если при разрешении конфликта пропускается первым поезд A , нужно так отрегулировать скорость, чтобы поезд B прибыл в точку входа на участок с некоторой задержкой. При этом исключается его остановка с целью соблюдения защитного интервала.

Конфликтная ситуация возникает также между поездами, которые имеют различную скорость и сдвиг траекторий относительно графика. Механизм возникновения конфликта на скрещении в этом случае иллюстрируется рисунком 2.3а.

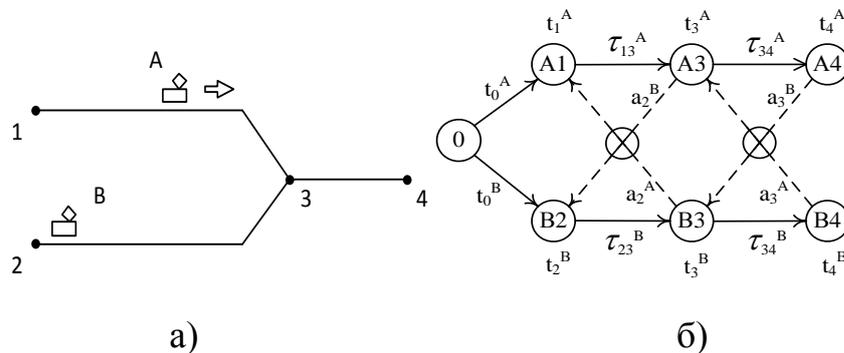


Рисунок 2.3 - Схема (а) и фрагмент графа (б) движения поездов по скрещению

Поезд B в начальный момент вступает на участок, следует с высокой скоростью. Поезд A - менее скоростной – в этот момент уже движется по элементу 13, подходит к скрещению одновременно с поездом B . Модель, отражающая ситу-

ацию, приведена на рисунке 2.3б. Моменты вступления поездов на участок отражаются начальными дугами длиной, соответственно, t_0^A и t_0^B . Интервалам следования до точки скрещения 3 соответствуют дуги длиной τ_{13}^A и τ_{23}^B . Конфликт присутствует, если межпоездной интервал в момент проследования скрещения поездом (первым подошедшим) удовлетворяет условию:

$$|t_3^A - t_3^B| \leq \tau_{\text{без}},$$

Разрешение конфликта производится путем изменения момента входа одного из поездов на участок (входной задержки) или изменения времени хода по элементу пути. Очевидный вариант разрешения конфликта диктуется правилом «первым пришел – первым обслужен» (FCFS). Например, выбор дуги $A3B2$ свидетельствует о первоочередном пропуске поезда A по скрещению.

Движение по участку дороги считается реализуемым, если ни в одной из ситуаций интервал разграничения не становится меньшим, чем минимальное безопасное время $\tau_{\text{без } j}^i$ («виртуальное перекрытие»). Проверка осуществляется путем определения разности моментов $(t_j^{i+1} - t_j^i)$ подхода поездов к заданной точке и сравнения этой величины с безопасным интервалом.

В. Моделирование операции обгона одного поезда другим производится следующим образом. По участку следуют два поезда (рисунок 2.4а); вступив на станционный путь, первый поезд A останавливается, пропуская поезд B (рисунок 2.4б). Очевидно, протяженность интервала τ_{23}^A должна быть достаточной для безопасного следования поездов по элементу 34: $\tau_{23}^A \geq \tau_{\text{без}12} + \tau_{23}^B + \tau_{\text{без}34}$, где $\tau_{\text{без}12}$, $\tau_{\text{без}34}$ - минимально допускаемые интервалы на элементах 12, 34 соответственно. Моделирующий граф содержит две диагональных дуги a_1^B и a_3^A , показывающих смену очередности следования поездов (рисунок 2.4в).

Остановка поезда на станции описывается следующим образом. Полагаем, операция O_i соответствует вступлению поезда на станционный путь, операция O_h - стоянке, операция O_k - вступлению поезда на следующий блок-участок (пере-

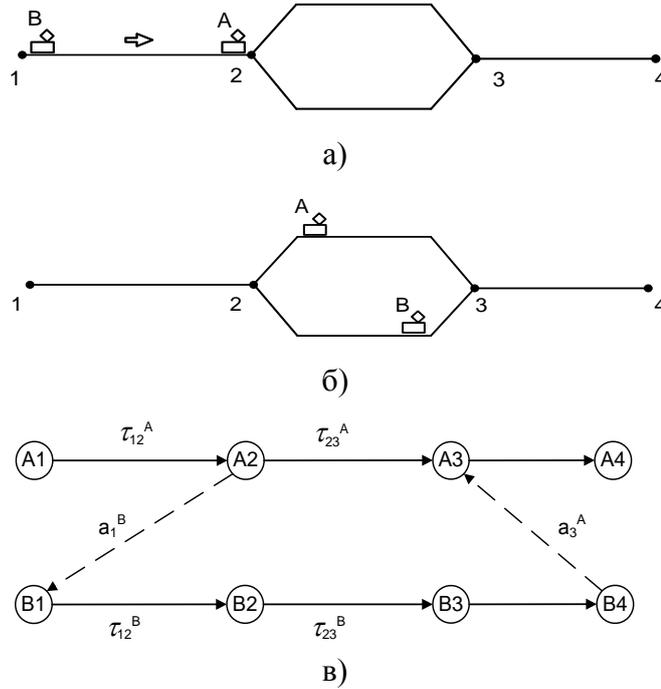


Рисунок 2.4 - Схема движения поездов на участке с разъездом (а, б) и элемент графа, соответствующий операции обгона (в)

гон). Величина $\tau_A^{npуб}$ есть время прибытия поезда A на станцию, величина τ_A^{omnp} - время отправления (освобождения блок-участка). Интервал торможения до полной остановки поезда A равен $u_A^{морм}$, графиковый стояночный интервал - u_{Ah} . Ограничение, налагаемое расписанием на время отправления ($t_k \geq \tau_A^{omnp}$), отражается путем добавления фиксированного ребра $(0, k)$ длиной $(\tau_A^{omnp} - \delta_A)$ (рисунок 2.5). Компонента δ_A указывает на возможность отправления поезда несколько раньше планового времени. Досрочное отправление является одним из инструментов гибкого графика; его использование может разрядить ситуацию.

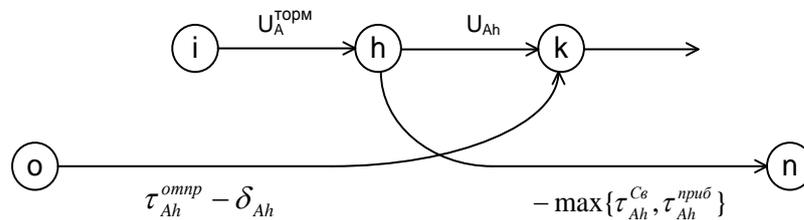


Рисунок 2.5 - Фрагмент графа, соответствующий остановке поезда

Фрагмент графа дополняется фиксированным ребром из узла h к узлу n , имеющим длину $-\max\{\tau_A^{св}, \tau_A^{npуб}\}$. Это означает, что путь в графе от узла 0 до узла n через (h, n) равен задержке поезда на станции. Если фактическая задержка превы-

шает графиковый интервал, это добавочное время понимается как вклад данной операции в целевую функцию.

Г. В качестве примера покажем вариантный граф для фрагмента сети, который содержит, помимо входного скрещения 4, путевое развитие (элементы 6, 7, рисунок 2.6). В момент t_0 на сеть входят два поезда. Медленный поезд A следует с графиковой остановкой на платформе (на элементе 7). У скорого поезда B остановка на станции не предусматривается.

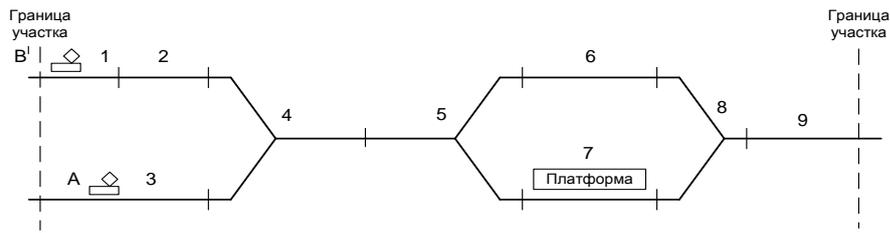


Рисунок 2.6 - Ситуация на фрагменте сети в начальный момент

Узлы вариантного графа (рисунок 2.7) определяются парами: (поезд, элемент), (поезд, остановка) или (поезд, граница участка). Проблема первоочередно-

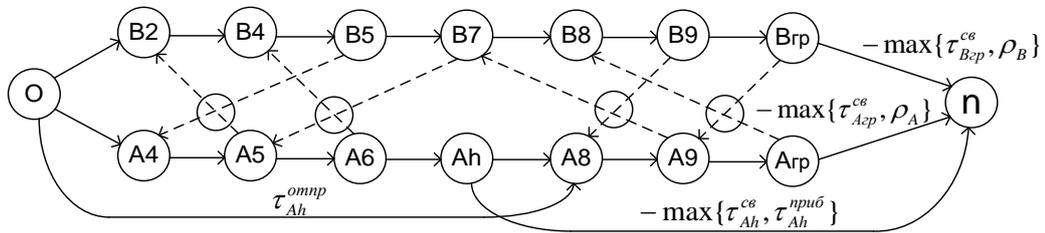


Рисунок 2.7 - Вариантный граф для рассматриваемой поездной ситуации

го предоставления элемента для следования одного из поездов возникает на участках 4, 5, 8, 9, поэтому в графе присутствуют четыре пары альтернативных дуг.

Моменты $(\pi_A + e_A)$ и $(\pi_B + e_B)$ вступления поездов на участок включают графиковые точки π_A, π_B и опоздания e_A, e_B . Длины фиксированных дуг соответствуют ходовому времени по элементам пути, за исключением дуги $(Ah, A8)$, отражающей графиковый остановочный интервал. Остановка поезда A определяется наличием двух дуг: $(0, A8)$ протяженностью u_{Ah} и (Ah, n) . Длина последней $-\max\{\tau_A^{ce}, \tau_A^{omnp}\}$, как указывалось выше, соответствует заново установленному

моменту отправления поезда. Измененные – с учетом противоконфликтных регулировок – моменты проследования выходной границы сети отражаются наличием дуг длиной $-\max\{\tau_{A_{ep}}^{ce}, \rho_A\}$, $-\max\{\tau_{B_{ep}}^{ce}, \rho_B\}$. Протяженность этих дуг определяется с учетом графического времени выхода поездов с участка - соответственно ρ_A, ρ_B .

Оптимальной последовательностью поездов (по критерию минимальных задержек) является совокупность моментов t_i начала каждой из операций. Если удовлетворены все условия предшествования, т. е. выбрано по одной дуге из каждой пары, граф не содержит циклов положительной протяженности. Это свидетельствует об отсутствии тупиковых ситуаций - инцидентов, когда два поезда оказываются на элементе, выход с которого (хотя бы, одного из них) весьма затруднен.

Опишем процесс минимизации накопленного опоздания поездов. Эта величина определяется для выходной границы диспетчерского круга - контрольного пункта. Пусть τ_A^{ce} есть наименьшее время следования поезда A от момента входа на участок до момента прибытия в контрольный пункт. Это время соответствует движению поезда по стандартному маршруту с максимально допустимой скоростью. Величина τ_A^{ce} есть нижняя граница реализуемого времени следования по участку. Обозначим время следования в условиях, когда присутствуют возмущения процесса движения, величиной τ_A^{goz} . В случае, если $\tau_A^{ce} > \tau_A^{goz}$, величина $(\tau_A^{ce} - \tau_A^{goz})$ является неизбежной задержкой, которую нельзя исправить путем коррекции пропуска поездов по участку. Длина пути в графе для поезда A есть величина, обратная ожидаемому времени его следования до контрольного пункта: $-\max\{\tau_A^{ce}, \tau_A^{goz}\}$. Полагаем величину $\max\{0, (\tau_A^{ce} - \tau_A^{goz})\}$ первичным опозданием поезда A по прибытию в контрольный пункт; величина $\max\{0, t_i - \max(\tau_A^{ce}, \tau_A^{goz})\}$ есть вторичная задержка, которая дает дополнительное опоздание. Это опоздание возникает как следствие размножения задержек по потоку и регулировок, направленных на разрешение конфликтов между поездом A и другими поездами.

Величиной, которая играет роль целевой функции при решении оптимизационной задачи, служит максимальное накопленное опоздание $l_N^S(0, n)$ по всем поездам. Эта величина включает совокупность задержек, зафиксированных во всех контрольных пунктах.

2.5.3 Подстройка скоростных характеристик поездов

Корректировка траектории движения поезда реализуется путем изменения времен хода по элементам пути. В процессе моделирования меняются длины дуг вариантного графа, построенного на первом этапе оптимизационного процесса. Полученное решение анализируется на предмет соблюдения требования безопасности - минимального межпоездного интервала.

Базовая модель интервального регулирования рассматривает динамику движения поездов №1 и №2 по трем последовательным элементам, отражает функционирование сигнальной системы с разделением поездов двумя блок-участками. Операции движения представляются узлами $\mu(\cdot), i, \sigma(\cdot)$ (рисунок 2.8). Моменты вступления переднего поезда №1 на соответствующие блок-участки обозначаются

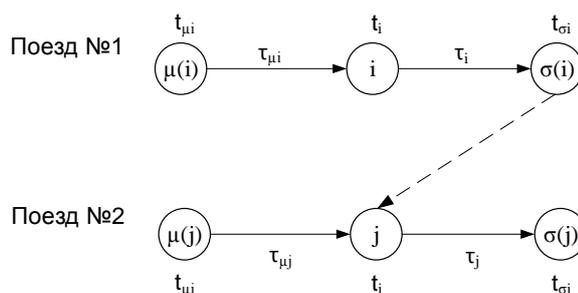


Рисунок 2.8 - Граф процесса движения пары поездов по блок-участкам

как $t_{\mu i}, t_i, t_{\sigma i}$, время хода этого поезда по элементу i – как τ_i ; время приближения заднего поезда к элементу i равно $\tau_{\mu j}$.

Оценка степени безопасности при сближении поездов основывается на анализе буферного времени, значение которого определяется по формуле:

$$\tau_{\beta} = (t_j - t_i) - \tau_{\mu j} - \tau_i - \tau_{ij},$$

Разделительный интервал τ_{ij} включает время, которое требуется для ухода поезда №1 со второго блок-участка на третий, время срабатывания сигнализации, а также время, необходимое для обнаружения сигнала светофора и выработки реакции на него – если поезд управляется машинистом.

Для того, чтобы задний поезд следовал на протяжении всего участка по зеленым сигналам, необходимо соблюдение условия: $\tau_\beta \geq 0$. Если поезд, следующий впереди, реализует остановку продолжительностью τ_{si} , буферное время рассчитывается по формуле:

$$t_\beta = (t_j - t_i) - \tau_{\mu j} - \tau_i - \tau_{ij} - \tau_{si}$$

При этом время хода по блок-участку (величина $\mu(i)$) удлиняется, так как поезд приближается к точке остановки с отрицательным ускорением.

Случай, когда $\tau_\beta < 0$, соответствует частичному наложению блокировочных интервалов. В этом случае поезд №2 следует под желтый сигнал с пониженной скоростью. Такая ситуация (попутный конфликт) присутствует при следующем ограничении: $\tau_\beta \geq (-\tau_{\mu j})$. Траектория движения заднего поезда в случае динамического сближения с поездом, следующим впереди, содержит три фазы (рисунок 2.9). Если обнаруживается желтый сигнал, включается режим торможения до скорости $v_{огр}$. При наличии следующего зеленого сигнала поезд ускоряется до разрешенной скорости $v_{гр}$ (кривая 1). Если сигнал красный, включается служеб-

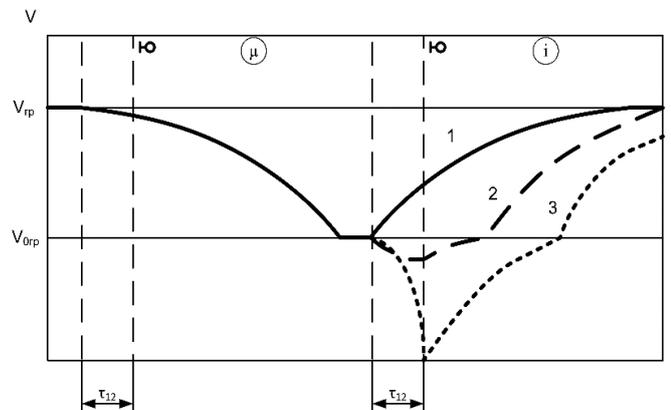


Рисунок 2.9 - Скоростные траектории при различных вариантах динамического сближения поездов

ное торможение до момента включения желтого сигнала, набора скорости или до полной остановки поезда (кривые 2, 3). Рассмотренные стандартные траектории используются при расчетах по корректировке графика движения.

Перестройка скорости при динамическом сближении поездов отражается на элементах графа изменением длины дуг. Если лидирующий поезд теряет скорость, задний вынужден реагировать и также применять торможение с последующим разгоном (рисунок 2.10а). В этом случае протяженность дуг, соответствующих следованию этого поезда по каждому из блок-участков, возрастает на соот-

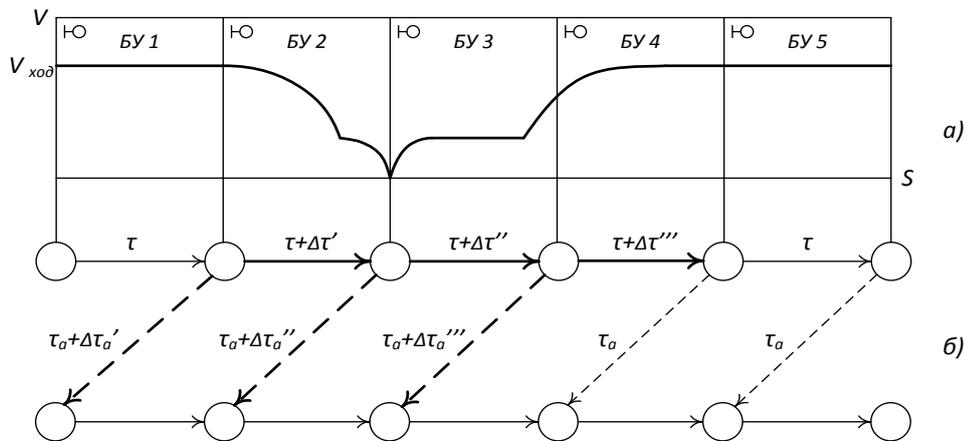


Рисунок 2.10 - Кривая скорости заднего поезда (а) и граф, отражающий динамическое сближение поездов (б)

ветствующую величину $\Delta\tau$ (на рисунке 2.10б выделены жирными линиями). По этой же причине альтернативные дуги удлиняются из-за сдвига времени освобождения передним поездом блок-участков.

2.6 Методика оперативной корректировки графика движения

Стадия текущего перепланирования начинается в момент обнаружения отклонения в движении поезда от графика или поступления данных о возникшем ограничении на инфраструктуре. Источниками актуальных данных о местоположении поездов и ситуации на станциях являются информационные системы АСОУП и АСДК, об отказах инфраструктуры - система КАСАТ.

Процесс текущего планирования включает три этапа. На первом этапе решается задача обнаружения и разрешения конфликтов при использовании фиксированных маршрутов. Текущее время $t_{тек}$ при моделировании отсчитывается от начального момента t_0 - стартовой точки прогноза. Каждый вариант пропуска поездов анализируется на предмет соблюдения ограничений. Если результат проверки отрицателен, генерируется новый вариант графика с измененной траекторией движения поезда, создающего конфликтную ситуацию. Это реализуется в рамках второго этапа - согласования скорости движения поездов. На конфликтных участках изменяется скоростная траектория, задается новое значение времени $t_{ij}^{тек}$. В вариантном графе фиксируются альтернативные пары дуг, отобранные до этого момента, и анализируются последующие пары, соответствующие новым событиям. При проведении процедуры обновления графа отбрасываются те альтернативные пары, для которых время откорректированного хода $t_{ij}^{коpp}$ превышает новое значение $t_{ij}^{тек}$. Это значит, что на каждой итерации снижается размерность решаемой задачи отбора. При этом задержки, которые остались некомпенсированными до момента $t_{ij}^{тек}$, полагаются неизбежными. 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 выполнимого графика. В последнем случае индикатором нереализуемости является наличие цикла положительной протяженности в графе.

В случае отказа от построения графика, компьютерная система предлагает диспетчеру произвести более серьезные изменения в модели - такие, как введение нестандартных маршрутов, временное оставление поездов на станциях или их отмену; при этом процесс расчета повторяется.

Таким образом, в скорректированном графике движения соблюдаются безопасные межпоездные интервалы, все ограничения скорости; суммарное время вторичных задержек поездов снижено до минимума.

Расчетные моменты подхода некоторых поездов к контрольным точкам опережают графиковые события. Появившиеся резервы времени могут быть использованы для снижения энергопотребления путем назначения увеличенных времен хода. Процедура оптимального распределения резервов времени реализуется на третьем этапе разработанного алгоритма. Эта процедура может также инициироваться диспетчером в тех обоснованных случаях, когда складывающаяся поездная ситуация позволяет целенаправленно увеличить добавки к времени хода одного или нескольких поездов (см. разд. 4).

2.7 Поиск оптимального решения графической задачи

А. При определении эффективного варианта корректировки графика решается оптимизационная задача ЛП большой размерности, что вызвано наличием масштабной совокупности элементов инфраструктуры (блок-участков) и подвижных единиц. Можно выделить подмножество сложных задач, допускающих решение в виде полиномиального алгоритма (*NP*-трудных задач), для которых существует «быстрый» алгоритм. В этом случае любая другая однотипная задача может быть решена так же быстро. Время поиска решения при этом экспоненциально зависит от числа переменных [125].

В теории расписаний распространены следующие методы решения оптимизационных задач:

- использование генераторов расписаний и решающих правил;
- схема ветвей и границ;
- метод динамического программирования.

Известны генераторы, которые за достаточно длительное время позволяют построить все допустимые расписания. Так, генератор с равновероятной выборкой извлекает любую операцию из множества l возможных на данном шаге пре-

тендентов с вероятностью $1/l$; генератор, исключаящий из рассмотрения заведомо неконкурентоспособные расписания, и др. Часто используются генераторы, которые реализуют правила *FIFO* («первый пришел - первый обслуживается»).

При поиске оптимальных расписаний широко используют методы линейного целочисленного (ЦЛП) или частично-целочисленного программирования. Эффективным способом решения задачи является схема ветвей и границ [281], которая предполагает целенаправленный перебор возможных вариантов; при этом решаемая задача последовательно ветвится, заменяясь более простыми задачами. В процессе анализа отбрасываются заведомо непригодные варианты. Методика широко используется при решении транспортных задач (см., например, [85, 121]). Предприняты попытки применения этой схемы в процессе оптимизации графика движения в режиме реального времени. Среди этих работ следует выделить основополагающие исследования [263, 275, 288].

Построение ориентированного графа и последующее вычисление временных характеристик неэффективно. *Эвристический подход*, повышая качество решения, совмещает процессы конструирования графика и расчеты соответствующих временных характеристик. Примером использования эвристической модели при корректировке графика движения в реальном времени является встраивание в задачу ЦЛП элементов Лагранжевой релаксации и субградиентной оптимизации [177]. В ряде работ используется эвристическая декомпозиция задачи. Сначала находят расписание поездов при максимально допустимой скорости на каждом перегоне. Затем проверяют совокупность ниток на наличие конфликтов. В конфликтных зонах раздвигают нитки таким образом, чтобы поезда следовали беспрепятственно [248].

Чтобы уменьшить расчетное время, исследователи тестируют различные приближенные методы комбинаторной оптимизации - *эффективные эвристики*. Распространенными являются работы, в которых задача минимизации задержек поездов решается путем использования генетического алгоритма [191, 272]. Генетический метод основан на генерировании совокупности решений («популяции»), качество которых последовательно улучшается путем использования меха-

низма эволюционирования. Каждое из решений трактуется как «поколение», характеризуемое несколькими признаками – «хромосомами». Набор хромосом в каждом поколении неизменен, меняется лишь соотношение их интенсивностей. С помощью вероятностного *оператора селекции* на каждом шаге выбираются два решения – родители s_1, s_2 . *Оператор скрещивания* по этим решениям строит новое решение s' , которое затем подвергается небольшим случайным модификациям - *мутациям*. Затем новое решение добавляется в популяцию, а решение с наименьшим значением целевой функции удаляется.

Появляются новые модели движения поездов и поиска эффективного управления, которые основываются на временных сетях Петри и иммунном оптимизационном алгоритме [225]. В ряде работ при поиске оптимального графического решения предпринимаются попытки использования мета-эвристик [223, 252]: метода имитации отжига (Simulated Annealing - SA), метода муравьиных колоний (Ant Colony Optimization - ACO) и др. Идея перечисленных методов основана на предположении, что целевая функция имеет много локальных экстремумов, а просмотр всех допустимых решений невозможен. В такой ситуации сосредотачивают поиск в наиболее перспективных частях допустимой области.

В ряде работ (например, в [185]) повышение скорости и качества решения обеспечивают за счет использования алгоритма поиска с запретами (tabu search algorithm). Список запретов $Tabu(i_k)$ является механизмом, позволяющим алгоритму выбираться из локального оптимума. Он строится по нескольким предшествующим решениям $i_k, i_{k-1}, \dots, i_{k-l+1}$ (предыстории поиска), запрещает часть окрестности текущего решения $N(i_k)$. На каждом шаге алгоритма очередная точка i_{k+1} является оптимальным решением подзадачи:

$$F(i_{k+1}) = \min\{F(j) / j \in N(i_k) \setminus Tabu_l(i_k)\}.$$

Список запретов $Tabu(i_k) \in N(i_k)$ учитывает специфику задачи и, как правило, запрещает использование тех фрагментов решения (дуг графа, координат вектора), которые менялись на последних l шагах алгоритма.

Промежуточное положение между точными и приближенными методами занимает метод Лагранжевых релаксаций. Метод основан на том, что в задачах дискретной оптимизации «зазор» (разрыв двойственности) между целочисленным решением и решением соответствующей задачи ЛП часто очень мал или вовсе отсутствует [227]. Алгоритмы, основанные на методике Лагранжевой релаксации, успешно применяются в задачах разработки графика движения [10].

Анализ результатов исследований показывает, что решить оптимизационную задачу за приемлемое время (порядка 1 минуты) при использовании наиболее быстродействующих алгоритмов удастся только для сравнительно небольших участков (порядка 100 элементов). Поэтому применение микро-модели движения поездов на широком полигоне проблематично. Более реальным в текущем планировании является меза-моделирование движения как в детерминированном варианте, так и в варианте вероятностного анализа.

2.8 Алгоритм корректировки графика движения

А. Алгоритм поиска оптимального решения по корректировке графика синтезирован путем объединения задачи (а) - определения последовательности движения поездов при использовании нормативных кривых скорости - и задачи (б) - подстройки скоростных характеристик поездов. Задача (а) решается при помощи одной из следующих методик:

- с использованием маршрутов, заложенных в нормативный график;
- путем введения новых вариантов движения по путям станций.

Реализация алгоритма (см. схему на рисунке 2.11) начинается в момент поступления информации об отклонении от графика движения, об отказе инфраструктуры или изменении погоды. Принятые данные актуализируют модель движения по участку управления (модуль 0) и запускают процесс прогнозирования развития поездной ситуации. На каждом шаге имитационного процесса проверяется наличие межпоездного конфликта (модуль 2). Конфликт фиксируется путем анализа значения резервного времени t_{β} . Если конфликт обнаружен, запускается

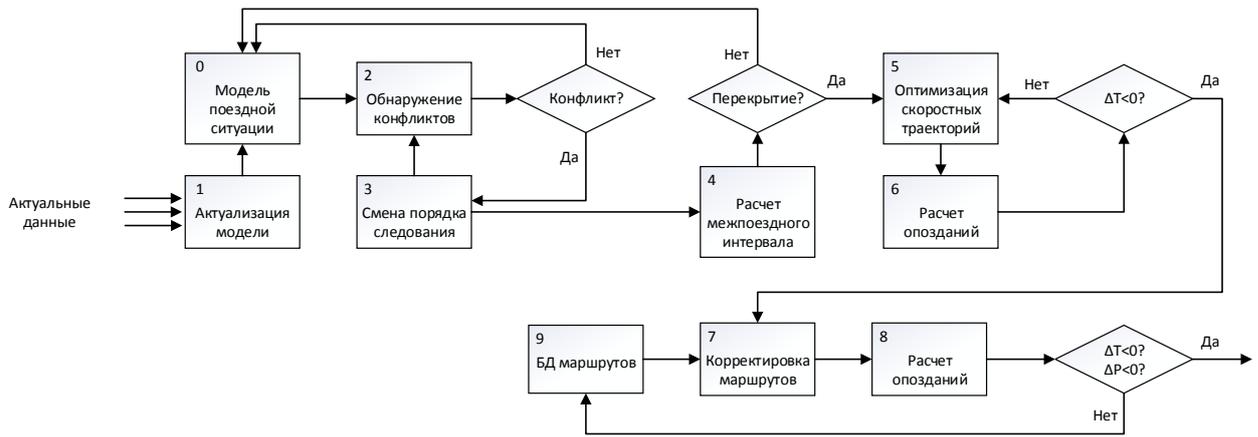


Рисунок 2.11 - Логическая схема алгоритма корректировки графика

выполнение задачи 3 по перестройке порядка следования поездов. Обслуживание заявок (поездов) осуществляется с использованием одного из эвристических правил. В потоке однородных подвижных единиц используется правило «первым пришел – первым обслужен» (*FCFS*). Если при анализе взаимодействия соседних ниток обнаруживается перекрытие блокировочных времен, запускается модуль 5, который вырабатывает вариант регулировки со сменой скорости.

Поиск наилучшего варианта на первом этапе производится с учетом заданных стандартных маршрутов. По каждому из вариантов рассчитываются величина накопленного опоздания по всем поездам или сверхнормативные затраты по пропуску потока (модуль 2). Оптимизационная задача решается с использованием схемы ветвей и границ. Процесс ограничивается заданным значением времени расчета, равным одной минуте.

Если коррекция графика приводит к появлению тупиковой ситуации, улучшение качества решения производится путем изменения маршрутов следования (модуль 6). В первую очередь, это касается движения поездов по путям станций. Если находится новый маршрут с лучшими характеристиками, он добавляется к перечню стандартизованных. После этого осуществляется возврат к задаче оптимизации с заданными маршрутами для выполнения следующей итерации.

Корректировка реализуется многошагово, путем итеративной подстройки скорости, что ведет к нормализации интервалов блокирования. В каждом цикле выполняется проверка реализуемости линий хода. Если имеется запас времени,

квазиоптимальное решение (промежуточный вариант) возвращается в блок перестройки графика для выполнения следующих циклов. По истечении заданного лимита времени обработки решение выдается пользователю.

Б. В основных блоках алгоритма корректировки графика движения последовательно решаются задача поиска квазиоптимальных решений при фиксированных ходовых и стояночных интервалах (блок 2) и задача согласования скорости поездов (блок 5) (рисунок 2.12). При решении задачи первого вида времени хода

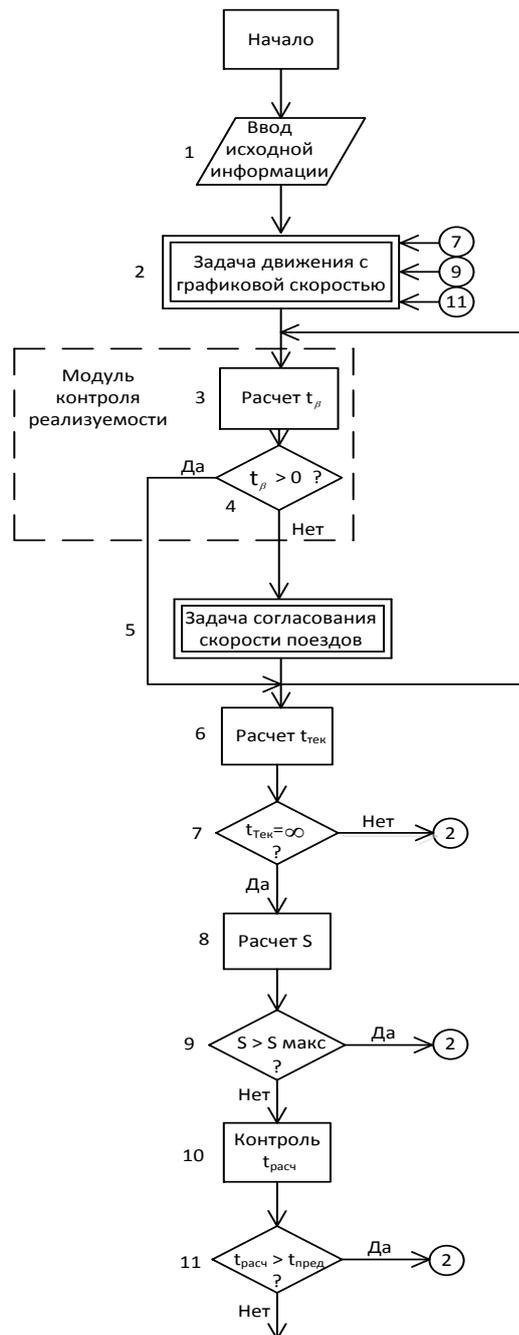


Рисунок 2.12 - Схема реализации алгоритма корректировки графика движения

и стоянки соответствуют значениям, заложенным в график. Эти величины, а также максимально допускаемые значения скорости на каждом блок-участке входят в пакет исходной информации, которая вводится в систему посредством блока 1. Кроме того, используются данные о скоростных характеристиках поездов различных типов. В качестве дополнительной информации используется набор вариантов маршрутов, которые вводятся при отказах элементов инфраструктуры.

По мере изменения поездной обстановки в систему вводится актуальная информация о ситуации на участке управления, которая включает:

- совокупность моментов прохождения поездами контрольных пунктов;
- информация об изменении веса и длины поездов;
- данные о технических отказах на станциях и перегонах.

Задача поиска квазиоптимальных решений при использовании модели с фиксированными (графиковыми) скоростями, решаемая в блоке 2, разбивается на две подзадачи: перестройки порядка следования поездов и локальной корректировки маршрутов их следования. Процедура обнаружения конфликтов реализуется для каждой пары поездов. Выбор пары поездов и расчетных блок-участков производится посредством обратных связей, которые переключаются под управлением счетчиков (8г, 9г), (8, 9) и (10, 11).

Контроль выполнения требования безопасности производится в модуле контроля реализуемости графика. В этом модуле производится расчет буферного интервала τ_{β} (блок 3) и определение ситуации, когда эта расчетная величина отрицательна. В этом случае программа переходит к решению задачи подстройки скорости поезда, следующего позади расчетного, чтобы избежать движения на желтый или остановки. Регулирование скорости производится в блоке 5. После корректировки движения расчетного поезда проводится проверка, не нарушено ли условие безопасности для других поездов (обратная связь к бл. 3). Итеративный процесс поиска решения организуется под контролем узла изменения текущего времени (блоки 6, 7) и узла перемещения контрольного окна по ветвям графа (блоки 8, 9).

Блок-схема решения задачи поиска оптимальных решений (рисунок 2.13) показывает, что первый шаг представляет собой обзор ситуации на участке. Определяются опасные – с точки зрения возникновения конфликтов – элементы. Для этих элементов задача поиска оптимальной последовательности поездов решается

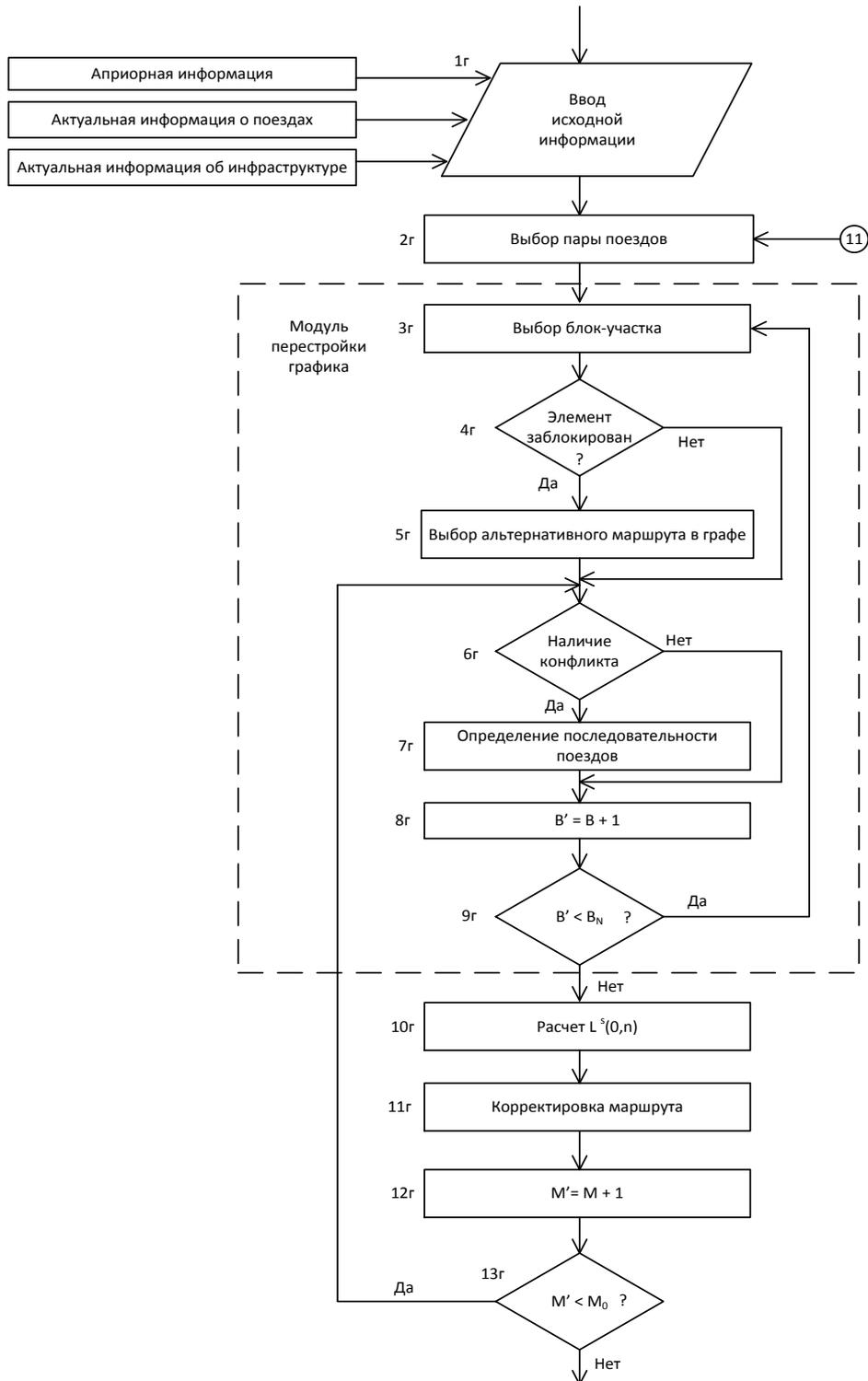


Рисунок 2.13 - Блок-схема поиска оптимальной последовательности поездов

в первую очередь. На втором шаге анализируется прибытие поездов из-за границ участка на наличие конфликтов. В модуле перестройки проверяется доступность каждого из элементов, выбранного в блоке 3г. Если элемент заблокирован, меняется путь следования поезда по станции одним из заданных маршрутов (блок 5г).

Обнаружение конфликта производится в блоке 6г (рисунок 2.14). Рассмат-

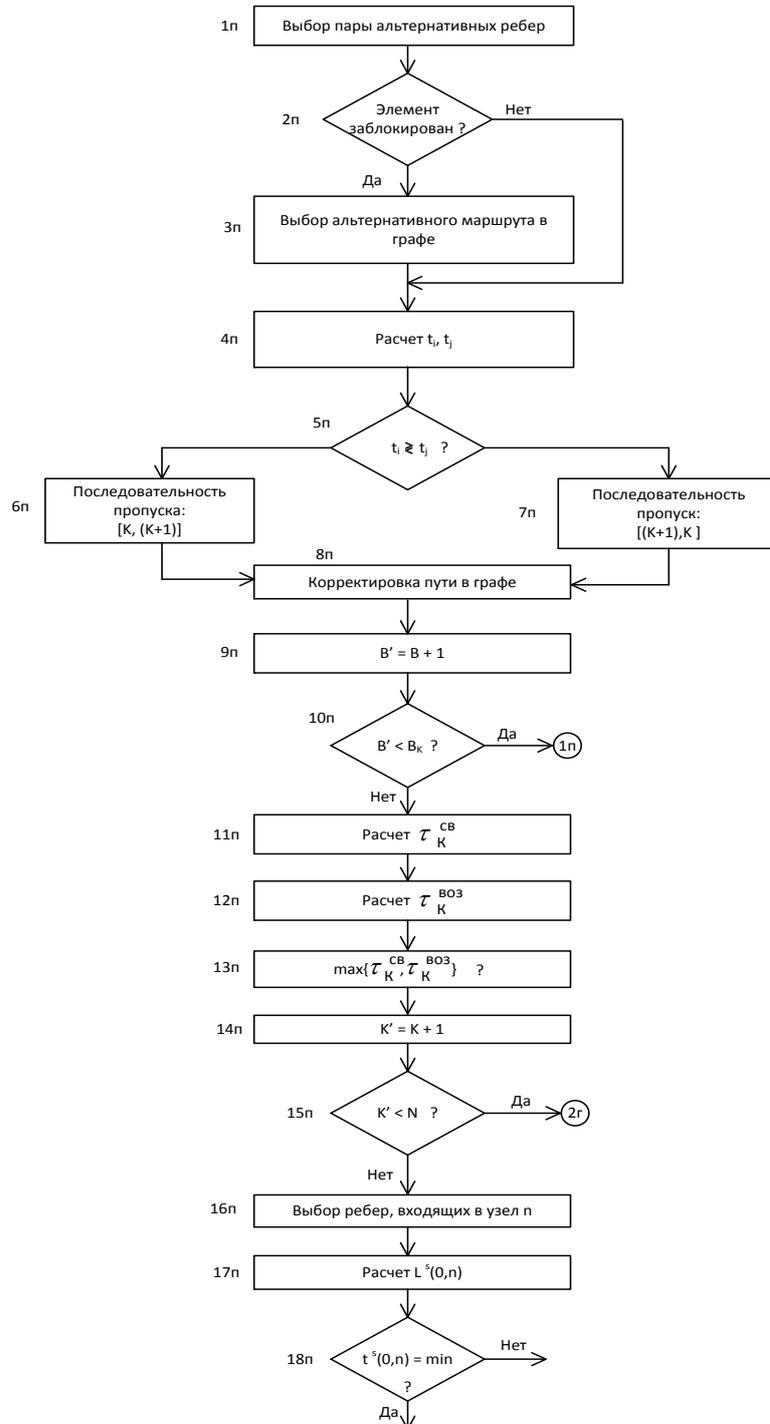


Рисунок 2.14 - Блок-схема сегмента перестройки графика

ривая пути в графе, соответствующие маршрутам и расписаниям следования, программный модуль рассчитывает моменты t_i, t_j вступления каждого из обрабатываемых поездов на данный блок-участок. В блоках 5п, 6п, 7п принимается решение: какой из поездов пропускать первым. Затем рассчитывается протяженность путей в графе, соответствующая беспрепятственному пропуску поезда по участку (τ_K^{cs}) и движению в условиях вынужденных задержек (τ_K^{603}) . Расчет производится в блоках 11п, 12п. Из полученных значений выбирается максимальное (блок 13п), после чего переходим к анализу движения следующих поездов. Цикл организуется путем перебора номеров поездов (блоки 14п, 15п) до достижения наличного их числа N . Блок 16п производит операцию выбора дуг, входящих в конечный узел графа, и определения их протяженности. Расчет пути $l^s(0, n)$ в графе, соответствующего максимальной накопленной задержке, выполняется блоком 17п.

2.9 Результаты решения тестовых задач

Программный комплекс, в котором реализованы описанные модель движения и алгоритм корректировки графика, разработан с использованием языка C++. В процессе исследования вариантов оптимизационного алгоритма применялся коммерческий программный пакет CPLEX 6.0, предназначенный для поиска оптимальных решений задач дискретного программирования. Решение тестовых задач произведено с использованием ресурсов ПК на основе процессора Pentium IV.

Целью проведения компьютерного моделирования являлась оценка быстродействия и качества работы разработанного алгоритма. Под качеством работы понимается степень уменьшения числа опозданий на выходе участка, которая достигается вследствие применения регулировочных мероприятий. В качестве входных отклонений от графика использовались опоздания по прибытию поездов на участок управления и отказы элементов инфраструктуры.

В процессе исследования проведено решение тестовых задач по поиску оптимальных корректировок графика для сценариев, которые характеризуются

различным числом первичных задержек. Моделирование выполнено для участка дороги с движением грузовых тяжеловесных поездов (массой 6300 т.), характерным для магистральных железных дорог России. Исследована задача корректировки графика в границах диспетчерского круга протяженностью 86 км. Участок двухпутный, включает 4 станции и 5 перегонов (см. схему на рисунке 2.15). Число блок-участков составляет 265. Интенсивность грузового движения принята максимальной, характерной для пиковых часов, - 7 пар поездов в час; величина межпоездного интервала составляет 8,6 мин. В расписание движения поезда по участку заложено буферное время в размере 24 мин., что составляет 20 проц. от полного времени хода. Участковая скорость следования грузовых поездов, согласно нормативному графику движения, равна 51 км/ч.

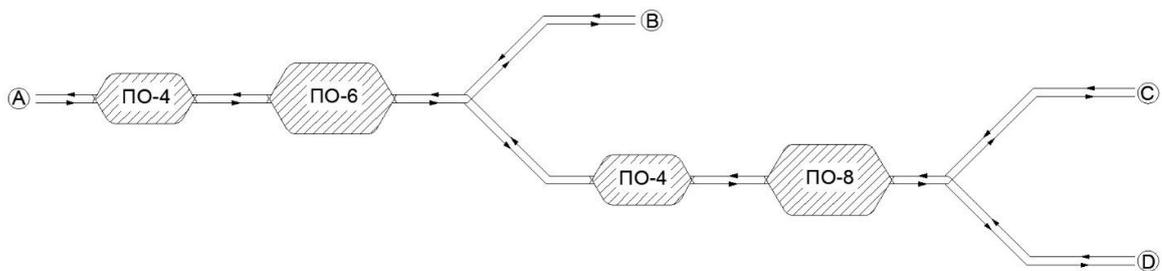


Рисунок 2.15 - Схема модельного участка диспетчерского управления

Полагается, что поезда прибывают на участок с задержками относительно графиковых моментов, распределенными равномерно в интервале от 0 до $t_{\text{макс}}^{\text{оп}}$. При выполнении компьютерных экспериментов значения максимального опоздания приняты равными 600 (малые задержки), 1800 (средние) и 3000 (сильные) секунд. Всего проанализированы 45 сценариев с различным сочетанием опаздывающих поездов.

Расчеты откорректированных графиков выполнялись также при условии временного закрытия некоторых блок-участков вследствие отказов. В серии экспериментов моделировались 27 ситуаций, в которых неисправность локализовывалась на одном элементе, и 9 ситуаций с серьезными отказами, когда неисправности возникали на различных частях участка. По каждому из сценариев выполнялись 10 циклов вычислений, результаты усреднялись.

Основной целью проведения компьютерных экспериментов являлось определение возможности использования программного средства в диспетчерской СППР при различных значениях временного горизонта планирования. Исследована работа алгоритма при стандартных значениях интервала прогнозирования – 1, 3 и 6 ч., а также при расширенном горизонте, равном 9 ч. В экспериментах испытывались две разновидности алгоритма: с использованием глобального или локального поиска.

При горизонте прогнозирования, равном одному часу, расчетное время не превышает 14 с. при обеих разновидностях алгоритма. В экспериментах, когда горизонт составляет 3 часа, среднее расчетное время достигает 135 с. (рисунок 2.16а). Рост компьютерного времени объясняется резким увеличением (до 12,9 тысяч) числа пар альтернативных дуг графа.

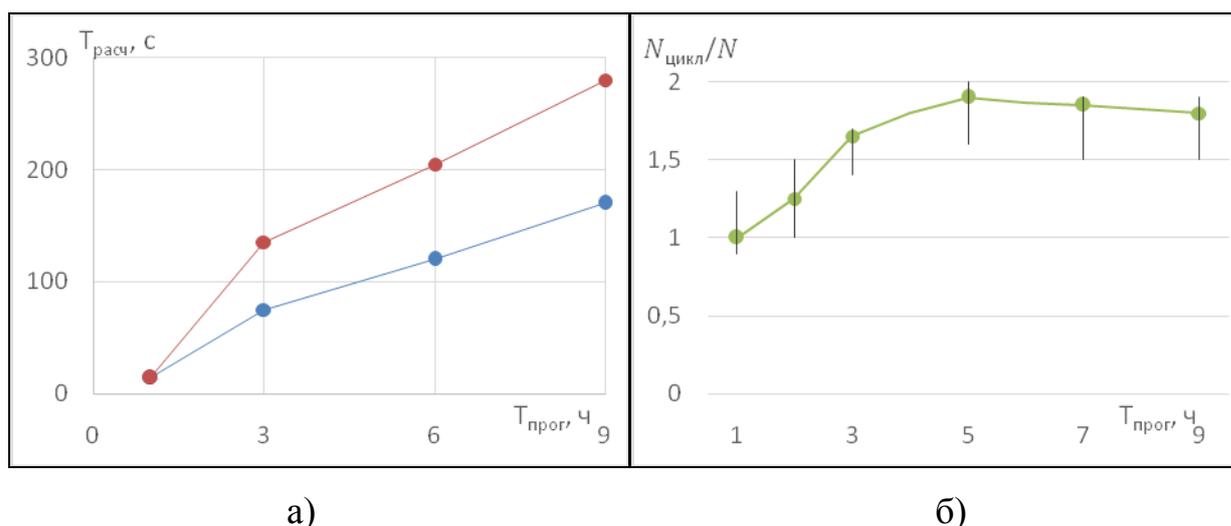


Рисунок 2.16 - Изменение расчетного времени (а) и числа циклов оптимизации (б) при расширении горизонта прогнозирования

С расширением временного горизонта число альтернативных дуг растет быстрее, чем число поездов, следующих по участку. Например, при увеличении интервала прогнозирования в 3 раза (с 3 до 9 часов) число дуг возрастает в 4,8 раза. Размерность задачи растет таким же темпом при расширении пространственного горизонта. Это важно учитывать при оценке применимости методологии в условиях РЖД, где протяженность круга поездного диспетчерского управления достигает 200 км. При увеличении размерности примерно в таком же

темпе растет число элементов пути, на которых в процессе поиска решения перестраивается скорость. Количество итеративных циклов подстройки скоростных режимов $N^{цикл}$, отнесенное к их общему числу N , характеризует среднее число отклонений от графика, поддающихся эффективной коррекции. Этот показатель слабо зависит от горизонта прогнозирования (см. рисунок 2.16б).

Получена оценка влияния добавочного времени на качество пропуска, что выражается в ослаблении процесса размножения задержек и, следовательно, опозданий поездов по прибытию на станции. В процессе исследований рассматривалось движение транзитных грузовых поездов в границах модельного участка. Добавочное время устанавливалось в пределах от 15 до 24 мин. при номинальном графиковом времени хода по участку, равном 101 мин. В горизонте прогнозирования, равном 3 часам, средние опоздания по проследованию выходных границ участка снижались по сравнению с входными задержками в 2–3 раза – до 140-540 с. (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Изменения задержки поездов в результате корректирования

Категория опозданий	Средние значения входных задержек, с	Средние значения выходных задержек, с
малые	305	141
средние	910	318
сильные	1507	540

Эксперименты показывают, что сбои на инфраструктуре участка, в частности, временно закрытые блок-участки вызывают менее интенсивное размножение задержек поездов. Исследовались сценарии, когда исключался из эксплуатации один путь на определенной станции. В сложном случае отказы имитировались одновременно на нескольких станциях участка. При упрощенном сценарии средняя величина опоздания поездов по выходам с участка не превышает 200 с., при сложном - 340 с.

2.10 Оценка экономии затрат энергии при корректировке графика

Дадим оценку эффективности поиска оптимальных корректировок графика при использовании критерия энергии, израсходованной на тягу поездов [199]. Задача решается на основе микро-модели движения, рассмотренной выше. При решении оптимизационной задачи в качестве целевой функции принимается число неграфиковых остановок, возникающих на участке в заданный период. Экономия энергии возникает вследствие того, что при разрешении каждого из конфликтов скоростная траектория одного из поездов принудительно изменяется таким образом, чтобы получить энергетически эффективный режим - работу на пониженных позициях тяги или удлинение фазы выбега (см. выводы разд. 4).

В серии из 25 экспериментов по корректировке трехчасового графика движения поездов по двухпутному участку дороги программный комплекс производил в среднем по 87 итераций, направленных на подстройку скорости. За этот период на участке реализовывались нитки 32 грузовых поездов, из них до десяти полагались опаздывающими. В результате урегулирования конфликтов исключены 1,9 потенциальных неграфиковых остановок каждого поезда (в среднем), которые могли возникнуть из-за нарушения графика.

Оптимизация скоростного режима, производимая с целью профилактики единичного конфликта, дает по грузовому поезду с массой 6,3 тыс. тонн экономию электроэнергии, как минимум, равную 200 кВтч. Расход ресурса при следовании поезда на модельном участке протяженностью 86 км в условиях потока отклонений средней интенсивности оценивается значением 4,3 тыс. кВтч. Таким образом, регулировочные мероприятия, проведение которых рекомендует оптимизационный алгоритм, позволяют в 2–3 раза уменьшить опоздания поездов. Потенциал экономии энергии в границах диспетчерского круга (200 км), возникающий за счет снижения числа задержек, составляет более 340 млн. кВтч (за год).

Результаты, полученные при моделировании потока поездов на типовом участке железной дороги, оказываются достаточно близкими показателям, которыми характеризуется реальное движение. Экспериментальные исследования

характеристик движения поездов на различных участках Транссибирской магистрали, проведенные в рамках настоящей работы, показывают, что на 100 км пути среднее число неграфиковых остановок грузового поезда при интенсивности потока, равной 5 поездам в час, составляет 1,0-1,2 ед. При сгущении потока до интенсивности, равной 7 поездов/час, число задержек растет, в отдельные периоды превышая 2 ед. Как видим, моделирование движения дает результат (1,9 неграфиковых задержек), в достаточной мере соответствующий реальной статистике.

Выводы по разделу 2

1. Графовая модель, отражающая движение смешанного потока поездов на микроуровне, служит теоретической основой при разработке алгоритмов поиска оптимальных корректирующих графиковых решений с учетом требований пунктуальности и экономической эффективности.

2. Точные оптимизационные алгоритмы позволяют в режиме реального времени рассчитывать регулировочные решения для круга поездного диспетчерского управления протяженностью до 200 км. в горизонте планирования порядка одного часа. Увеличение горизонта до 3-6 часов требует использования приближенных алгоритмов – эвристик.

3. Усовершенствованный алгоритм поиска оптимальных корректирующих решений, использующий подстройку траекторий грузовых поездов по критерию пунктуальности, дополнен блоком оптимизации графика по критерию затрат энергии.

4. Результаты решения тестовых задач удовлетворительно согласуются с данными, которые получены в реальных условиях функционирования железной дороги; это свидетельствует об эффективности разработанного алгоритма.

5. Профилактические меры, направленные на уменьшение числа неграфиковых задержек поездов, позволяют улучшить показатель пунктуальности для смешанного потока на 10-15 пунктов и получить годовую экономию энергии в размере более 340 млн. кВтч по каждому кругу диспетчерского управления.

3 КОРРЕКТИРОВКА ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ: СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

3.1 Обобщенная стохастическая модель движения поездов

А. При формировании и продвижении потока поездов регулярно возникают неплановые отклонения, имеющие случайный характер. Поиск оптимального управления в условиях наличия возмущений становится вероятностной задачей. Результат управления априори считается приближенным из-за отсутствия полных исходных данных и несовершенства системы регулирования.

Чтобы определить эффективные меры компенсации отклонений и профилактические мероприятия по их предупреждению, необходимо построить адекватную прогнозную модель развития процесса. При стохастическом прогнозировании учитывается, помимо точной информации о текущей ситуации, вероятность возникновения препятствий и статистика отклонений операционных времен, полученные на основе анализа исторических данных [37, 52]. Результатами расчета являются распределения отклонений моментов прибытия поездов в ключевые пункты (в частности, на станции графиковых остановок) или интервалов следования поездов. На основе анализа распределений определяются места конфликтов, оценивается эффективность регулировок.

Базовым элементом процесса вероятностного прогнозирования развития ситуации на участке служит двухпоездная стохастическая модель движения [174, 180]. Анализ взаимодействия пары поездов, выполненный в предшествующих исследованиях, не позволяет выявить закономерности в движении плотного потока. Кроме того, в известных работах отсутствует учет механизма непрерывного регулирования скоростной траектории, которое осуществляет машинист. Все это требует совершенствования стохастической модели движения поездов.

Случайные отклонения от графика вызываются изменениями физических характеристик поезда (тягового потенциала, сопротивления движению и др.) и своеобразием условий его пропуска по участку. На флуктуации скорости также

вливают квалификация, стиль работы машиниста и алгоритм, реализуемый системой автоведения. Траектории движения формируются двумя группами факторов, первая из которых оказывает воздействие на каждый единичный поезд, – вне зависимости от влияния других поездов. Описание этого процесса производится с помощью однопоездной модели [32]. Ко второй группе относятся случайные задержки, которые оказывают влияние на другие поезда. Основой для оценки взаимовлияния поездов в потоке является двухпоездная модель [33].

Предлагаемая *обобщенная однопоездная модель* описывает отклонения, вызванные возмущающими факторами [195]. На рисунке 3.1 показана графическая интерпретация механизма формирования отклонений по прибытию на конечную станцию C . Поезд прибывает на входную станцию A с опозданием в момент

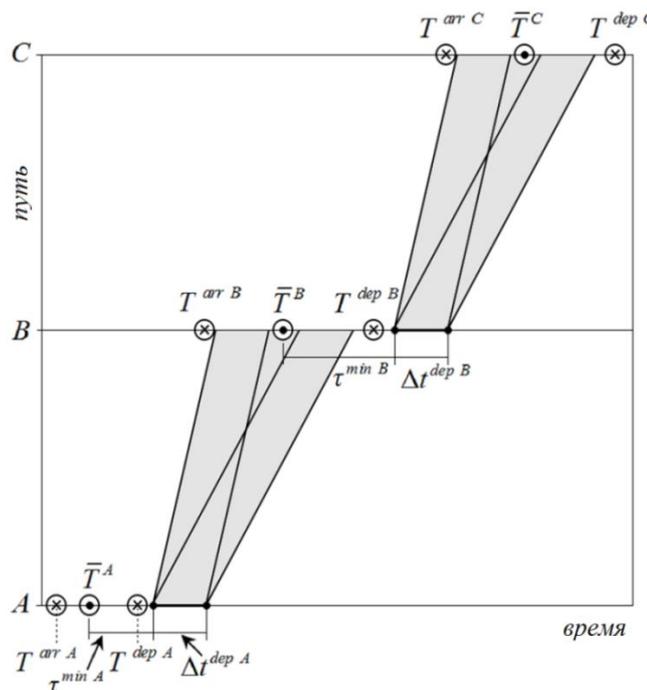


Рисунок 3.1 - Механизмы формирования времени прибытия поезда

× – графиковые моменты отправления и прибытия;

⊙ – прогнозируемые моменты прибытия (средние значения)

\bar{T}^A . Поезд отправляется на участок по истечении минимального интервала $\tau_{мин}^A$. Отправление поезда может дополнительно задержаться при воздействии случайных факторов (в частности, из-за процесса высадки/посадки пассажиров). Рассеяние дополнительной задержки условно изображено интервалом $\Delta t^{опн A}$.

Ходовое время на участке пути AB подвержено случайным воздействиям, что приводит к рассеянию моментов прибытия на станцию B . На графике это отображено в виде «пакета» линий хода поездов. Поезд может быть отправлен со станции B по прошествии времени $\tau_{мин}^B$, которое зависит от станционных операций. Момент отправления также есть случайная величина, что отражено на графике интервалом $\Delta t^{омнB}$. Случайный характер движения по участку BC приводит к дополнительному рассеянию моментов прибытия на станцию C . Показано [171], что расчет характеристики рассеяния моментов прибытия на конечную станцию основывается на многократном использовании операции свертки распределений случайных величин, характеризующих каждый из элементов траектории.

Б. При оперативном управлении движением диспетчер в каждой ситуации принимает решение, фокусируя свое внимание на паре поездов, которые могут быть вовлечены в конфликт. В основу принятия регулировочного решения кладется двухпоездная модель [33, 208]. Эта модель включает поезд, который испытывает первичную задержку (лидирующий), и другой поезд, который подвержен влиянию первичной задержки (последующий).

Исходными данными при построении обобщенной модели являются:

- нормативное расписание движения, минимальные времена хода, остановок и пересадочных интервалов (на станциях трансфера пассажиров);
- безопасные минимальные межпоездные интервалы;
- моменты фактического прибытия поездов на участок;
- актуальные ограничения скорости, состояние погоды;
- характеристики рассеяния операционных времен (хода и остановок).

Рассмотрим базовый сценарий движения пары поездов одного направления с малым интервалом по участку AB . Допустим, поезд №1 отправляется с опозданием $\tau_1^{отпA}$ со входной станции участка A , величина задержки детерминирована. На участке следования до следующей станции B реализуется одна из траекторий, входящих в «веер» линий хода (рисунок 3.2).

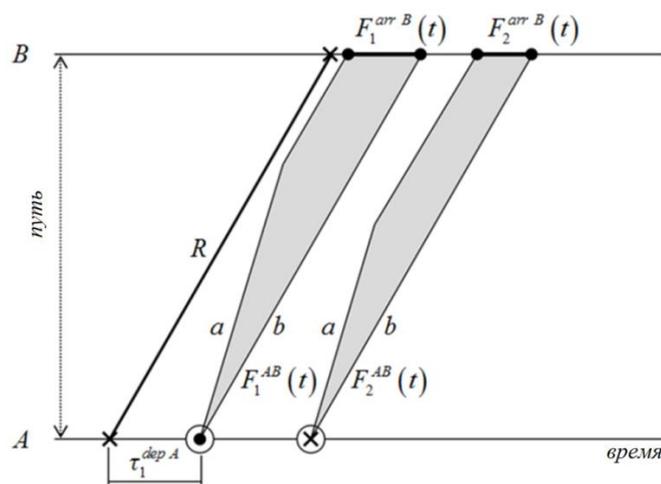


Рисунок 3.2 - Модель взаимодействия поездов попутного следования

Распределение $F_1^{AB}(t)$ обусловлено неконтролируемыми факторами (состоянием техники, погоды) и работой машиниста. В некоторых случаях время хода увеличено относительно нормативного (траектория (b)), в других уменьшено – применен режим нагона (траектория (a)). В последнем случае система управления (машинист) снизит скорость, достигнув некоторой точки пути R . Распределение моментов прибытия описывается функцией $F_1^{arr B}(t)$.

Положим, поезд №2 отправляется со станции A , время его хода распределено по закону $F_2^{AB}(t)$. Имеется вероятность, что при ускоренном движении поезд №2 приблизится на минимальное безопасное расстояние. Система безопасности сработает таким образом, что дальнейшее его движение замедлится (режим «движения по удалению»). Распределение моментов прибытия поезда $F_2^{arr B}(t)$ видоизменится; оно сформируется двумя величинами времен хода, а также зависит от входного опоздания $\tau_1^{отп.А}$. Типовым сценарием также является возникновение задержки поезда №2 на перегоне (рисунок 3.3а) вследствие неплановой остановки поезда-лидера. Продолжительность первичной остановки характеризуется распределением $F_i^d(t)$. После устранения препятствия движение продолжится Рисунок 3.3б отражает сценарий движения пары поездов по участку ABC с графическими остановками на станциях. Если поезд №2 следует за опаздывающим поездом №1, многократно возникает ситуация «движения по удалению».

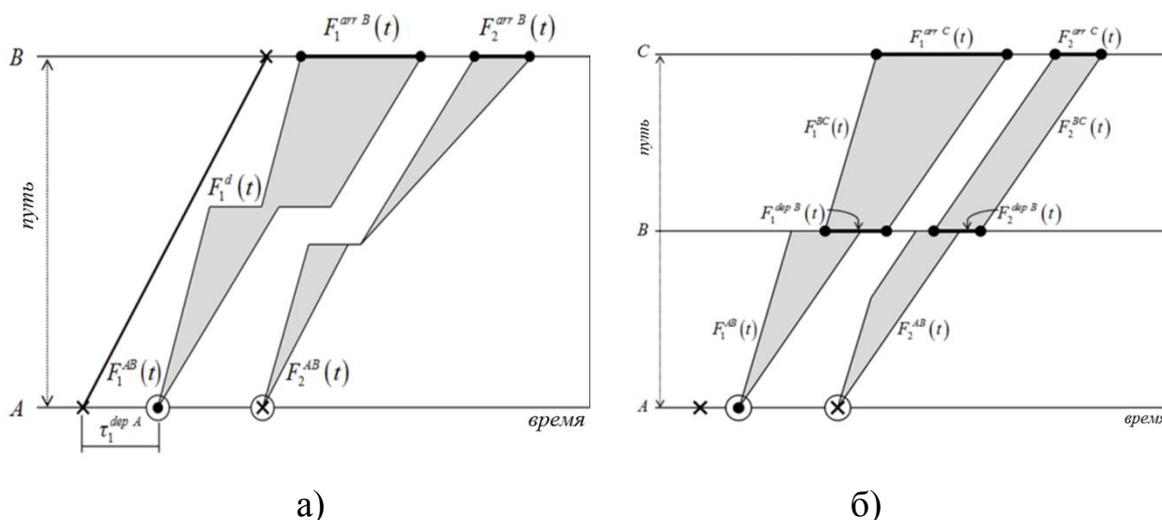


Рисунок 3.3 - Графическая интерпретация движения пары поездов с остановкой (а) на перегоне и (б) на станции

Диспетчер сокращает длительность остановок, что приводит к сужению интервала рассеяния моментов прибытия на конечную станцию. Регулирующие воздействия со стороны машиниста также ведут к сокращению зоны рассеяния. В формировании времени прибытия поезда №2 на станцию *C* принимают участие шесть компонент: четыре величины, отражающие вариации времен хода, и две случайные величины, обусловленные регулирующими воздействиями на поезда при их отправлении со станции *B*.

3.2 Базовая модель формирования интервалов прибытия поездов

А. Задачей моделирования является определения интервала отправления, при котором вероятно появление заданного числа задержек поездов. Механизм формирования задержек отражается рисунком 3.4 [47]. Полагаем, что интервалы между поездами в пакете при отправлении со ст. *A* рассеяны. Поезд-лидер 1 совершает на перегоне кратковременную неплановую остановку, которая имеет случайную длительность τ_1 . При плотном движении последующий поезд также вынужден остановиться; трогается немедленно после того, как лидер возобновляет движение. Такому же влиянию подвергаются и другие поезда, что трактуется как процесс размножения задержек. Фазы замедления и ускорения при выполнении остановок учитывать не будем, это не влияет на общность решения задачи.

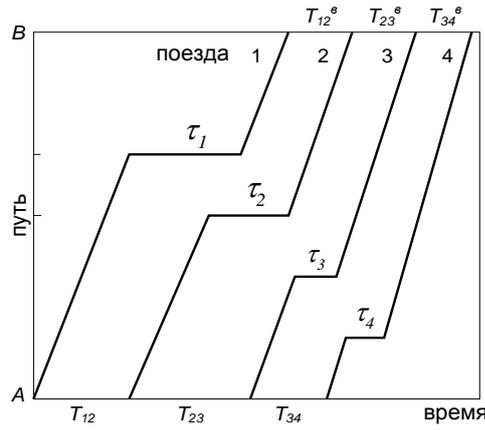


Рисунок 3.4 - Механизм возникновения вторичных задержек

Прежде всего, исследуем базовую двухпоездную модель формирования вторичных задержек [193]. Межпоездной интервал при отправлении обозначим как $X_j + s_0$, где X_j – независимые одинаково распределенные случайные величины, $s_0 > 0$ – минимальное безопасное расстояние. Распределение случайных интервалов прибытия v_j на станцию B зависит от функций распределения исходного интервала и задержки τ_1 . Существуют две ситуации: с отсутствием влияния остановки поезда 1 на поезд 2 (рисунок 3.5а) и с возникновением вторичной остановки (рисунок 3.5б)

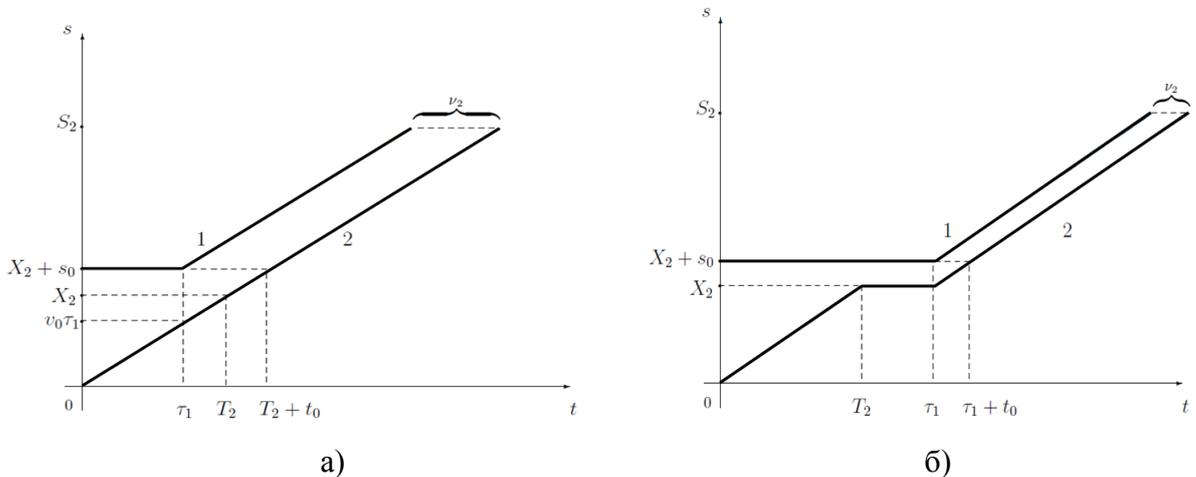


Рисунок 3.5 - Варианты следования ведомого поезда при разных интервалах

Введем следующие обозначения: $T_j = \frac{1}{v_0} X_j$ – время, необходимое поезду j , чтобы преодолеть расстояние X_j ; S_j – расстояние от точки нахождения поезда j до станции B в момент $t = 0$. Из рассмотрения графика видно, что $v_2 = T_2 - \tau_1 + t_0$.

Пусть $f(x)$ и $g(x)$ – плотности распределения случайных величин X_2 и τ_1 соответственно. Покажем, что для первого случая справедливо равенство:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 + t_0 < t) = v_0 \int_0^\infty f(v_0(t - t_0 + y))g(y)dy. \quad (3.1)$$

Функцию плотности для момента T_2 обозначим f_2 . Так как плотность распределения суммы независимых случайных величин есть свертка исходных плотностей [16], то

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 < t) = \int_0^\infty f_2(t - y)g(-y)dy \quad (3.2)$$

Здесь учтено, что $\tau_1 \geq 0$. Отсюда

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 + t_0 < t) = \int_0^\infty f_2(t - t_0 + y)g(y)dy.$$

Очевидно,

$$f_2(t) = \frac{d}{dt} \mathbf{P}(X_1 < tv_0) = v_0 f(tv_0). \quad (3.3)$$

Таким образом, равенство (3.1) доказано, и, следовательно,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{P}(v_2 < t | T_2 - \tau_1 \geq 0) &= \\ &= \frac{d}{dt} \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 + t_0 < t) = v_0 \int_0^\infty f(v_0(t - t_0 + y))g(y)dy. \end{aligned}$$

При анализе второго случая нужно учесть, что $v_2 = t_0$ – величина не случайная, то есть, $\mathbf{P}(v_2 < t | T_2 - \tau_1 < 0) = F_0(t)$, (3.4)

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

Используя формулу полной вероятности, получаем выражение для распределения случайной величины выходного интервала v_2 :

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(v_2 < t) &= \\ &= \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 \geq 0) \mathbf{P}(v_2 < t | T_2 - \tau_1 \geq 0) + \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 < 0) \mathbf{P}(v_2 < t | T_2 - \tau_1 < 0) = \\ &= \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 \geq 0) \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 + t_0 < t) + \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 < 0) F_0(t). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Заметим, что $\frac{d}{dt} F_0(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t \neq t_0, \\ 0, & \text{если } t = t_0 - 0, \\ +\infty, & \text{если } t = t_0 + 0. \end{cases} \quad (3.6)$

Из (3.2) и (3.3) следует, что

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 < t) = v_0 \int_0^\infty f(v_0(t + y))g(y)dy. \quad (3.7)$$

Отсюда

$$\mathbf{P}(T_2 - \tau_1 \geq 0) = v_0 \int_0^\infty \int_0^\infty f(v_0(x + y))g(y)dy dx, \quad (3.8)$$

$$\mathbf{P}(T_2 - \tau_1 < 0) = v_0 \int_{-\infty}^0 \int_0^\infty f(v_0(x + y))g(y)dy dx. \quad (3.9)$$

Из (3.5)-(3.9) вытекает, что при $t > t_0$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P}(v_2 < t) = v_0^2 \left(\int_0^\infty f(v_0(t - t_0 + y))g(y)dy \right) \int_0^\infty \int_0^\infty f(v_0(x + y))g(y)dy dx, \quad (3.10)$$

а при $t < t_0$ $\frac{d}{dt} \mathbf{P}(v_2 < t) = 0.$

Правую часть равенства (3.10) обозначим $p(t)$. Из этого равенства следует, что для произвольного $\Delta t > 0$

$$\frac{1}{\Delta t} \mathbf{P}(t_0 < v_2 < t_0 + \Delta t) = p(\bar{t}_1),$$

где $\bar{t}_1 > t_0$ – некоторая промежуточная точка. Если функция f непрерывна, то и p непрерывна. Поэтому $\frac{d}{dt} \mathbf{P}(v_2 < t) \Big|_{t=t_0+} = p(t_0).$

Так что, равенство (3.10) верно и при $t = t_0 +$. По смыслу описываемой модели, $f(x)$ и $g(x)$ равны нулю при $x < 0$. Поэтому функция плотности случайного выходного интервала v_2 имеет вид:

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

Б. Построим базовую *трехпоездную* модель формирования выходных интервалов. Вычислим плотность для величины v_3 - интервала между поездами 2 и 3 в точке S_3 . График движения для варианта модели без вторичных задержек приведен на рисунке 3.6, для вариантов с размножением задержек – на рисунке 3.7.

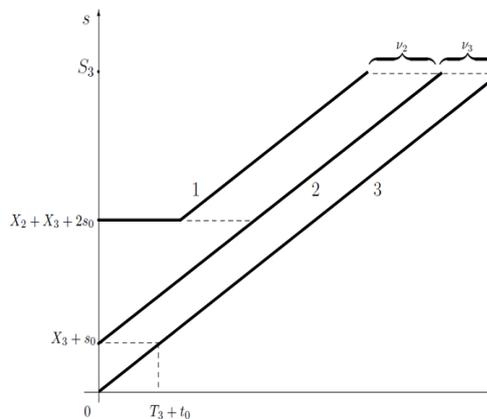


Рисунок 3.6 - Движение при отсутствии эффекта размножения задержек

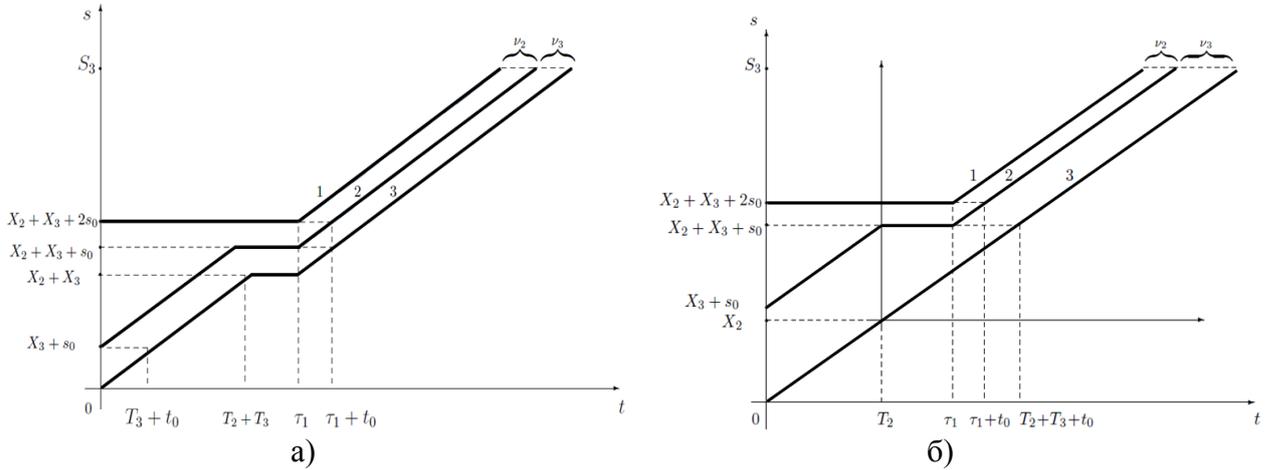


Рисунок 3.7 - Движение группы поездов при наличии эффекта размножения

Функция плотности для первого случая имеет следующий вид:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P}(v_3 < t | T_2 \geq \tau_1) = \frac{d}{dt} \mathbf{P}(T_3 + t_0 < t) = v_0 f(v_0(t - t_0)). \quad (3.11)$$

Для случая $T_2 < \tau_1$, $T_2 + T_3 \geq \tau_1$ (рисунок 3.7б), когда $v_3 = T_2 + T_3 + t_0 - \tau_1$, получаем аналогично (3.11):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{P}(v_3 < t | T_2 < \tau_1, T_2 + T_3 \geq \tau_1) &= \frac{d}{dt} \mathbf{P}(T_2 + T_3 + t_0 - \tau_1 < t) = \\ &= v_0 \int_0^\infty f^{*2}(v_0(t - t_0 + y)) g(y) dy, \end{aligned} \quad (3.12)$$

где $f^{*2}(x) = \int_{-\infty}^\infty f(x - y) f(y) dy$ – двукратная свертка плотности f .

Применив формулу полной вероятности, имеем:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(v_3 < t) &= \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 \geq 0) \mathbf{P}(T_3 + t_0 < t) + \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 < 0, T_2 + T_3 < \\ &\tau_1) F_0(t) + \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 < 0, T_2 + T_3 \geq \tau_1) \mathbf{P}(T_2 + T_3 + t_0 - \tau_1 < t) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Обозначим $f_{2,3}$ – плотность распределения $(T_2 + T_3)$. Имеем:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(T_3 + t_0 < t) &= \mathbf{P}(X_3 < v_0(t - t_0)), \\ \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 < 0, T_2 + T_3 < \tau_1) &= \\ &= \int_0^\infty f_{2,3}(t + y) g(y) dy = v_0 \int_0^\infty f^{*2}(v_0(t + y)) g(y) dy. \end{aligned}$$

Полагая, что $(T_2 - \tau_1)$ и T_3 независимы, получаем совместную плотность $f(t, z)$ этих случайных величин: $v_0^2 f(v_0 z) \int_0^\infty f(v_0(t + y)) g(y) dy$.

Таким образом,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(T_2 - \tau_1 < 0, T_3 \geq -(T_2 - \tau_1)) &= \\ &= v_0^2 \int_0^\infty \left(\int_0^\infty f(v_0(y - t)) g(y) dy \right) \left(\int_t^\infty f(v_0 z) dz \right) dt. \end{aligned}$$

Учитывая (3.8) и (3.9), получаем при $t > t_0$:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{P}(v_3 < t) = & v_0^2 f(v_0(t - t_0)) \int_0^\infty \int_0^\infty f(v_0(x + y)) g(y) dy + \\ & + v_0^3 \int_0^\infty [(\int_0^\infty f(v_0(y - t)) g(y) dy) (\int_t^\infty f(v_0 z) dz)] dt (\int_0^\infty f^{*2}(v_0(t - t_0 + \\ & + y)) g(y) dy). \end{aligned} \quad (3.14)$$

Полученные зависимости будут использованы далее при анализе характеристик рассеяния интервалов прибытия поездов на станции.

3.3 Распределение интервалов прибытия при пакетном движении

А. Положим, на участок отправляется пакет поездов, поезд 1 - в момент $t=0$. Тогда время $T^{(m)}$ отправления поезда m записывается в виде:

$$T^{(m)} = \sum_{j=2}^m T_j + (m-1)t_0, \quad m = 2, 3, \dots, n \quad (3.15)$$

Рассмотрим задачу нахождения распределения случайного интервала прибытия v_k на станцию B в предположении, что неграфиковую остановку случайной длительности τ делает только поезд 1. Требуется найти функции распределения $W_k(t) = P(v_k < t)$, $k = 2, 3, \dots, n$ выходных интервалов [204].

Сформулированная общая задача эквивалентна следующей. Пусть поезд 1 задержан на станции A в момент $t = 0$ на случайное время τ . Если $\tau < T_2$, то поезда 2, 3 и т. д. отправляются в запланированные моменты времени. Если $\tau > T_2$, то поезд 2 будет задержан и начнет движение в момент $\tau + t_0 > T^{(2)}$. Поезд 3 отправляется по такому же правилу. Теперь v_k - это интервалы между моментами отправления поездов с номерами $(k - 1)$ и k . Требуется определить функции распределения $W_k(t)$ величин v_k , $k = 2, 3, \dots, n$.

В качестве примера рассмотрим механизм формирования интервалов следования пяти поездов при различных значениях задержки τ . Минимальный интервал и буферная добавка равны, соответственно, $t_0 = 1$, $T_k = 2$. Положим, что моменты планового отправления удовлетворяют равенству $T^{(k)} = 3(k - 1)$. На рисунке 3.8

показан фрагмент расписания, из которого следует, что число укороченных интервалов прибытия растет при увеличении задержки τ .

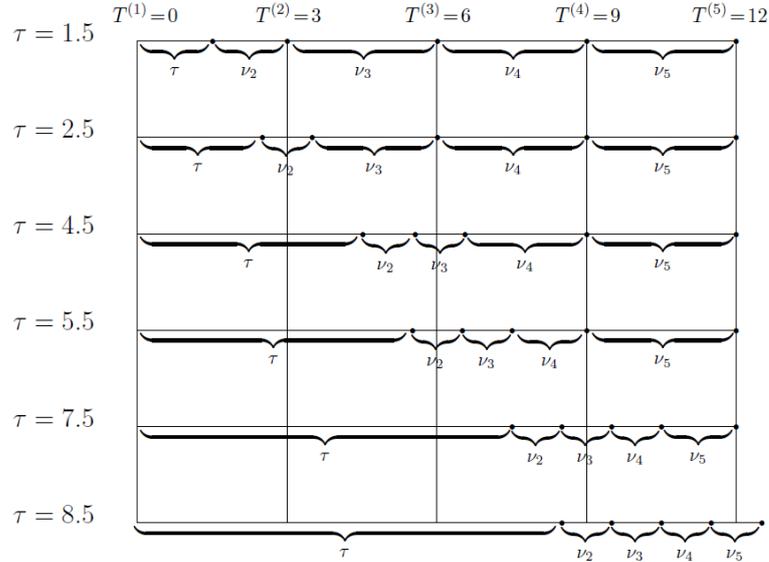


Рисунок 3.8 - Формирование интервалов прибытия при некоторых задержках τ

В дальнейшем рассмотрении будем обозначать символом $R^{(k)}$ - в отличие от $T^{(k)}$ - реальный момент отправления поезда под номером k . Порядок отправления поездов формализуется следующим образом. Пусть $k, 2 \leq k \leq n$, фиксировано.

Если $R^{(k-1)} \leq T^{(k)} - t_0,$ (3.16)

то $R^{(k)} = T^{(k)}.$ (3.17)

Если $R^{(k-1)} \geq T^{(k)} - t_0,$ (3.18)

то $R^{(k)} = R^{(k-1)} + t_0.$ (3.19)

Далее будем использовать следующее обозначение:

$$I(x \in A) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in A, \\ 0, & \text{если } x \in R \setminus A, \end{cases}$$

где A – произвольное множество на числовой прямой R .

Полагаем, что общее число поездов на участке $n \geq 2$, и $\nu_k = 0$, если $k > n$.

Теорема 1.

1. Если $\tau < T_2$, то $\nu_2 = T_2 + t_0 - \tau, \nu_k = T_k + t_0, k = 3, \dots, n$.
2. Пусть k – фиксированное целое, $2 \leq k \leq n$.

Если $\tau \geq \sum_{j=2}^k T_j,$ (3.20)

то $\nu_2 = \dots = \nu_k = t_0.$ (3.21)

$$\text{Если } \sum_{j=2}^k T_j \leq \tau < \sum_{j=2}^{k+1} T_j, \quad (3.22)$$

$$\text{то } v_{k+1} = I(k+1 \leq n) \left[\sum_{j=2}^{k+1} T_j + t_0 - \tau \right], \quad (3.23)$$

$$v_m = I(m \leq n) (T_m + t_0), \quad m = k+2, \dots, n. \quad (3.24)$$

Теорема 2.

Пусть $n \geq 2$. В этом случае справедливы следующие функции распределений для интервалов прибытия первой и последующих пар поездов:

$$W_2(t) = I(t > t_0) P(\tau + t - t_0 > T_2), \quad (3.25)$$

$$W_k(t) = I(t > t_0) \left[P\left(T_k < t - t_0, \tau < \sum_{j=2}^{k-1} T_j\right) + P\left(\tau + t - t_0 > \sum_{j=2}^k T_j, \tau \geq \sum_{j=2}^{k-1} T_j\right) \right], \quad 3 \leq k \leq n \quad (3.26)$$

$$\text{Поскольку } \sum_{j=2}^1 T_j = 0, \quad (3.27)$$

то при $k = 2$ в правой части формулы (3.26) имеем:

$$P\left(T_2 < t - t_0, \tau < \sum_{j=2}^1 T_j\right) = 0,$$

$$P\left(\tau + t - t_0 > \sum_{j=2}^2 T_j, \tau \geq \sum_{j=2}^1 T_j\right) = P(\tau + t - t_0 > T_2).$$

Поэтому при $k = 2$ формула (3.26) совпадает с формулой (3.25).

Следствие 1. Формула (3.26) справедлива при $2 \leq k \leq n$.

Следствие 2. Пусть все $T_j, j = 2, \dots, n$, постоянны и не обязательно равны между собой, $g(x)$ – плотность распределения τ . Тогда справедлива формула:

$$W_k(t) = I(t_0 < t \leq T_k + t_0) \int_{\sum_{j=2}^k T_j - t + t_0}^{\infty} g(x) dx + I(t > T_k + t_0), \quad 2 \leq k \leq n, \quad (3.28)$$

причем, $W_2(t) = I(t > t_0) \int_{T_2 - t + t_0}^{\infty} g(x) dx$.

Следствие 3. Пусть все $T_j, j = 2, \dots, n$, постоянны и равны одному и тому же числу T , Тогда справедлива формула:

$$W_k(t) = I(t_0 < t \leq T + t_0) \int_{(k-1)T - t + t_0}^{\infty} g(x) dx + I(t > T + t_0), \quad 2 \leq k \leq n, \quad (3.29)$$

причем, $W_2(t) = I(t > t_0) \int_{T - t + t_0}^{\infty} g(x) dx. \quad (3.30)$

Следствие 4. Пусть T_k ($k=2, \dots, n$) – независимые величины с одинаковой плотностью $\psi(x)$. Пусть τ имеет плотность $g(x)$ и не зависит от T_k ($k=2, \dots, n$).

Тогда распределение для интервала прибытия первой пары поездов имеет вид:

$$W_2(t) = I(t > t_0) \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{z-t+t_0}^{\infty} g(x) dx \right) \psi(z) dz, \quad (3.31)$$

для последующих интервалов:

$$W_k(t) = I(t > t_0) \left\{ \int_{-\infty}^{t-t_0} \psi(z) dz + \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{t-t_0}^{\infty} \left(\int_{z+u-t+t_0}^{\infty} g(x) dx \right) \psi(z) dz \right] \psi^{*(k-2)}(u) du \right\}. \quad (3.32)$$

где $f^{*2} := f * f$, $f^{*m} := f * f^{*(m-1)}$, $m \geq 2$ - свертка идентичных плотностей.

Так как рассматриваемые случайные величины положительны, то в этих функциях предел интегрирования $(-\infty)$ можно заменить на 0.

Определим 0-кратную свертку как обобщенную функцию со следующим свойством: для любой ограниченной непрерывной функции $v(t)$ выполняется равенство $\int_{-\infty}^{\infty} v(t) \psi^{*0}(t) dt = v(0)$. Тогда формула (3.32) при $k=2$ совпадает с (3.31).

Лемма 1. Для каждого целого фиксированного m , $1 \leq m \leq n-1$,

$$P(N \geq m) = P\left(\tau > \sum_{j=2}^{m+1} T_j \right). \quad (3.33)$$

Приведем два следствия, вытекающие из этой леммы.

Следствие 5. Если $T_j = T$ – постоянная величина, то

$$P(N \geq m) = \int_{mT}^{\infty} g(x) dx.$$

Следствие 6. Если T_2, \dots, T_n – независимые одинаково распределенные случайные величины с плотностью ψ , то

$$P(N \geq m) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_u^{\infty} g(x) dx \right) \psi^{*m}(u) du.$$

Доказательства Теоремы 1, Теоремы 2 и Следствий указанных теорем приведены в нашей публикации [181].

3.4 Распределение интервалов прибытия с учетом реальной статистики

А. Определим вид и параметры распределения интервалов прибытия поездов на станцию B при показательном распределении продолжительности неграфических остановок – наиболее распространенной модели [194].

Лемма 2. Пусть все T_j постоянны и равны некоторому $T > 0$. Если распределение вероятностей первичной задержки экспоненциально,

$$g(x) = I(x > 0) \lambda e^{-\lambda x}, \quad \text{где } \lambda > 0, \quad (3.34)$$

то, учитывая соотношение (3.29) при $k \geq 2$, имеем функцию распределения интервалов прибытия:

$$W_k(t) = I(0 < t - t_0 \leq T) e^{-\lambda((k-1)T - t + t_0)} + I(t - t_0 > T). \quad (3.35)$$

Кроме того, среднее и дисперсия этих интервалов имеют вид:

$$E v_k = t_0 + T - \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda(k-2)T} (1 - e^{-\lambda T}), \quad (3.36)$$

$$D v_k = \frac{1}{\lambda^2} e^{-\lambda(k-2)T} \left[2(1 - e^{-\lambda T}) - e^{-\lambda(k-2)T} (1 - e^{-\lambda T})^2 - 2\lambda T e^{-\lambda T} \right]. \quad (3.37)$$

Доказательство Леммы 2 приведено в публикации [181].

На рисунке 3.9 изображены графики функций распределения выходных интервалов $W_k(t)$ для тройки поездов при экспоненциальной первичной задержке.

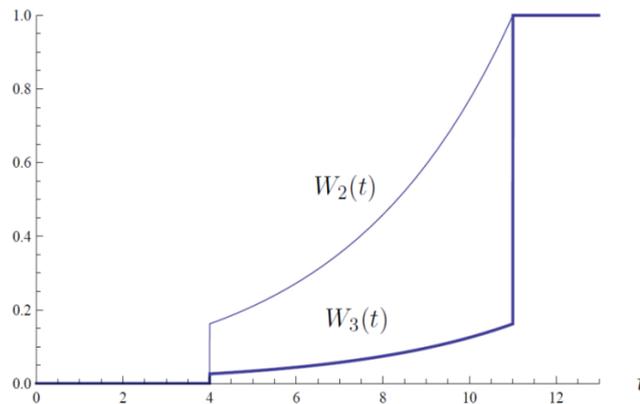


Рисунок 3.9 - Функции распределения интервалов прибытия поездов

Принятые параметры соответствуют реальному грузовому движению по магистральной железной дороге (Транссибе) [205]. Показатель рассеяния первичной задержки получен из анализа характеристик выполненного движения (см. п. 3.8):

$$\lambda = 0,261/\text{мин}, \quad t_0 = 4 \text{ мин}, \quad T = 7 \text{ мин} \quad (3.38)$$

Легко видеть, что чем больше номер задержки k , тем функция распределения интервалов прибытия $W_k(t)$ ближе к $W(t) := I(t > t_0 + T)$. Это согласуется с формулами (3.36) и (3.37), в силу которых $E\nu_k \rightarrow t_0 + T$, $D\nu_k \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$.

Если задана вероятность p того, что произойдет не менее m вторичных задержек, а τ распределена с плотностью (3.34), то, согласно Следствию 5, выполняется следующее условие для параметра T :

$$T \geq \frac{1}{m\lambda} \ln \frac{1}{p} \quad (3.39)$$

Обозначим через $T(m, p, \lambda)$ минимальный интервал T , удовлетворяющий неравенству (3.39). На рисунке 3.10 показано изменение минимального интервала в зависимости от числа допускаемых вторичных задержек m при различных вероятностях: $p = 0.1$ и $p = 0.05$. Ясно, что с уменьшением p величина $T(m, p, \lambda)$ растет. Это подтверждает очевидное соображение: если мы хотим уменьшить влияние вторичных задержек, необходимо увеличить интервал отправления.

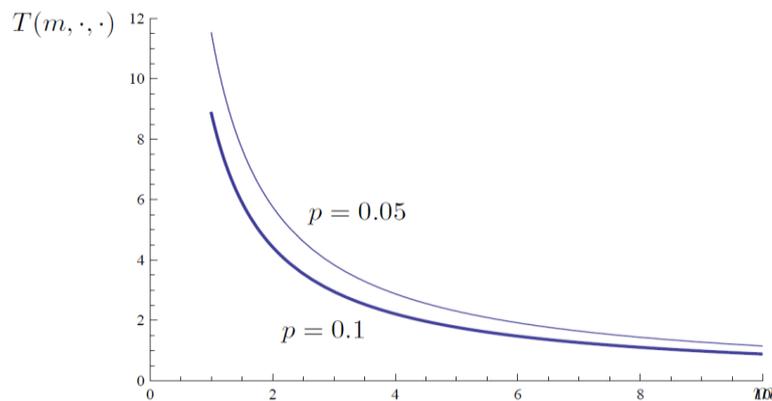


Рисунок 3.10 - Минимальный интервал при разном числе допускаемых вторичных задержек и различной вероятности их возникновения

Точные вычисления интервала производятся по формуле

$$T(m, p, \lambda) = \frac{1}{m\lambda} \ln \frac{1}{p}. \quad (3.40)$$

Теперь фиксируем $p = 0.1$. На рисунке 3.11 изображено поведение $T(m, p, \lambda)$ при $\lambda = 0.26$ и $\lambda = 0.15$. Поскольку справедливо: $E\tau = 1/\lambda$, - то снижение λ ведет к увеличению среднего значения первичной задержки.

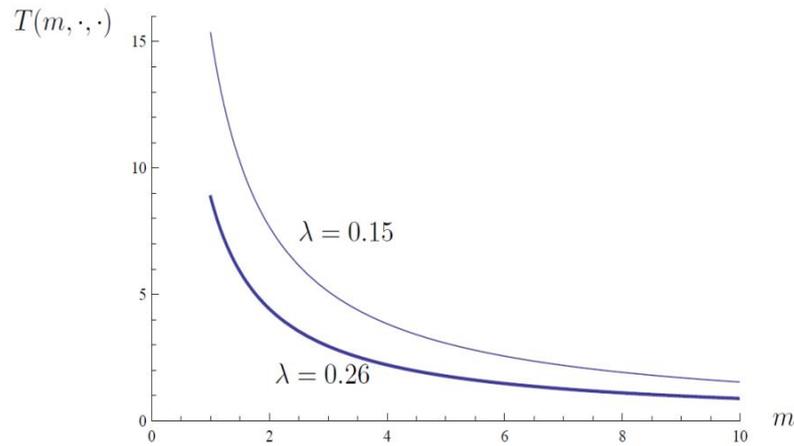


Рисунок 3.11 - Минимальный интервал при разном числе задержек и различных значениях параметра исходного распределения

Б. В качестве примера рассчитаем величину минимального графического интервала T_{omn} отправления поездов со станции A , при соблюдении которого вероятность $P(M^{stop} \geq k)$ реализации вторичных остановок числом M^{stop} не превышает $\alpha = 10$ проц. При этом положим, что параметр первичной задержки $\lambda = 0,261/мин$ и СКО рассеяния моментов отправления поездов составляет 0,5 мин. (что справедливо в условиях соблюдения дисциплины отправления поездов).

Предположим, продолжительность неграфической остановки τ_1 описывается распределением $g(\tau_1)$. Число вторичных задержек M_{cp}^{stop} по группе поездов зависит от продолжительности, вида распределения первичных остановок и среднего интервала отправления T_{omn} . Положим, что интервал T_{omn} есть сумма случайной величины T и фиксированного безопасного интервала t_0 : $T_{omn} = T + t_0$. Рассматривая траектории движения поездов как геометрические элементы, получаем:

$$M^{stop} = k \Leftrightarrow kT < \tau_1 < (k+1)T, \quad 1 \leq k \leq n-2,$$

где n – число поездов. Отсюда следует, что критерием возникновения не менее k задержек при сближении поездов на расстояние S_0 служит неравенство: $\tau_1 > kT$.

В этом случае:

$$P(M^{stop} \geq k) = P(\tau_1 > kT) = \int_{kT}^{\infty} g(\tau_{nep}) dt, \quad 1 \leq k \leq n-1 \quad (3.41)$$

Символом x_q обозначим квантиль распределения случайной величины τ_1 порядка q . Тогда $x_{1-\alpha}$ является решением уравнения $\alpha = \int_x^\infty g(\tau_{nep}) dt$ относительно величины x .

Приравнивая kT и $x_{1-\alpha}$, получаем решение задачи в следующем виде:

$$T = \frac{x_{1-\alpha}}{k} \quad (3.42)$$

Интервал T_{omn}^{ep} , при котором вероятность возникновения не менее k вторичных остановок не превышает уровня α , оценивается значением $(T + t_0)$. К примеру, при показательном распределении первичной задержки величина в числителе (3.42) равна: $x_{1-\alpha} = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{\alpha}$. При условии, что $\alpha = 0,1$, получаем $x_{0,9} = 1,86$.

С учетом того, что в потоке грузовых поездов безопасный интервал равен 4 мин. и допускаемое число вторичных задержек $k=3$, делаем заключение, что интервал отправления поездов с исходной станции должен составить не менее 7 мин.

Оценки межпоездного интервала для другого числа допускаемых вторичных задержек получаются, если использовать графики рисунков 3.10 и 3.11. Так, например, для двух задержек добавочный (к значению T) интервал равен 4,5 мин. Общая продолжительность интервала отправления при этом составляет 8,5 мин. Если же предъявить более жесткое требование, назначив число вторичных остановок $M^{втор}$ равным 1, то межпоездной интервал, рассчитанный по нашей методике, необходимо увеличить до 13 мин.

Следует отметить, что интервал пакетного движения тяжеловесных грузовых поездов на дорогах России лежит в диапазоне от 10 до 14 мин. Решение установить такой период грузового графика движения принято эмпирически, на основе предшествующего опыта - в стремлении обеспечения малого количества неплановых задержек поездов в пути следования.

Полученное значение межпоездного интервала T_{omn}^{ep} можно рассматривать как границу, которая разделяет периоды экономичного и интенсивного пропуска грузовых поездов по участку. Эти периоды назначаются диспетчером на основе

анализа прогнозной информации о количестве поездов, которые планируется отправить на участок в каждый предстоящий час.

Расчетные показатели рассеяния интервалов прибытия поездов на конечную станцию загруженного участка определяются на основе соотношений, полученных выше. Так, например, значения средних, дисперсий и СКО для второго и третьего интервалов прибытия, рассчитанные с помощью (3.36) и (3.37), составляют:

$$\begin{aligned} E v_2 &= 7.77702, & D v_2 &= 5.68009, & \sqrt{D v_2} &= 2.38329, \\ E v_3 &= 10.4778, & D v_3 &= 2.33068, & \sqrt{D v_3} &= 1.52666. \end{aligned}$$

Полученные значения подтверждают, что зона рассеяния при прибытии сужается для ниток поездов, все более отстоящих от первичного конфликта. Расчетная величина интервала прибытия при периодичности грузового графика, равной 7 мин. (ситуация насыщения), превышает 10,5 мин., что хорошо согласуется со статистикой реального движения на РЖД.

3.5 Уточненная модель формирования интервалов прибытия поездов

Изучение реальной статистики показывает, что при возобновлении движения после неплановых остановок распределение межпоездных интервалов удовлетворительно описывается гауссовским законом. Исследуем новую версию модели формирования отклонений [213], в которой принимается экспоненциальное распределение первичной остановки и нормальное - межпоездного интервала:

$$g(x) = I(x > 0) \lambda e^{-\lambda x}, \quad \psi(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-T)^2}{2\sigma^2}} \equiv \varphi(x, T, \sigma^2), \quad (3.43)$$

где λ , T и σ^2 – некоторые положительные параметры.

Функция нормально распределенной случайной величины Y имеет вид:

$$P(Y < x) = \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt.$$

Заметим, что поскольку случайные интервалы T_j не могут быть отрицательными, то, строго говоря, предположение о виде плотности ψ в (3.43) некорректно. Однако, за счет выбора параметра σ (при известном T) можно добиться

того, чтобы вероятность события $\{T_j < 0\}$ оказалась близкой к нулю.

$$\text{Будем полагать, что} \quad 4\sigma + \lambda\sigma^2 < T. \quad (3.44)$$

Из (3.44) вытекает, в частности, что $T/\sigma > 4$. Тогда

$$P(T_j < 0) = P(\sigma Y + T < 0) < P(Y < -4) < 0.000032.$$

Отметим, что выбор плотности ψ , определенной в (3.43), обусловлен, в частности, свойством: для любого целого $m \geq 1$ справедливо равенство

$$\psi^{*m}(x) = \varphi(x, mT, m\sigma^2). \quad (3.45)$$

Также, при $3 \leq k \leq n$, обозначим:

$$a = (k-2)T, \quad b^2 = (k-2)\sigma^2, \quad \bar{\xi} = a - \lambda b^2.$$

Лемма 3. Предположим, что T_j – независимые одинаково распределенные случайные величины. Если плотности g и ψ определены (3.43), то функции распределения первого и последующих интервалов записываются в виде:

$$W_2(t) = I(t > t_0) \left[\Phi\left(\frac{t-t_0-T}{\sigma}\right) + e^{-\lambda\left(T-\frac{\lambda\sigma^2}{2}-t+t_0\right)} \left(1 - \Phi\left(\frac{t-t_0-T+\lambda\sigma^2}{\sigma}\right)\right) \right], \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} W_k(t) = I(t > t_0) & \left\{ \Phi\left(\frac{t-t_0-T}{\sigma}\right) + \exp\left\{-\lambda\left[(k-1)\left(T-\frac{\lambda\sigma^2}{2}\right)-t+t_0\right]\right\} \times \right. \\ & \times \left[\left(1 - \Phi\left(\frac{t-t_0-T+\lambda\sigma^2}{\sigma}\right)\right) \Phi\left(\frac{\bar{\xi}}{b}\right) + \int_{-\infty}^0 \left(1 - \Phi\left(\frac{t-t_0-T+\lambda\sigma^2-u}{\sigma}\right)\right) \varphi(u, \bar{\xi}, b^2) du \right] + \\ & \left. + \int_{-\infty}^0 \left(\Phi\left(\frac{t-t_0-T-u}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{t-t_0-T}{\sigma}\right) \right) \varphi(u, a, b^2) du \right\}, \quad k \geq 3. \end{aligned} \quad (3.47)$$

Доказательство Леммы 3 приведено в нашей публикации [181].

На рисунке 3.12 изображены графики функций $W_k(t)$ при $k=2, 3$ с типовыми

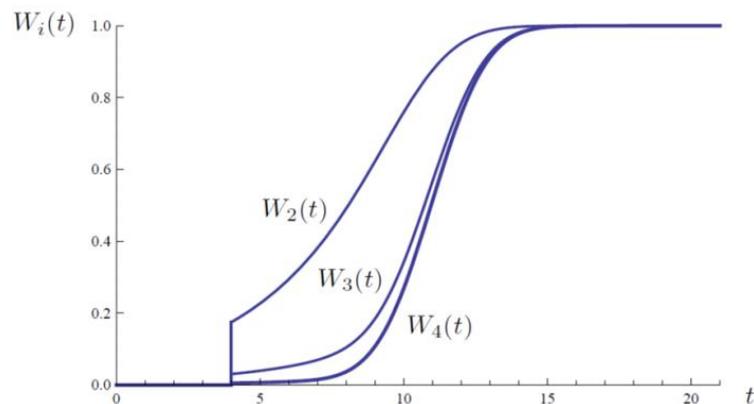


Рисунок 3.12 - Графики функций $W_k(t)$ при величине $\sigma = 0.5$

параметрами, характерными для грузового движения, и $\sigma = 0.5$ мин. Рассмотрение кривых распределения выходных интервалов показывает, что с увеличением номера задержанного поезда форма распределения приближается к единичному скачку. Это свидетельствует о тенденции к сокращению вторичного опоздания и, в дальнейшем, к его полному исчезновению.

Рассмотрим, как ведут себя функции $W_k(t)$ при изменении дисперсии. Для примера возьмем $k = 2$; параметры λ и T определены (3.38). На рисунке 3.13 показаны графики $W_2(t)$ для случаев, когда $\sigma = 0.5$ и $\sigma = 5$. Как можно было ожидать, при уменьшении σ график $W_2(t)$ для $t > t_0$ становится более крутым.

При увеличении λ функции $W_2(t)$ и $W_k(t)$ все более стремятся к единичному скачку, что подтверждает быстрое затухания процесса размножения.

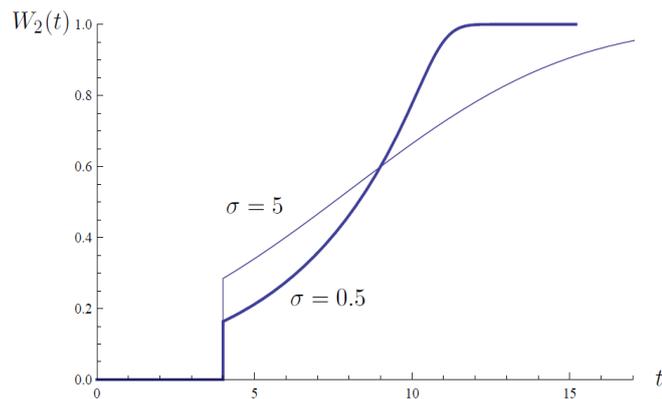


Рисунок 3.13 - Графики функции $W_2(t)$ при $\sigma = 0.5$ и $\sigma = 5$

Пусть плотности g и ψ определены равенствами (3.43). Положим, p – максимальная допустимая вероятность того, что произойдет не менее m вторичных задержек. Какими должны быть параметры T и σ^2 , чтобы выполнялось неравенство $P(N \geq m) \leq p$? Из следствия 6 теоремы 2 вытекает:

$$P(N \geq m) = \int_{-\infty}^0 \varphi(u, a, b^2) du + \int_0^{\infty} e^{-\lambda u} \varphi(u, a, b^2) du, \quad (3.48)$$

где $a = mT$, $b^2 = m\sigma^2$. Можно показать, что

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda u} \varphi(u, a, b^2) du = e^{-m\lambda(T - \lambda\sigma^2/2)} \Phi\left(\sqrt{m} \frac{T - \lambda\sigma^2}{\sigma}\right).$$

Выбирая параметры T и σ^2 так, чтобы первый интеграл в (3.48) был достаточно мал, имеем условие по этим параметрам в виде неравенства:

Допустим, поезд задержался по отправлению с исходной станции. Чтобы ликвидировать опоздание, на первой части участка машинист использует ускоренный режим. В реальных условиях, когда поезд подвергается случайным воздействиям, реакция машиниста достаточно неопределенна. Как результат, фактическая траектория поезда располагается в границах некоторой зоны рассеяния (что отражается «веером» линий хода). В случае, если машинист обнаруживает, что график восстановлен в результате использования «нагона», он меняет режим - замедляет движение. При этом ширина распределения моментов прибытия стабилизируется.

Определим, каким будет распределение моментов прибытия $F^B(t)$ в пункт $P(s_2)$ (рисунок 3.15) при наличии регулятора (машиниста) [200]. Положим, заданы ограничения времени хода по перегону максимальным (t_{\max}^{AB}) и минимальным (t_{\min}^{AB}) значениями, что отражено линиями, обозначенными соответственно v_1 и v_2 . Эти линии ограничивают сектор, в который попадают траектории возможного движения поезда при воздействии случайных факторов. Фигурной скобкой на графике отмечена проекция максимально возможного носителя плотности $f(t; s_2)$.

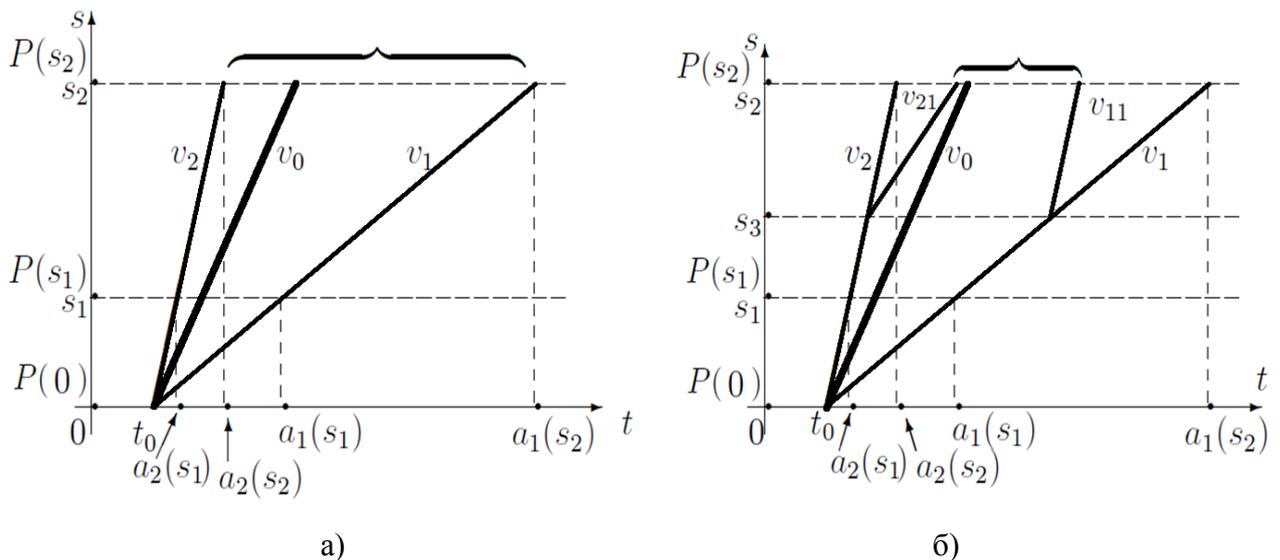


Рисунок 3.15 - Модель движения поезда с учетом рассеяния скорости
а) при отсутствии оперативной подстройки; б) при наличии подстройки

Момент прибытия поезда в произвольную точку пути s равен:

$$a_j(s) = t_0 + \frac{s}{v_j}. \quad (3.50)$$

Случайная величина $Y(s) = \tau(s) - a_0(s)$ представляет собой отклонение момента $\tau(s)$ прибытия поезда в указанную точку от графикового $a_0(s)$. Через $f(t; s)$ обозначим плотность распределения моментов прибытия в точку s , а через $g(t; s)$ – плотность распределения отклонений $Y(s)$. Очевидно,

$$g(t; s) = f(t + a_0(s); s). \quad (3.51)$$

Заметим, что носители функций $f(t; s_1)$ и $f(t; s_2)$ не выходят за пределы промежутков $[a_2(s_1), a_1(s_1)]$ и $[a_2(s_2), a_1(s_2)]$ соответственно.

Учитывая ограничения по скорости, приводящие к линейным границам для функции $s(t)$, находим, что каждому $t \in [a_2(s_1), a_1(s_1)]$ соответствует $t' \in [a_2(s_2), a_1(s_2)]$ по формуле

$$t' = A(s_2)t + B(s_2), \quad (3.52)$$

$$\text{где } A(s) = \frac{a_1(s) - a_2(s)}{a_1(s_1) - a_2(s_1)}, \quad B(s) = \frac{a_2(s)a_1(s_1) - a_2(s_1)a_1(s)}{a_1(s_1) - a_2(s_1)}, \quad s_1 \leq s \leq s_2.$$

Заметим также, что при увеличении s длина промежутка $[a_2(s), a_1(s)]$ растет, если условие на граничные скорости не меняется, т.е. если отсутствует регулировка. В этом случае ширина рассматриваемого распределения увеличивается (рисунок 3.15а). Корректировка скорости, производимая машинистом, предотвращает «расползание» распределения (рисунок 3.15б), что, в свою очередь, приводит к меньшему риску отклонения от графика. Вместо фразы «случайные величины W_1 и W_2 одинаково распределены» будем писать $W_1 \stackrel{d}{=} W_2$.

Предположим, что на протяжении пути от s_1 до s отсутствовала корректировка с учетом условия на граничные скорости; тогда

$$\tau(s) \stackrel{d}{=} A(s)\tau(s_1) + B(s), \quad s_1 < s \leq s_2, \quad (3.53)$$

где $A(s)$ и $B(s)$ – функции, определенные в (3.52), причем $A(s) \neq 0$. А это в свою очередь означает, что $Y(s) \stackrel{d}{=} A(s)(Y(s_1) + a_0(s_1)) + B(s)$.

Заметим, что если $f(t)$ – плотность распределения случайной величины X , $A \neq 0$ и B – постоянные, то $\frac{1}{|A|} f\left(\frac{t-B}{A}\right)$ есть плотность распределения случайной величины $AX + B$. Из этого замечания, сделанного предположения и равенства (3.51) выводим, что при $s_1 \leq s \leq s_2$

$$f(t; s) = \frac{1}{|A(s)|} f\left(\frac{t-B(s)}{A(s)}; s_1\right), \quad (3.54)$$

$$g(t; s) = f(t + a_0(s); s) = \frac{1}{|A(s)|} f\left(\frac{t + a_0(s) - B(s)}{A(s)}; s_1\right) = \\ = \frac{1}{|A(s)|} g\left(\frac{t + a_0(s) - B(s)}{A(s)} - a_0(s_1); s_1\right). \quad (3.55)$$

Отсюда вытекает, что с уменьшением $A(s)$ носитель плотности сужается. Так, если при возможном опоздании в контрольный пункт увеличить минимальную допустимую скорость или при раннем прибытии уменьшить максимальную скорость, то рассеяние моментов прибытия станет более компактным (см. рисунок 3.15б). Носитель распределения случайной $\tau(s_2)$ после изменения граничных скоростей (v_1 на v_{11} , v_2 на v_{21}) сузится по сравнению с $[a_2(s_2), a_1(s_2)]$.

Фактические данные о движении грузовых поездов, полученные на магистральной железнодорожной линии, подтверждают результат теоретического рассмотрения процесса формирования выходного распределения. При анализе данных определено, что время хода по каждому из элементарных участков в пределах перегона рассеяно с относительным СКО, не превышающим 10 проц. В случае, если бы отсутствовало текущее регулирование, носитель плотности моментов прибытия на станцию значительно превысил бы указанную величину.

Реальные данные показывают, что в те периоды, когда отсутствуют серьезные сбои в движении, системе оперативного регулирования удастся компенсировать возмущения, поддерживать (примерно) постоянными вероятностные характеристики движения потока. Так, для потока одноплатных (тяжеловесных) грузовых ширина рассеяния остается практически неизменной при движении поездов по участку магистральной линии протяженностью 102 км. (см. таблицу 3.1).

Таблица 3.1 - Дисперсия моментов прибытия на станции, мин²

№ ст.	2	3	4	5	6	7	8
день	0,36	0,30	0,34	0,31	0,32	0,38	0,39
ночь	7,12	6,88	6,89	6,86	6,94	7,01	6,84

Результаты исследования также показывают: в ночной период интенсивность отклонений возрастает, что связано с увеличением потока, а также с особенностями работы машинистов и станций в темное время суток. Тенденция к стабильности

лизации ширины рассеяния моментов прибытия и в этом случае сохраняется. Описанная закономерность нарушается, когда регулирующее воздействие системы (диспетчера, машинистов) недостаточно эффективно, не в состоянии компенсировать влияние возмущающих факторов (см. результаты, приведенные в п. 3.8).

3.7 Трансформация распределения моментов прибытия при регулировке

Рассеяние случайной величины $Y(s_1)$, характеризующей отклонения времени прибытия, имеет несимметричный характер. Хорошая аппроксимация этой величины дается гамма-распределением [16]:

$$g(t; s_1) \approx \psi_0(t; \alpha, \beta) = I(t > 0)t^{\alpha-1}e^{-t/\beta} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}, \quad (3.56)$$

где $\alpha > 0$, $\beta > 0$ – параметры, $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция Эйлера. Соответствующая случайная величина Z имеет математическое ожидание $EZ = \alpha\beta$ и дисперсию $DZ = \alpha\beta^2$. Мода этого распределения равна $m = (\alpha - 1)\beta$.

Заметим, что в (3.56) точное равенство для всех t выполняться не может, так как вне промежутка $[a_2(s_1) - a_0(s_1), a_1(s_1) - a_0(s_1)]$ имеем $g(t; s_1) = 0$ - в отличие от $\psi_0(t; \alpha, \beta)$. Такой характер распределения весьма часто встречается на практике. Поэтому ради более точной аппроксимации вместо гамма-распределения будем рассматривать его усечение, определяемое ниже.

Анализ проведему с использованием статистических данных, полученных на участке Октябрьской железной дороги с интенсивным пригородным движением [200]. Исследовано движение поездов в утренний пиковый период – с 6 до 10 ч. В качестве примера, проанализированы данные для участка, ограниченного станциями $P(s_1)$ и $P(s_2)$ с координатами соответственно 115 км и 167 км. Для указанных пунктов имеются реализации объемом $n = 50$ случайных величин $Y(s_1)$ и $Y(s_2)$. Значения скорости, согласно графику, составляют:

$$v_0 = 75 \text{ км/ч}, \quad v_1 = 60 \text{ км/ч}, \quad v_2 = 90 \text{ км/ч}. \quad (3.57)$$

Расчетные моменты прибытия в точки s_1 и s_2 (в часах) равны:

$$\begin{aligned} a_0(s_1) &= 1.53, \quad a_1(s_1) = 1.92, \quad a_2(s_1) = 1.28, \\ a_0(s_2) &= 2.23, \quad a_1(s_2) = 2.78, \quad a_2(s_2) = 1.86. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что носители плотностей $g(t; s_1)$ и $g(t; s_2)$ входят в отрезки $[-0.26, 0.38]$ и $[-0.37, 0.56]$ соответственно (единица – минуты).

Пусть H_0 – гипотеза, состоящая в том, что случайная величина $Y(s_1)$ распределена с плотностью

$$g(t; s_1) = I(t \in [l, r])J(l, r)\psi_0(t - b; \alpha, \beta), \quad (3.58)$$

где $J(l, r) = \left(\int_l^r \psi_0(t - b; \alpha, \beta) dt\right)^{-1}$,

$b \in \mathbb{R}$ и $l < r$ – некоторые параметры, определяемые по опытным данным.

Функция, стоящая в правой части равенства (3.58), представляет собой «срезку» плотности $\psi_0(t - b; \alpha, \beta)$ на отрезок $[l, r]$. Проверим гипотезу H_0 с двумя уровнями значимости $\alpha_1 = 0.10$ и $\alpha_2 = 0.05$, используя критерий Колмогорова. Вариационный ряд, соответствующий исходной выборке, представлен в таблице 3.2, где x_j^* – отклонения, n_j и w_j – наблюдаемые их числа и частоты. Здесь и далее будем указывать временные величины в минутах.

Таблица 3.2 - Выборка значений отклонения от графика (мин.)

j	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
x_j^*	-1	0	1	2	3	4	5	6	
n_j	2	16	14	8	4	2	2	2	50
w_j	0.04	0.32	0.28	0.16	0.08	0.04	0.04	0.04	1

По данным таблицы 3.2 определяем выборочные величины: среднее $\bar{x} = 1.4$ и дисперсию $s_0^2 = 2.86$. Полагая $b = -0.8$, из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \bar{x} = \alpha\beta + b, \\ s_0^2 = \alpha\beta^2 \end{cases}$$

находим параметры распределения:

$$\alpha = 1.69, \quad \beta = 1.3. \quad (3.59)$$

Анализируя данные, можно выдвинуть статистическую гипотезу: выборка взята из распределения с плотностью (3.58). Отрезок, на котором осуществлена «срезка» плотности, определен основанием гистограммы, равен $[-1.44, 6.48]$.

Критерий Колмогорова опирается на статистику $D_n = \sup_t |G_n^*(t; s_1) - G(t; s_1)|$, где $G_n^*(t; s_1)$ и $G(t; s_1)$ – эмпирическая и гипотетическая функции распределения

величины $Y(s_1)$ (их графики изображены на рисунке 3.16б). Вычисления показывают, что $D_n = 0.160$ меньше критических значений $\lambda_n(0.1) = 0.173$ и $\lambda_n(0.05) = 0.192$. Следовательно, гипотеза H_0 согласуется с опытными данными по критерию Колмогорова.

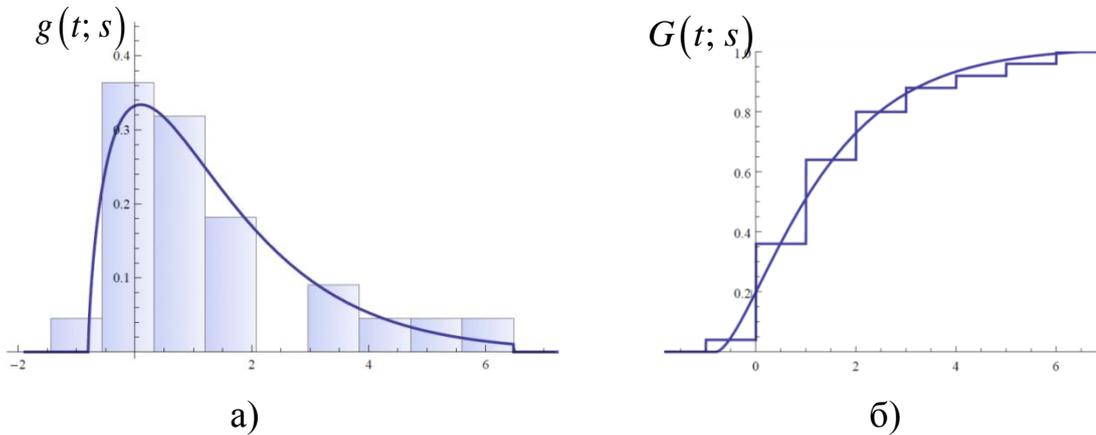


Рисунок 3.16 - Графики функций плотности $g(t; s_1)$ и распределения $G(t; s_1)$

Чтобы подтвердить предположение о том, что оперативное регулирование не изменяет характер распределения, проанализируем случайную величину $Y(s_2)$ - время прибытия на конечную станцию участка. Подтвердим следующую гипотезу H_1 : случайная величина $Y(s_2)$ распределена с плотностью, соответствующей усеченному гамма-распределению, т.е.

$$g(t; s_2) = I(t \in [l, r])J(l, r)\psi_0(t - b; \alpha, \beta). \quad (3.60)$$

Строим вариационный ряд, соответствующий исходной выборке, определяем выборочные величины – среднее $\bar{x} = 1.3$ и дисперсию $s_0^2 = 11.03$. Полагая $b = -3.8$, находим параметры распределения (3.60)

$$\alpha = 2.36, \quad \beta = 2.16. \quad (3.61)$$

Расчетное значение статистики $D_n = 0.161$ меньше критического значения $\lambda_n(0.1) = 0.17$. Следовательно, гипотеза H_1 согласуется с опытными данными.

На рисунке 3.17а изображены гистограмма, построенная по выборке практически реализованных значений величины $Y(s_2)$, и графики функций $g(t; s_2)$ и $\tilde{g}(t; s_2)$ с параметрами α, β (3.61). Отрезок $[l, r]$, характеризующий усечение характеристики рассеяния, имеет границы $[-3.75, 12.75]$. Сравнение графиков, приве-

денных на рисунках 3.16а и 3.17а, позволяет заключить, что, по мере удаления от начального пункта $P(0)$, наблюдается расширение носителя плотности.

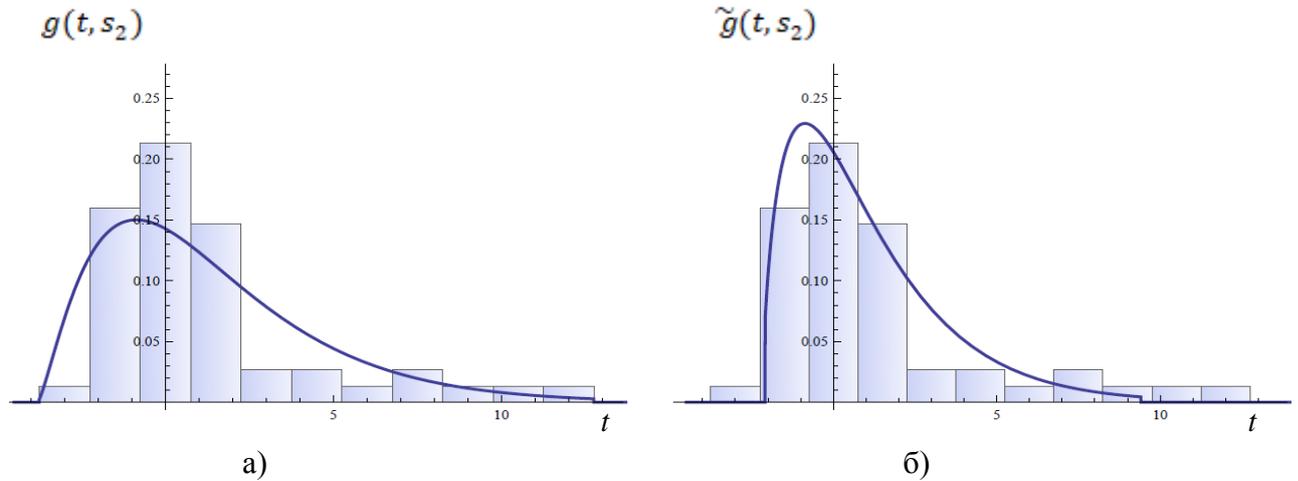


Рисунок 3.17 - Гистограмма моментов прибытия в пункт $P(s_2)$ и функции плотности $g(t; s_2)$ (а), $\tilde{g}(t; s_2)$ (б)

Теперь проверим, сохраняется ли характер распределения моментов в конечном пункте $P(s_2)$ вследствие применения линейного преобразования с помощью соотношения (3.56). Полагаем, что в сечении $P(s_1)$ присутствует усеченное гамма-распределение. Выдвинем статистическую гипотезу \tilde{H}_1 о том, что вновь рассчитанная величина $Y(s_2)$ распределена по усеченному гамма-закону. С учетом (3.52), запишем плотность для этой величины:

$$\begin{aligned} \tilde{g}(t; s_2) &\equiv \frac{1}{|A(s_2)|} g\left(\frac{t + a_0(s_2) - B(s_2)}{A(s_2)} - a_0(s_1); s_1\right) = \\ &= \frac{1}{|A(s_2)|} I(y \in [l, r]) J(l, r) \psi_0(y - b; \alpha, \beta) \Big|_{y = \frac{t + a_0(s_2) - B(s_2)}{A(s_2)} - a_0(s_1)}. \end{aligned} \quad (3.62)$$

Справедливость второго равенства в выражении (3.62) следует из того, что при проверке гипотезы H_0 было показано: случайная величина $Y(s_1)$ подчиняется усеченному гамма-закону.

Расчет произведен для рассеяния с прежними параметрами α, β из (3.61) и значением $b = -1.5$. В результате расчета определено, что значение статистики $\tilde{D}_n = 0.1614$ меньше критической границы $\lambda_n(0.1) = 0.17$. Следовательно, гипотеза \tilde{H}_1 , как и H_1 , согласуется с опытными данными по критерию Колмогорова.

Случайная величина $Y(s_2)$, смоделированная с использованием линейного преобразования, распределена по усеченному гамма-закону. График соответствую-

ющей плотности $\tilde{g}(t; s_2)$ показан на рисунке 3.17б. Значения коэффициентов трансформации исходного рассеяния $Y(s_1)$ в величину $Y(s_2)$, полученные с учетом соотношения (3.52), равны: $A(s_2) = 1.45$, $B(s_2) = 0$. Носителем распределения является отрезок $[-2.09, 9.41]$. Соответствующий интервал, определенный выше при анализе распределения $Y(s_1)$, лежит в границах $[-1.44, 6.48]$. Сравнение этих величин подтверждает, что по мере удаления от начального пункта $P(0)$ наблюдается усиление рассеяния моментов прибытия.

Несмотря на то, что, согласно расчетам, обе гипотезы H_1 и \tilde{H}_1 признаны не противоречащими экспериментальным данным, плотность (3.62) более пригодна с практической точки зрения. С ее помощью возможно прогнозирование распределения отклонений прибытия на последующую станцию. Входными данными для такого прогноза служат предельные значения скорости движения по перегону и характеристика распределения на предшествующей станции $P(s_1)$. В отличие от этого, использование плотности (3.60) не учитывает этих данных и требует знания носителя $[l, r]$ в пункте $P(s_2)$.

Кроме того, использование плотности (3.62) не позволяет распределению «расползтись», отсекает области распределения, соответствующие маловероятным событиям. Это дает возможность получить более реалистичный прогноз моментов прибытия поездов в типичные (слабовозмущенные) периоды времени.

3.8 Статистические характеристики движения поездов по участкам

А. Экспериментальные исследования характеристик реального движения проведены с использованием информации, сохраняемой в базах данных системы ГИД «Урал-ВНИИЖТ» и накопителей бортовой локомотивной системы МСУД. Исследовались рассеяния времен хода и опозданий при движении пассажирских и грузовых поездов в плотном потоке. Кроме того, изучались статистические характеристики неграфиковых задержек в пути следования [207].

Наблюдения, в которых фиксировалась информация о внутрисуточных вариациях показателей движения грузовых поездов, проведены на четырех участках

Транссибирской железнодорожной магистрали (Восточный и Уральский полигоны). Изучались характеристики движения по главному электрифицированному ходу. Исследованная линия характеризуется интенсивным грузо-пассажирским движением со стабильной направленностью потоков грузовых поездов. Основную часть четного грузового потока составляют тяжеловесные поезда массой 6300 т. По магистрали также курсируют сборные поезда и контейнерные маршруты.

Характеристика неграфиковых остановок грузовых поездов получена путем обработки наблюдений на участке Х–Б Дальневосточной железной дороги протяженностью 210 км [47]. На участке имеется узкое место длиной 19 км. (перегоны 9-10). Регулярно возникающие кратковременные неграфиковые остановки вызваны затруднением с обработкой грузовых поездов на технической станции. Получены 52 выборочных значения случайной величины $g(\tau_i)$ – продолжительности первичной остановки. С помощью критерия Пирсона проверена гипотеза о том, что распределение является показательным с параметром $\lambda = 0.26 \frac{1}{\text{мин.}}$. На рисунке

3.18 приведены гистограмма и график гипотетической функции плотности.

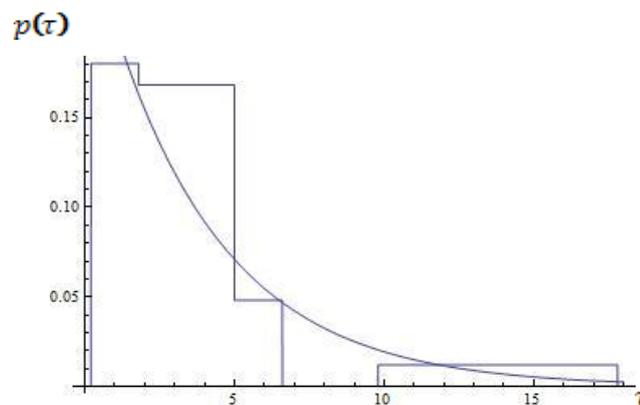


Рисунок 3.18 - Гистограмма и график гипотетической функции плотности

Определено, что гипотеза о показательном характере плотности согласуется с экспериментальными данными с уровнем значимости 0.05. Более точно, значение статистики хи-квадрат равно 8,89; при этом критическое значение критерия, найденное с помощью распределения с четырьмя степенями свободы, равно 9.49. Полученный результат подтверждает выводы об экспоненциальном характере распределения задержек, полученные в ряде предшествующих работ [180, 297].

Б. Проанализированы характеристики пунктуальности на участке двухпутной магистральной железнодорожной линии с интенсивным грузовым движением протяженностью 95 км. На участке имеется 8 станций. На граничных станциях производится техническое обслуживание поездов. В четном (восточном) направлении движутся поезда с нормативной массой 6300 т.

Результаты исследования показывают, что средние значения времени хода по перегонам практически не изменяются в разное время суток (см. Таблицу 3.3). Однако дисперсия значительно отличается днем и ночью (Таблица 3.4).

Таблица 3.3 - Математическое ожидание времени хода по перегонам, мин

	2	3	4	5	6	7	8
день	10,8	11,6	7,3	19,6	17,0	23,4	21,6
ночь	13,0	12,5	7,8	19,5	18,4	23,4	21,9

Таблица 3.4 - Дисперсия времени хода по перегонам участка, мин²

	2	3	4	5	6	7	8
день	8,23	5,70	0,46	3,34	3,76	11,46	23,02
ночь	26,9	4,76	1,11	4,68	9,32	5,50	7,69

В дневное время, когда возрастает интенсивность потока и появляются ремонтные перерывы, рассеяние ходового времени увеличивается по мере следования поездов по маршруту. Это соответствует модели движения поездов для ситуации, когда локальное регулирование не эффективно.

Опытные данные, которые характеризуют распределение моментов прибытия поездов, показывают, что вероятность их опозданий существенно превышает вероятность раннего прибытия. Это касается всех категорий поездов: пассажирских, пригородных и грузовых. При этом плотность распределения приобретает асимметричную форму. Несимметричное распределение целесообразно приближать функцией Вейбулла или гамма-распределением [203]. Выбор распределения второго вида более предпочтителен, так как позволяет уменьшить объем расчетов.

На рисунке 3.19 показана динамика изменения СКО моментов прибытия при движении грузовых поездов. Значительный разброс в ночное время обусловлен двумя факторами: более плотным потоком и плохими условиями видимости.

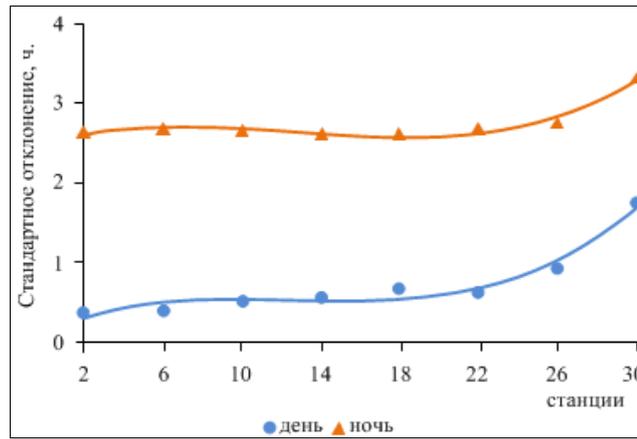


Рисунок 3.19 - Изменение СКО моментов прибытия грузовых поездов при движении по маршруту

Последнее обстоятельство оказывает неодинаковое (непредсказуемое) влияние на работу разных машинистов, что приводит к рассеянию времени прибытия.

На рисунке 3.20 приведен график изменения СКО при движении четных контейнерных поездов по трансконтинентальному маршруту Москва-Находка. Ширина рассеяния моментов прибытия на конечную станцию маршрута достигает 30 ч. В то же время, средняя величина опоздания не превышает двух часов. Этим также подтверждается, что диспетчеры в состоянии контролировать только детерминированную компоненту (временной тренд) движения поездов.

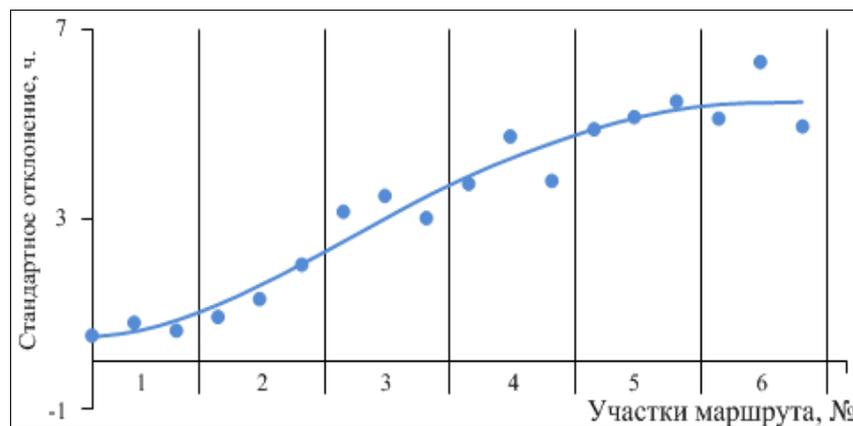


Рисунок 3.20 - Изменение СКО моментов прибытия контейнерных поездов

Основную часть действий, направленных на уменьшение опоздания, персонал производит в период нахождения поезда на технической станции. Опоздание компенсируется путем сокращения времени обработки (см. рисунок 3.21). На графике приведены отклонения операционных времен – времен хода и остановок –

от нормативных значений. На станциях отклонения отрицательны, что соответствует сокращению среднего времени простоя поездов.

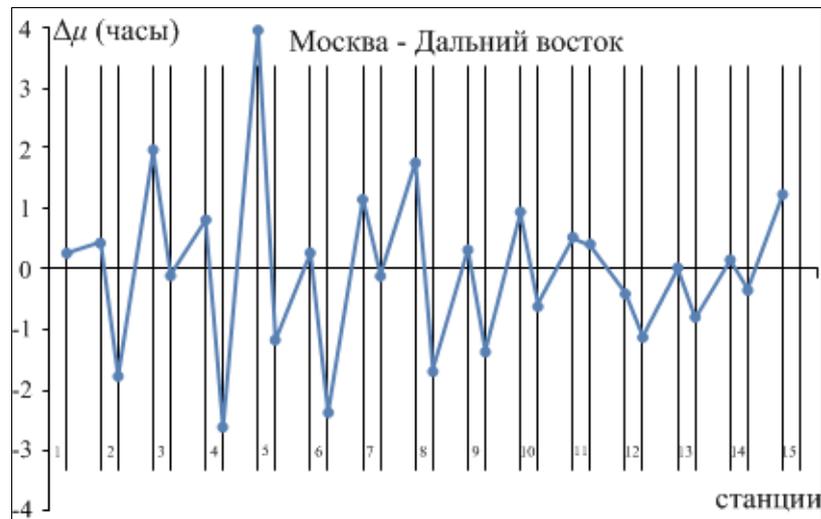


Рисунок 3.21 – Динамика отклонений при следовании контейнерных поездов

В. При изучении пассажирского сегмента рассматривался участок двухпутной железнодорожной линии с интенсивным пригородным движением в зоне Московского мегаполиса. Протяженность исследованной радиальной линии составляет 110 км., на участке имеется 13 станций. На конечных станциях реализуется оборот поездов. По участку курсируют электропоезда, имеющие максимальную скорость 120 км/ч. Согласно графику движения, в пиковые часы интенсивность движения достигает 10 поездов в час (в каждом направлении).

Анализ статистических данных [38, 208] показал, что распределение времени хода на большинстве перегонов наилучшим образом аппроксимируется смещенным распределением Вейбулла с коэффициентом формы $\alpha > 1$. В то же время, на перегонах вблизи станций, расположенных в жилых агломерациях с интенсивным пассажиропотоком (станции 5, 6, 7), более адекватной моделью является смещенное показательное распределение – частный случай распределения Вейбулла с $\alpha = 1$.

Распределения моментов прибытия поездов на большинство станций также достаточно хорошо аппроксимируются распределением Вейбулла с параметром $\alpha > 1$. На ряде станций, где производится массовая посадка/высадка пассажиров, форма распределения моментов прибытия меняется. Анализ показывает, что вре-

мя прибытия на эти станции подчиняется экспоненциальному закону. В утренние пиковые часы (6-10 ч. мск) такими пунктами являются станция 3 (четное направление, движение от мегаполиса) и станция 5 (нечетное направление). В период вечернего пика (17-20 ч. мск) максимум процесса пассажирообмена смещается на станцию 7 (четное, нечетное направления) и станцию 9 (нечетное направление).

Интенсивность процесса посадки/высадки влияет на параметры распределений моментов прибытия. В утренние пиковые часы при приближении к центру мегаполиса возрастает интенсивность высадки пассажиров. Это вызывает расширение зоны рассеяния моментов прибытия (Таблица 3.5) на станции массового пассажиропотока, носитель распределения увеличивается.

Таблица 3.5 - Параметры распределений моментов прибытия (утренний пик, нечетное направление движения), мин.

№ станции	11	9	7	5	3	1
среднее, x	-0,12	0,65	1,40	1,54	1,10	1,30
дисперсия, s^2	1,15	1,12	2,86	9,97	10,21	11,03

В вечерний пиковый период наибольшее рассеяние наблюдается на станциях массовой посадки 3, 5 (Таблица 3.6). При дальнейшем движении по маршруту происходит сужение носителя распределения, что обусловлено наличием активного регулирования со стороны машинистов и диспетчера.

Таблица 3.6 - Параметры распределений моментов прибытия (вечерний пик, четное направление движения), мин.

№ станции	3	5	7	9	11	13
среднее, x	0,78	0,83	0,57	1,26	1,43	-0,43
дисперсия s^2	3,72	3,24	0,80	1,47	0,96	1,16

По мере движения по маршруту также растет и среднее опоздание поездов. Лишь на конечных станциях значение показателя уменьшается. Это свидетельствует об усилении регулирующих воздействий со стороны машинистов, т. к. качество их работы оценивается по пунктуальности прибытия на конечную станцию.

Графики на рисунке 3.22 отражают процесс накопления опозданий при дви-

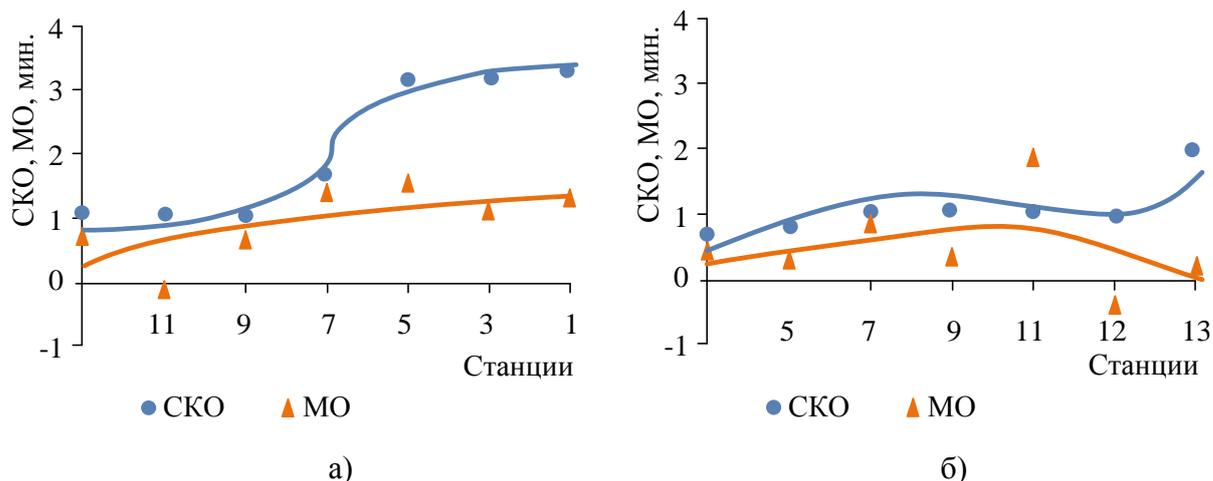


Рисунок 3.22 - Динамика показателей рассеяния моментов прибытия пригородных поездов при движении по маршруту

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

жении пригородных поездов в утренние пиковые периоды - с 7.00 до 9.00. Характер изменения математического ожидания и SKO вдоль маршрута подтверждает, что оперативное регулирование в состоянии корректировать среднюю величину опоздания, однако, не может компенсировать влияние интенсивных случайных возмущающих факторов.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в работе [303]. Определено, что выходная функция описывается распределением Вейбулла с показателем формы, примерно равным 2. Для поездов дальнего следования средняя продолжительность опозданий составляет 560 с., средний сдвиг - (-200) с. Для грузовых поездов эти параметры равны соответственно 1100 и 880 с.

Выводы по разделу 3

1. Предложенные обобщенные стохастические модели движения используются при расчете задержек входные распределения любого вида, что позволяет расширить область анализа. Модели служат основой для исследования процесса возникновения отклонений от графика с учетом реальной ситуации, повышают эффективность решений по компенсации и профилактике межпоездных конфликтов.

2. Разработана методика расчета вероятностных характеристик времен прибытия с учетом реальной статистики движения поездов. Решена задача выбора интервала пакетного следования, обеспечивающего заданное число вторичных задержек. Показано, что расчетный интервал отправления (13 мин.), полученный для условия вероятного возникновения одной задержки на перегоне, соответствует значениям (10-14 мин.), которые закладываются в нормативный график движения на РЖД. Это подтверждает адекватность разработанной модели.

3. Предложена модель движения поезда, в которой учитывается стабилизирующее действие системы текущего управления («машинист/диспетчер»). Модель описывает процесс коррекции скоростного режима поезда. Показано, что в процессе ликвидации случайных отклонений в пути следования доминирующая роль принадлежит машинисту, при возмущениях на станциях – лицу, координирующему работу (диспетчеру). Полученные выводы подтверждены путем сравнения результатов модельного расчета с реальными данными.

4. На основе моделирования определено, что при насыщении полигона управления грузовыми поездами межпоездной интервал на участке протяженностью порядка 100 км. увеличивается с 7,0 до 10,5 мин., что соответствует реальной статистике движения по РЖД.

5. Разработана методика статистического анализа данных о движении поездов на участках железной дороги. Методика использована при исследовании закономерностей формирования задержек и действий персонала, направленных на повышение уровня пунктуальности. Определено, что система оперативного управления движением способна эффективно снижать среднее значение накопленного опоздания, однако не в состоянии уменьшать разброс моментов прибытия поездов.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

4.1 Оптимизация энергозатрат в процессе регулирования движения

А. Задачу снижения расхода топлива (энергии) на тягу поездов ставят в ряд наиболее важных в связи с большим весом энергозатрат в эксплуатационных расходах и негативным влиянием выбросов в атмосферу. Доля платы за энергоносители в общем объеме текущих расходов ОАО «РЖД» превышает 60 проц. Эта величина значительно выше энергозатрат на дорогах Европы с преимущественно пассажирским движением (22-25 проц.) [237].

Проблема обеспечения энергетически эффективных режимов ведения поездов рассмотрена в ряде работ [6, 10, 24, 48]. Большой вклад в разработку основ теории тяги внесли отечественные ученые В.Е. Розенфельд, К.Г. Марквардт, Л.А. Баранов и др. Их трудами созданы модели движения поезда, неотъемлемой частью которых является энергетический расчет. В большинстве опубликованных работ рассматриваются задачи построения энергоэффективного графика на предстоящий, достаточно длительный период времени. При этом учитываются постоянно действующие факторы - число и номенклатура поездов, ограничения скорости и др. В реальности возникают случайные отклонения, которые вызывают необходимость корректировки движения. Лишь в некоторых работах (например, в [57, 81]) обсуждается вопрос оперативной коррекции графика с целью получения экономии энергии.

Задача реализации энергетически эффективного движения поездов включает два раздела: обеспечение движения поезда по оптимальной скоростной траектории при заданном времени хода по перегону и распределение ресурсов (инфраструктуры, времени) между поездами при ликвидации отклонений [8, 9]. Задачи второго раздела ориентированы на поиск управления потоком поездов в условиях регулярно возникающих возмущений процесса [54].

Энергоэффективное управление на практике обеспечивается двумя способами. Первый – неоперативный - заключается во включении энергооптимальной траектории движения в режимную карту. Режимная карта выдается машинисту (или закладывается в систему автоведения) перед поездкой. Очевидно, первая же неграфиковая задержка исключает запланированное ранее энергооптимальное движение данного поезда (пакета поездов). Второй способ предполагает оперативную корректировку графика с учетом энергетической составляющей [196].

Идея о том, что эффективность использования ресурсов может быть повышена при целенаправленной корректировке расписаний в зависимости от сложившейся ситуации, выдвинута в основополагающих работах по графику движения (например, в [76]). Корректировки вырабатываются в диспетчерском центре и передаются по системе связи на локомотивы. Основные положения централизованного управления межпоездными интервалами и скоростью поездов при возникновении отклонений изложены в работах [75, 222, 270]. Критерием оптимизации графика в исследованиях [162, 173] служит минимум расхода энергии. Дальнейшее развитие этой идеи ведет к двухкритерийной задаче, где, помимо экономии энергии, требуется обеспечение высокого уровня пунктуальности для обеспечения пересадки пассажиров [255].

Эффективным способом снижения энергозатрат в оперативных условиях является некоторое увеличение времени хода грузового поезда по участку, дополненное оптимальным распределением резерва времени между перегонами. При введении временной добавки компонента расходов по оплате труда локомотивной бригады несколько возрастает. Однако выигрыш за счет экономии энергии значительно перекрывает эту потерю. Например, увеличение времени хода по участку длиной 100 км на 6 мин. при полном использовании резерва дает экономию около 10 проц. Увеличение же зарплатной компоненты не превышает 1-2 проц.

Автор работы [145] показывает эффективность снижения скорости и увеличения интервала следования грузовых поездов в короткие промежутки времени. Практика показывает, что назначение замедленного режима следования, который

предоставляет возможность снижения расхода энергии, целесообразно и в достаточно протяженные периоды спада интенсивности потока грузовых поездов.

Скорректированная траектория для конкретного периода может быть сгенерирована как в ДЦУП, так и в локомотивной бортовой системе. В обоих случаях требуется обмен данными между диспетчерским центром и локомотивами по каналу радиосвязи. При реализации разработанных корректировок диспетчером назначаются конкретные моменты проследования и прибытия поездов на станции.

4.2 Модели формирования энергозатрат при движении поезда

Комплексные модели, которые описывают процессы движения и энергопотребления, ориентированы на выбор рациональных способов управления [209]. Модель 1-го типа имитирует движение при отсутствии препятствий движению. Управление 2-го типа предполагает использование модели, в которой режим и скорость движения на дискрет-участке определяются алгоритмом обработки «ближайшей» информации о состоянии одного-двух элементов пути по ходу следования. Модель типа 3 использует актуальную информацию о ситуации как в ближней (по отношению к поезду) зоне, так и на протяжении всего участка.

Базовая модель движения представляет поезд в виде материального тела малых размеров с приведенной массой m_n - с учетом дополнительных инерционных свойств, возникающих из-за наличия вращающихся частей локомотива и вагонов. Движение поезда моделируется дифференциальным уравнением:

$$F_p = m_n \frac{d^2 s}{dt^2}, \quad (4.1)$$

где $F_p = F - F_{\text{торм}} - F_{\text{осн}} - F_{\text{доп}}$ - равнодействующая сила; $F, F_{\text{торм}}, F_{\text{осн}}, F_{\text{доп}}$ - силы тяги, торможения, основного и дополнительного сопротивления.

Обычно в уравнение (4.1) вводят мгновенную скорость и величины удельного основного w_0 и дополнительного w_δ сопротивления движению [138]:

$$\frac{dv}{dt} = \xi \left[\frac{F}{P+Q} - \frac{F_{\text{морм}}}{P+Q} - w_0 - w_\delta \right] = \xi [f - f_{\text{морм}} - w], \quad (4.2)$$

где $f = \frac{F}{P+Q}$, $f_{\text{морм}} = \frac{F_{\text{морм}}}{P+Q}$ - приведенные величины сил тяги и торможения.

Основное удельное сопротивление подвижного состава аппроксимируют, как правило, квадратичной зависимостью от скорости. Усредненные значения сопротивления получают на основе статистики [6, 102]. Дополнительное сопротивление от подъемов и спусков принимают равным величине уклона i : $w_\delta = i$. Сопротивление движению по кривой обратно пропорционально ее радиусу R :

$$w_d = 700/R \quad (4.3)$$

Силы тяги и торможения подвижного состава определяют по соответствующим усредненным тяговым, тормозным характеристикам $(F(v), F_{\text{морм}}(v))$ заданным в графическом или табличном виде.

Головная и хвостовая части поезда нередко оказываются по разные стороны от точки перелома профиля, в которой уклон i_1 сменяется уклоном i_2 . В этом случае при определении траектории движения принимают модель поезда «нерастяжимая нить». В расчете используют средневзвешенное значение удельного сопротивления движению от уклона:

$$i_{\text{ср}} = \frac{1}{L_{\text{п}}} (i_1 L_{\text{п1}} + i_2 L_{\text{п2}}), \quad (4.4)$$

где $L_{\text{п}}$, $L_{\text{п1}}$, $L_{\text{п2}}$ - длина поезда и его частей, находящихся на уклонах.

В работе [81] предложен способ выполнения тягового расчета без использования традиционного численного метода. Аналитическое решение уравнения движения оказывается возможным благодаря тому, что для тяговой и тормозной характеристик применяется аппроксимация квадратичной параболой. Коэффициенты аппроксимации a_p , b_p и c_p функции основного сопротивления определяются на основе анализа кривой выбега поезда, решения системы уравнений вида:

$$A_{\text{осн}j} = \{a_w + b_w (M_s[v]_j) + c_w (M_s[v]_j)^2 + c_w D[v]\} g l_j, \quad (4.5)$$

где $M_s[v]$, $D[v]$ - соответственно математическое ожидание и дисперсия скорости на элементе пути l_j , ограниченном точками съема данных.

Торможение поезда перед запрещающим сигналом вызывает потерю, которая определяется как разность работы силы инерции и сил сопротивления [127]:

$$\Delta A_m = \frac{mgv_m^2}{7,2 \cdot 10^6} \left[102(1 + \gamma) - \frac{w_{ep} - w_i}{a_m} \right], \quad (4.6)$$

где v_m - скорость в момент начала торможения; a_m - среднее значение замедления; $(1 + \gamma)$ - коэффициент инерции вращающихся масс.

Тормозные потери удобно представлять в графическом виде. На рисунке 4.1 приведены графики зависимости $\Delta A_m(v_m)$ для грузовых поездов различного веса при следовании по горизонтальному участку.

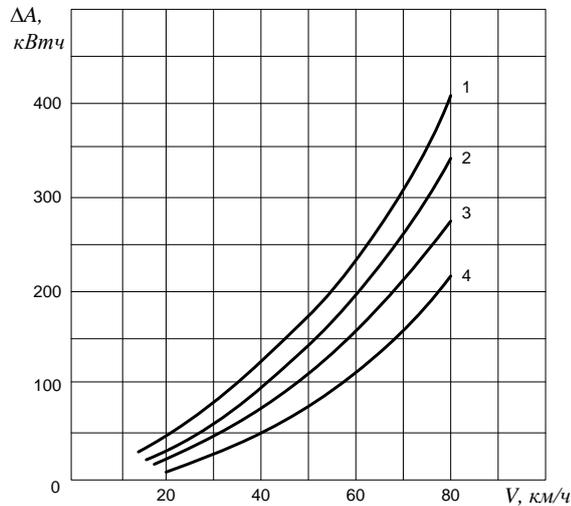


Рисунок 4.1 - Зависимость потери энергии от начальной скорости торможения
Масса поезда: 1 – 6 тыс. т., 2 – 5 тыс. т., 3 – 4 тыс. т., 4 - 3 тыс. т.

Дадим оценку влияния коррективов движения поезда на энергопотребление. Изменение полного объема механической работы по перемещению поезда $\Delta A^{\text{ЭПС}}$ при увеличении времени хода на ΔT в режиме тяги составляет:

$$\Delta A^{\text{ЭПС}} = \Delta A^{\text{ЭЭ}w} + \Delta W^{\text{CH}} \quad (4.7)$$

Первая компонента, которая характеризует собственно тягу, уменьшается. Изменение расхода вспомогательными агрегатами локомотива ΔA^{CH} на порядок слабее первой составляющей. При стандартной записи основного сопротивления: $w_0 = a + bv + cv^2$ - относительное изменение объема механической работы равно:

$$\frac{\Delta A^{\text{ЭПС}}}{A^{\text{ЭПС}}} = -(b + 2cv) \frac{\Delta v}{v} \quad (4.8)$$

Расчет показывает, что в диапазоне ходовых скоростей от 60 до 80 км/ч, используемом в грузовом движении, чувствительность величины механической работы и, соответственно, энергетических расходов к приращению скорости, равному 1 км/ч, имеет порядок 0,1 проц.

Значителен объем невосполнимых потерь при подтормаживании на вредных спусках. В горной местности совокупная длина участков, где требуется торможение, достигает 25 проц. от полного пути. Потери в тормозах при этом достигают (10-15) проц. от полного объема работы поезда.

В основу расчета финансовых затрат на продвижение поезда кладут величину $A^{экс}$ эквивалентного расхода энергии [95]:

$$A^{экс} = A^{ЭПС} + \frac{e^w}{e^{эз}} A^M + \frac{e^m - e^w}{e^{эз}} A^T, \quad (4.9)$$

где $A^{ЭПС}$ - потеря энергии в агрегатах локомотива; A^M - механическая работа по перемещению поезда; e^m , e^w - ставки ремонтных расходов, относимые на участки торможения и тяги; $e^{эз}$ - тариф на оплату электроэнергии.

Если в границах участка нет остановок, компонента A^T представляет собой величину потерь при подтормаживании на вредных спусках. Величина $(e^m - e^w)$ при реально сложившихся ценах значительно меньше компоненты $e^{эз}$ - как минимум, в 3 раза. Вклад третьего слагаемого в величину $A^{экс}$ не превышает 3%, этим членом выражения (4.9) можно пренебречь. Величина эквивалентного расхода с учетом выражения для механической работы и указанных особенностей равна:

$$A^{экс} \cong A^{ЭПС} + 3,2 \frac{e^w}{e^{эз}} F_{ср}^{тяги} L_{сумм}^{тяги}, \quad (4.10)$$

где $L_{сумм}^{тяги}$ - суммарная протяженность участков с режимом тяги.

На плече тягового обслуживания эквивалентный уклон всей трассы близок нулю. Это является типичным случаем для участков большой длины. Практически вся энергия идет на преодоление сил основного сопротивления.

Приведенные соотношения позволяют ввести в задачу оперативной корректировки траектории движения каждого поезда, помимо требования пунктуальности, условие высокой энергетической эффективности.

4.3 Энергооптимальная траектория движения поезда

А. При изменении траектории движения поезда по команде из центра управления появляется необходимость скорректировать режим тяги с целью обеспечения минимума затрат энергии. При решении задачи оптимизации в каждом цикле тяга/выбег рассматривают трехфазную (без участка неизменной скорости) или четырехфазную траектории - при вновь назначенном времени хода. Оптимум находят методом динамического программирования или по схеме, основанной на принципе максимума Понтрягина [24].

Для того, чтобы определить функцию оптимальных режимов, в уравнение движения поезда (формула (4.1)) вводят управления u_f, u_{fm}, u_r , целенаправленно изменяющие интенсивность сил тяги, торможения и сопротивления движению. При этом уравнение приобретает вид [10]:

$$\frac{dv}{ds} = \frac{1}{v} [u_f f_{\max}(v) - u_{fm} f_{t\max}(v) - u_r r_{\max}(v) - w(v) - g(s)], \quad (4.11)$$

где $g(s)$ - функция, характеризующая динамику сопротивления движению.

Определение оптимального управления движением по энергетическому критерию рассматривают как задачу поиска минимума функционала:

$$A_{\varepsilon} = \frac{P+Q}{\eta_T \xi} \int_{S_{\text{нач}}}^{S_{\text{кон}}} [u_f f_{\max}(v) - \eta_r u_r r_{\max}(v)] ds, \quad (4.12)$$

где $S_{\text{нач}}, S_{\text{кон}}$ - координаты начала и конца участка; η_f, η_r - к.п.д. соответственно в режиме тяги и рекуперации; $f_{\max}(v), r_{\max}(v)$ - ограничения на управление – на максимальные значения силы тяги и силы торможения. При решении задачи также учитывается скоростное ограничение: $0 \leq v \leq v_{\max}(s)$.

Построение оптимальной траектории при заданном времени T_x движения поезда по участку производят в два этапа. На первом этапе определяют необходимые условия оптимальности, используя принцип максимума. Затем находят оптимальную траекторию путем численного решения уравнения.

При использовании численного метода рассчитывают моменты T_1, T_2, T_3 переключения режимов (рисунок 4.2) и соответствующие им скорости такие, чтобы функционал $A_s(y)$ принял наименьшее значение. При фиксированном T_1 существует единственное сочетание моментов T_2, T_3 , удовлетворяющее условию минимума расхода. В работе [132] доказано, что в первой и в четвертой фазах оптимальным является движение с максимально допустимым ускорением разгона и торможения.

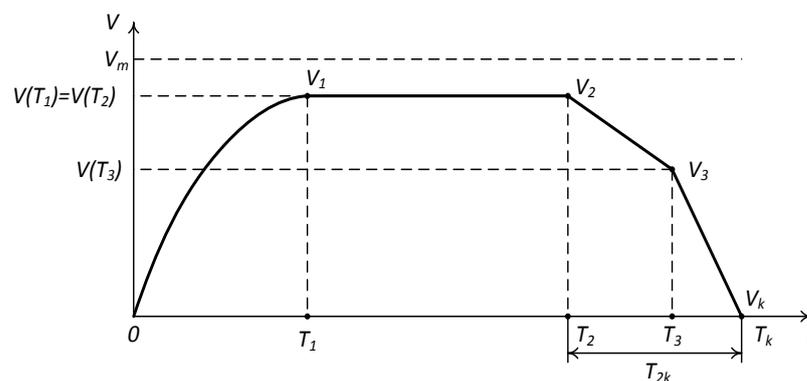


Рисунок 4.2 - Четырехфазная траектория движения поезда

Основной трудностью, препятствующей использованию точных методов расчета оптимальной траектории, является большой объем вычислений. Затраты машинного времени на расчет фрагмента протяженностью 1 км превышают 120 с. [259]. Использование приближенных вычислений и развитых алгоритмов увеличивает скорость проведения расчета. Так, для участка длиной 100 км машинное время, затрачиваемое на поиск эффективной траектории, не превышает 10 с. При этом ошибка имеет порядок 5 проц. Поэтому вычислять траекторию целесообразно в бортовом управляющем комплексе локомотива.

Доминирующей причиной низкой точности энергетического расчета служит отсутствие реальных значений сопротивления движению. Сопротивление в кон-

кретной поездке значительно отличается от среднестатистической величины, отклонения достигают 20 проц. при движении поездов метрополитена и 30 проц. - наземного транспорта [149]. Предложены два способа нахождения сопротивления и его зависимости от скорости $w_0(v)$ для конкретного поезда. Один из них основан на учете параметров движения [81], в другом анализируется динамика тока в контактной сети [135]. Использование методики, позволяющей учесть реальные характеристики поезда, позволяет повысить точность расчетов.

4.4 Динамика расхода энергии при изменении режима движения поезда

А. В процессе выбора диспетчером регулировочного решения необходимо дать оперативную оценку сверхнормативным потерям энергии, которые возникают при изменении скорости и при остановках. Проанализируем динамику потребления на примере тяжеловесного грузового поезда (6 тыс. тонн). Расход энергии в расчете на 1 км пути при невозмущенном движении по равнинному участку оценивается средним значением 35 кВтч (при скорости 75 км/ч). На работу вспомогательного оборудования электровоза каждую минуту тратится 5-6 кВтч [87].

Увеличение времени хода поезда по горизонтальному участку на одну минуту приводит к экономии энергии порядка 10 кВтч. В условиях горного рельефа чувствительность к увеличению времени хода значительно выше – до 50 кВтч/мин. Очевидно, добавление времени на перегонах, где имеется указанный рельеф, дает наилучший эффект. Так, увеличение времени хода на 3 минуты с рациональным распределением его по перегонам участка длиной 145 км дает экономию энергии 80 кВтч, превышающую на порядок выигрыш от оптимизации скоростной траектории без введения добавок времени [126].

Дополнительный расход ТЭР при возобновлении движения после остановки зависит от скорости в конце разгона (см. рисунок 4.3). Расчет показывает, что каждый из циклов снижения и последующего восстановления скорости (при следовании на желтый) требует дополнительных затрат энергии, составляющих для

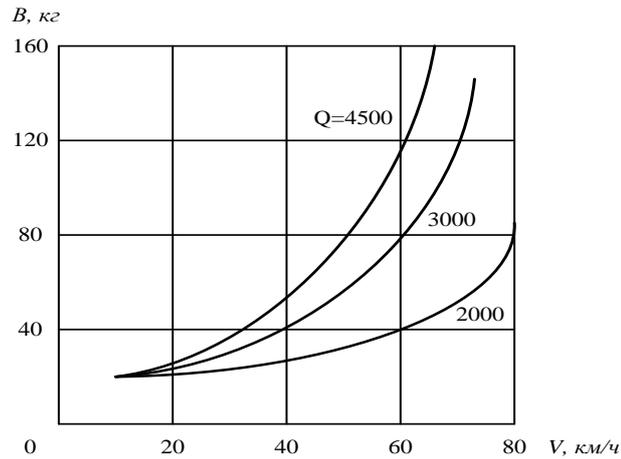


Рисунок 4.3 - Расход топлива на выполнение разгона после остановки при движении поездов различной массы

груженого поезда от 150 до 200 кВтч, для порожнего – около 100 кВтч. Потери указанного вида велики, в частности, из-за регулярного снижения скорости при прохождении станций. Так, на участке протяженностью 200 км тяжелым поездом перерасходуется более 600 кВтч, или почти 8 проц. от полного потребления [123].

Выбирая регулировочное решение в ситуации, когда выдано предупреждение об ограничении скорости, диспетчер может ориентироваться на следующую оценку: дополнительный суточный расход электроэнергии $\Delta A_{\text{дон}}$ по потоку грузовых поездов при ограничении в расчете на 1 км пути составляет [117]:

$$\Delta A_{\text{дон}} = 3,8 \cdot 10^{-6} (v_1^2 - v_2^2) \Gamma_{\text{бр}} A_{\text{тп}}^{(l)}, \quad (4.13)$$

где v_1^2, v_2^2 - нормативная и сниженная скорость; $\Gamma_{\text{бр}}$ - суточная грузонапряженность; $A_{\text{тп}}^{(l)}$ - расход энергии на 1 т-км. механической работы.

На практике при оценке качества управления движением по критерию энергии используют усредненные показатели. Потерю ТЭР при единичном ограничении скорости принимают равной 100 кВтч или 30 кгут. Один час горячего простоя электровоза оценивают значениями расхода 50 кВтч или 25 кгут [120].

Следует подчеркнуть, что в магистральном грузовом движении влияние неплановых остановок и ограничений значительно превышает потери, обусловленные отклонением реальной скоростной траектории от энергооптимальной.

Б. При принятии решения о корректировке движения поезда диспетчер должен учитывать степень влияния добавок времени на объем энергии. Приведем оценки значений расхода, основываясь на результатах расчета потребления на реальном участке Транссибирской магистрали протяженностью 164 км. По участку следуют поезда с нормативной массой 6,3 тыс. т. (груженный) и 2,0 тыс. т. (порожный). В качестве модели движения используется четырехфазная траектория. Техническая скорость соответствует реальным показателям: 63 км/ч в четном направлении и 68 км/ч – в нечетном. Результаты расчета сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 - Показатели расхода энергии на различных участках траектории

	разгон		проба тормозов		установившееся движение		выбег		торможение	
	t	W	t	W	t	W	t	W	t	W
груженный	5,36	463	1,75	170	153	4990	8,61	48	0,77	600
порожный	1,96	175	1,20	77	147	4805	4,31	24	0,75	200

Примечание. В таблице использованы обозначения: t – время хода, мин.; W – расход энергии, кВтч.

Полный расход по участку для указанных поездов равен соответственно 6,2 и 5,1 тыс. кВтч. Объем энергии, расходуемый порожним поездом в периоды установившегося движения, мало отличается от аналогичного показателя для груженого поезда. Оптимизация траектории путем использования «скользящего» режима – чередования тяги и выбега при движении на горизонтальном профиле – приводит к скромной экономии, равной 16 кВтч, или 0,3% от полного расхода.

В переходные периоды (начальный разгон, проба тормозов, остановка) груженный поезд расходует значительно больше энергии (в 2,5 раза) по сравнению с порожним. Варианты траектории разгона отличаются значениями скорости, при которых производится переключение на более высокие позиции контроллера. Анализ показывает, что рациональный выбор режима разгона сопровождается небольшой экономией - 0,18% от расхода за поездку.

Значительно более эффективен рациональный режим при подходе к точке

остановки поезда. Из данных, приведенных в таблице 4.2, заключаем, что рациональный выбор скорости перехода от режима выбега к режиму торможения позволяет сэкономить 7% от расхода, производимого груженым поездом, и 3% от расхода порожнего поезда. При этом оптимальная протяженность участка выбега для груженого поезда составляет 10 км, для порожнего – 4,2 км.

Таблица 4.2 - Расход энергии на участке при различных режимах торможения

Скорость в момент начала торможения, км/ч	Длина участка выбега, м	Затраты энергии по участку, кВтч
70	0	6028
48	6475	5709
35	10043	5600
25	11711	5615

Величина безвозвратных потерь энергии во время служебного торможения при оптимальной скорости включения этого режима (30 км/ч) составляет около 600 кВтч, порожнего поезда – 200 кВтч. При неплановой остановке поезда, когда режим торможения включается при скорости 70 км/ч, безвозвратные потери энергии возрастают у груженого поезда до 1028 кВтч, у порожнего – до 322 кВтч. Если вместо пневматического тормоза применить рекуперативное торможение, объем возвращенной в контактную сеть энергии при отсутствии участка выбега составит 187 кВтч у груженого и 69 кВтч у порожнего поезда.

Следует подчеркнуть, что наиболее весомые потери возникают по причине запоздалого поступления машинисту информации из ДЦУП о возникновении непланового ограничения. Позднее (за 3-5 мин. до остановки) диспетчерское распоряжение приводит к безвозвратной потере, достигающей (в худшем случае) 600 кВтч. Перерасход энергии при этом составляет 7 проц. от полного объема.

4.5 Оптимальное распределение добавочного времени хода по участку

В процессе адаптации движения к изменившейся ситуации возникает задача перераспределения добавочного времени хода между элементами участка. Расчет оптимальных перегонных времен производится в ДЦУП, коррективы траектории передаются по связи машинистам (системам автоведения).

При расчете используют энергетический критерий. Задача распределения резерва формализуется следующим образом. Имеется функция n переменных, характеризующая полный расход энергии $A_{yч}$ по участку: $A_{yч} = f(T_{X0}, T_{X1}, \dots, T_{X(n-1)})$.

Величина расхода аддитивна: $A_{yч} = \sum_i A_i(T_{Xi})$. При решении задачи принимается известной функция зависимости расхода на i -м перегоне $A_i(T_{Xi})$ от времени хода T_{Xi} . Значения переменных $T_{X0}, T_{X1}, \dots, T_{X(n-1)}$, при которых функция $A_{yч}$ достигает минимума, получается при введении неопределенного множителя Лагранжа:

$$\frac{\partial A_i(T_{Xi})}{\partial T_{Xi}} + \lambda = 0, \quad i = 0, 1, \dots, (n-1) \quad (4.14)$$

Времена хода по перегонам для достижения минимального расхода энергии выбираются из условия равенства соответствующих производных. Если (в простейшем случае) $A_i(T_{Xi}) = \frac{k_i}{T_{Xi}}$, значения перегонных времен рассчитываются в соответствии с выражением:

$$T_{Xi} = \beta_i T_{yч}, \quad \beta_i = \frac{\sqrt{k_i}}{\sum_i \sqrt{k_i}} \quad (4.15)$$

Если функция $A_i(T_{Xi})$ имеет сложный (нелинейный) характер, систему уравнений приходится решать численными методами, в частности, методом динамического программирования [10].

При движении поезда минимума затрат энергии удастся достичь, когда создается резерв за счет уменьшения времени хода на одних перегонах и увеличения времени на тех участках, где можно получить экономию. Масштаб выигрыша, который возникает при оптимальном распределении резерва, виден из сле-

дующих примеров. Так, на линии протяженностью 300 км ходовое время грузового поезда снижено на 3,6 мин. на двух перегонах и добавлено на эффективном перегоне; это повлекло экономию 239 кВтч, или 2,6% от полного расхода [55]. Аналогичный результат получен в [139], где перераспределение резерва сэкономило 12 проц. энергии на участке длиной 190 км; при этом ходовое время увеличено на трети перегонов. Реальные примеры позволяют считать пересчет резервов при корректировке графика в реальном времени весьма эффективной мерой.

4.6 Ограничения в процессе выбора энергоэффективного режима

При оперативном планировании пропуска потока поездов необходимо учитывать ограничения, которые накладываются на интенсивность потока конечной мощностью тяговых подстанций и потерями в контактной сети. Необходимо соблюдать минимальный интервал следования, при выдерживании которого обеспечивается допустимое падение уровня напряжения на токоприемниках электровазов. При анализе токораспределения используется комплексное моделирование работы тяговых средств и системы электроснабжения [17, 65, 246].

Потери энергии в системе электроснабжения составляют значительную часть всего объема энергии, расходуемой на тягу [43]. Уже на раннем этапе внедрения электротяги было обнаружено, что потери в контактной сети существенно возрастают при сгущении потока поездов. Так, автор работы [118] утверждает, что уменьшение интервала между поездами с 10 до 7 мин. увеличивает потери на 30 проц. В [108] предложена модель распределения энергии в системе электроснабжения с целью определения потерь. Моделирование показывает, что на участке удлиненной межподстанционной зоны (24 км, постоянный ток) при уменьшении интервала следования с 13 до 7 мин. потери в сети растут с 8 до 12 проц.

Проведено исследование процесса увеличения уровня потерь в контактной сети при движении пакета поездов с нормативной массой 6 тыс. тонн по участку, оборудованному системой переменного тока (25 кВ) [49]. Выполнено моделирование процесса потребления с учетом потерь в контактной сети. Проведен

итеративный расчет токораспределения и потерь при различных значениях интервала пакетного движения. Результаты расчета (см. графики на рисунке 4.4) свидетельствуют о том, что уменьшение интервала до 8 мин. ведет к двукратному повышению уровня потерь энергии – до 4,0 – 4,7 проц.

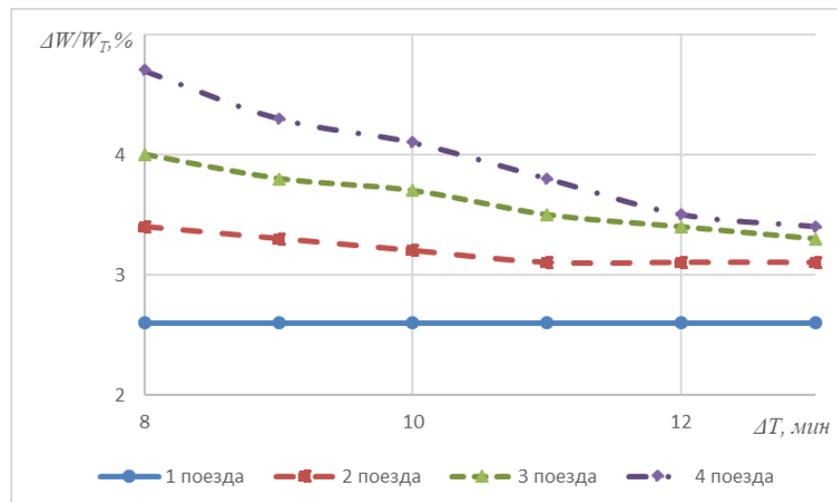


Рисунок 4.4 - График зависимости потерь в контактной сети от интервала при различных размерах пакета

В последующей работе [129] при моделировании движения тяжеловесных поездов получен аналогичный результат. Определено, что при уменьшении интервала от графикового (12 мин.) до предельно малого (5 мин.) уровень технологических потерь возрастает с 4,4 до 6 проц. В [145] показано, что минимальный уровень потерь в сети электроснабжения достигается при значениях коэффициента использования пропускной способности в пределах от 0,78 до 0,86.

Найденные закономерности позволяют дать рекомендации по выбору диспетчерских регулировок. В частности, следует исключать ситуации, когда два тяжелых поезда одновременно трогаются после остановки или идут в режиме тяги в средней части межподстанционной зоны.

4.7 Упрощенная методика распределения добавочного времени хода

С целью решения задач корректировки графика в реальном времени, предлагается производить рациональное распределение добавок времени по перегонам участка на основе показателей чувствительности расхода энергии (п. 4.4) или

эксплуатационных расходов (п. 6.9) к изменениям времени хода. Методика предполагает увеличение времени на перегонах, на которых можно наиболее эффективно использовать этот резерв. При расчете распределения добавочного времени учитываются только те перегоны, которые характеризуются аномально большими и малыми показателями чувствительности расхода к изменениям скорости.

В качестве примера приведем результаты расчета добавок к времени хода поезда массой 3200 т. по участку Транссибирской магистрали (таблица 4.3). В

Таблица 4.3 - Показатели расходов по перегонам участка Чита - Хилок

№ п-п	Перегон	Перегонное время, мин	ΔT_X , мин	Расход э/э, кВтч	ΔA , кВтч	Затраты руб	ΔP , руб	Чувст. кВтч/мин	Чувст. руб/мин
1	Чита-Кадала	15,7	-0,1	589	-2	749	0	+20	0
2	Кадала-Черновская	13,6	+0,5	265	-3	557	+1	-6	+3
3	Черновская-Долина	14,3	-2,5	267	+15	534	-9	+6	+3
4	Долина-Ингода	7,0	+0,9	286	-60	394	-29	-67	-32
5	Ингода-Лесная	20,8	-1,7	625	+17	969	+23	-10	-14
6	Лесная-Кука	10,3	-2,9	431	+41	512	-25	-14	+9
7	Кука-Яблонная	21,0	-1,0	1190	-25	1189	-14	+25	+14
8	Яблонная-Тургутуй	21,1	-5,8	2246	+3	1754	+24	-0,5	-4
9	Тургутуй-Сохондо	10,0	+0,3	0	0	408	-3	0	-1
10	Сохондо-Гонгота	21,9	+1,8	604	-82	1082	-45	-46	-25
11	Гонгота-Могзон	23,7	+12	514	-514	1138	-189	-43	-16
12	Могзон-Загарино	21,3	+3,6	803	-255	1198	-127	-71	-35
13	Загарино-Тайдут	17,3	+6,8	450	-202	986	-123	-30	-18
14	Тайдут-Харагун	19,5	+4,8	348	-151	895	-76	-31	-16
15	Харагун-Хушенга	22,6	+4,2	402	-69	987	-13	-16	-3
16	Хушенга-Гыршелун	21,3	+10	323	-133	872	0	-13	0
17	Гыршелун-Хилок	19,8	+6,7	328	-215	831	-103	-32	-15
Итого		301,1	+41,3	9669	-1624	15053	-774	-39	-19

таблице приведены данные об изменениях расхода энергии ΔA и затрат ΔP относительно нормативных значений при пропуске поезда по откорректированному графику. Показатели чувствительности к изменениям времени хода приведены в последних столбцах. Определено, что снижение участковой скорости на 7 км/ч (увеличение времени хода на 41 мин.) при условии рационального распределения добавочного времени сопровождается экономией энергии в размере 1624 кВтч, или 16,8 проц. от полного расхода. Экономия затрат по пропуску при этом равна 774 руб. (5,1 проц. от суммарных расходов).

Основная часть экономии приходится на пять перегонов: №№ 11, 12, 13, 14, 17. На каждом из них снижение расхода энергии лежит в пределах от 151 до 514 кВтч. Изменение расхода энергии при добавлении 1 мин. хода в лучшем случае равно 30-46 кВтч; показатель чувствительности при этом составляет 0,31-0,48 проц./мин. Чувствительность затрат по пропуску к увеличению времени хода существенно слабее: 0,10-0,23 проц./мин. (15-35 руб./мин.), - что обусловлено ростом «временной» компоненты при замедлении следования поезда.

Расчет, проведенный для четного поезда с массой 4 тыс. тонн, показывает следующее. При следовании по графику расход энергии составляет 9315 кВтч, затраты по пропуску – 16488 руб. Если увеличить время хода на 3,9 проц. относительно нормативного (318 мин.), расход энергии снижается на 12,1 проц., затраты – на 5,4 проц. Чувствительность расхода энергии к изменениям времени хода поезда массой 4 тыс. тонн значительно выше этого показателя для нечетного поезда массой 3,2 тыс. тонн и составляет -91 кВтч/мин.

На рисунке 4.5 показаны распределения величины приращения ходового времени при переходе к графику, оптимизированному по критерию расходов. Отметим, что суммарная протяженность элементов, на которых регулирование расхода энергии эффективно, составляет около 30 проц. от длины участка.

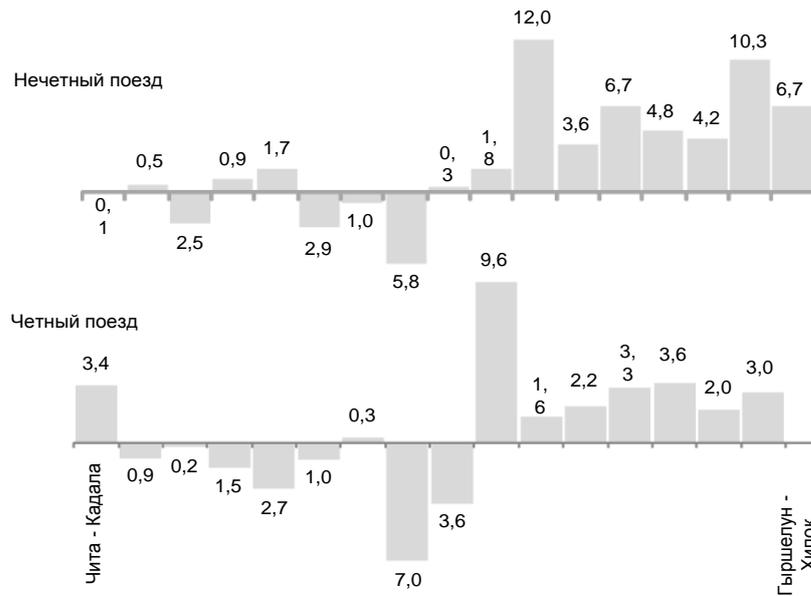


Рисунок 4.5 - Корректирующие интервалы (в мин.) для малозатратного расписания движения нечетного (3,2 тыс. т.) и четного (4,0 тыс. т.) поездов

Изменение времени хода на одну минуту на разных перегонах вызывает различное изменение расхода энергии. На рисунке 4.6 показаны распределения вдоль участка значений показателя чувствительности для нечетного и четного поездов.

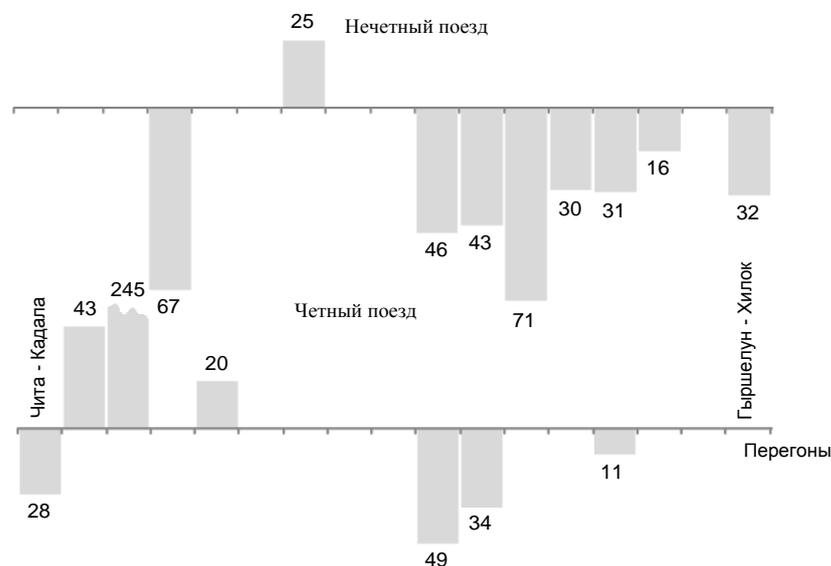


Рисунок 4.6 – Показатель чувствительности расхода электроэнергии к увеличению времени хода (кВтч/мин) по перегонам участка

Масштаб экономии денежных средств, которая получается в результате эффективного использования резерва времени хода, можно оценить, рассмотрев еще один реальный пример. На участке Транссибирской магистрали протяженностью 390 км следует грузовой поезд с массой 6300 т. Часть участка находится в

гористой местности, где эффективны энергосберегающие режимы ведения поезда. Опытные поездки показали, что при увеличении ходового времени на 15 мин. (на 3,5 проц. от полного времени) экономится (в среднем) 710 кВтч энергии. При величине расхода, равной 17,8 тыс. кВтч, экономия составляет 4,0 проц.

Результаты анализа фактических затрат для значений расходных ставок, действовавших на Дальневосточной дороге в различные годы, приведены в таблице 4.4. Полные расходы при исходном варианте пропуска поезда по участку Х-Р составили 50,0 т. руб. в 2006 г. и 76,0 т. руб. – в 2014 г. Использование энергоэффективной технологии позволило сэкономить около 2 проц. расходов.

Таблица 4.4 - Экономия расходов при увеличении времени хода и использовании энергетически эффективных режимов (суммы – в рублях)

Расчетный год	Рост эксплуатационной компоненты	Экономия затрат на энергоресурс	Экономия расходов по пробегу	Процент экономии расходов
2006	259,5	1120,0	860,5	1,7
2014	720,5	2201,0	1480,5	1,9

Снижение скорости на 1-3 км/ч на некоторых участках не влияет на время доставки грузов. Такое заключение основано на известном факте, что лишь небольшую часть времени (менее 30 процентов) составы вагонов находятся в движении. Поэтому умеренное снижение скорости на отдельных участках маршрута приводит к пренебрежимо малым задержкам прибытия на станцию назначения. Исследования показывают, что реально присутствующий разброс участковой скорости, лежащий в границах ± 5 км/ч, значительно превышает влияние предложенной энергоэффективной регулировки.

4.8 Анализ и нормирование расхода энергетического ресурса на тягу

А. Анализ динамики расхода электроэнергии и дизельного топлива на тягу служит выявлению и устранению недостатков в организации и управлении движением поездов. Более половины объема непроизводительного расхода вызвано

неэффективным оперативным управлением [7, 159]. Неучет этого обстоятельства ведет к ошибочным заключениям. Так, при проведении анализа динамики расхода электроэнергии [106] и дизельного топлива [107] на сети РЖД за 11-летний период проигнорирован фактор наличия нарушений графика движения поездов.

Оценка величины расхода затруднена вследствие значительного небаланса энергии в системе электроснабжения между данными по учету на тяговых подстанциях и на ЭПС («условных потерь») [43, 154]. На участках, электрифицированных на постоянном токе, этот показатель достигает 25 проц.

Задача *оперативного анализа расхода энергии* на участке железной дороги формулируется следующим образом [197]. Получая информацию о нагруженности системы электроснабжения (текущей потребляемой мощности), необходимо определить отклонения от норм потребления энергии отдельными поездами или их совокупностью на участке управления.

Б. Теорией управления производством выработан методический подход к установлению операционных норм [15, 114]. Однако, если нормирование затрат живого труда идейно осмыслено, то подход к установлению норм расхода ресурсов не имеет достаточного научного обоснования. Отсутствие методологической базы приводит к ошибкам в назначении норм, зачастую весьма серьезным, и к попыткам изобретения *абсолютных* норм расхода.

Теория управления представляет функционирование производства как процесс преобразования ресурсов на входе в результаты на выходе. Результатами являются не только объем услуг, но и количество израсходованных ресурсов. В работе [41] показано, что управление и объемом конечного продукта, и ресурсами неразделимо на отдельные сегменты. Существует единый процесс преобразования «входов» системы в результаты ее деятельности (рисунок 4.7). Расход ресурсов минимизируют посредством задействования обратных связей.

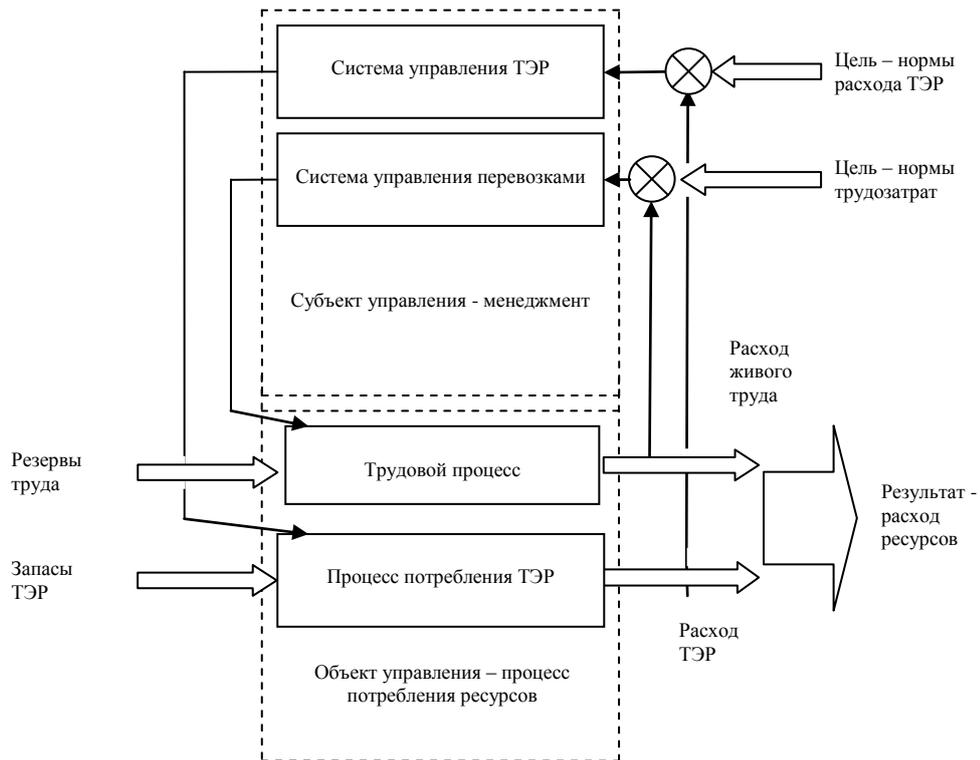


Рисунок 4.7 - Схема процесса управления ресурсами

Контур управления каждым из видов ресурсов можно выделить отдельно, так как на практике и менеджмент, и сам процесс потребления структурированы по рассматриваемым направлениям. Например, на железной дороге, использующей электрическую тягу, объектами регулирования служат совокупность поездов и инфраструктура электроснабжения. Процессом потребления энергии управляют (неявно) работники поездного диспетчерского аппарата, регулируя движение поездов.

В. Имеются две трактовки понятия нормативной величины потребления энергии. Первая трактовка учитывает расход, который наблюдается при проектном состоянии инфраструктуры. В ряде работ норма расхода задается на основе идеальной (энергоэффективной) траектории движения поезда [148]. Такой подход явно нереалистичен. Малопродуктивным является и метод нормирования, который основан на энергетическом балансе и движении строго по графику [81].

Нормирование расхода ТЭР на тягу поездов с использованием результатов статистического анализа работы участка в предшествующие периоды также признано неправильным [96]. Утверждается, что такие нормы узаконивают нерациональные

нальные затраты ресурса, имевшие место в прошлом. Также критикуется методика анализа и нормирования расхода электроэнергии [102], по причине того, что при расчете энергопотребления (получении *технически необходимого* расхода) используются усредненные параметры сопротивления движению. При этом получается более мягкая норма.

На наш взгляд, нормы не могут быть недостижимой манящей вершиной. К значению расхода, установленному для условий свободного следования и идеального состояния техники, машинисты стремиться не будут.

Согласно второй трактовке, значение нормативного расхода выступает как результат фактического выполнения графика движения в реальной ситуации [130]. Расход ресурса при заданном техническом оснащении определяется (а) конкретным сочетанием условий производства и (б) качеством труда работников. При установлении нормы расхода оговаривают некое «эталонное» сочетание технических средств и условий их использования.

В реальной обстановке темп изменения ситуации на участке высок. Условия работы подвижной единицы в период конкретной поездки значительно отличаются от «эталонных». Разность между фактическим и нормативным значениями расхода ТЭР при этом достигает десятков процентов, что явно скрывает вклад человека.

Нами предложено организовать процесс адаптирования нормы к складывающимся условиям, который нужно реализовывать в реальном времени [41, 42]. При назначении нормы учитывать влияние кратковременных ограничений скорости, перерывов в движении, а также отличие технических характеристик локомотивов и вагонов от стандартных. В этом случае величина расхода будет адекватно отражать действия оперативного персонала – машинистов и диспетчеров.

Корректировка нормы проводится на основе автоматического отслеживания влияющих факторов и использования нормативных зависимостей, связывающих расход с этими факторами. Предлагаемая методика корректировки нормы в реальном времени является разновидностью микроэлементного (пооперационного) нормирования [15].

Выводы по разделу 4

1. Механизм управления расходом энергоресурса «встроен» в процесс регулирования потока поездов – основную функцию системы. Это служит базовой предпосылкой для введения энергетического критерия в процесс текущего управления движением.

2. Эффективными мерами по снижению энергетических потерь при коррекции отклонений от графика является перераспределение временного резерва между перегонами, а также целенаправленная локальная корректировка скорости с целью предотвращения межпоездных конфликтов. Подстройка траектории без изменения времени хода по участку позволяет экономить 2-5 проц., с увеличением времени хода – до 17 проц. от полного расхода энергии на тягу поездов.

3. Энергетически оптимальная траектория движения поезда или группы поездов должна рассчитываться в режиме он-лайн с учетом реально складывающейся обстановки на участке. Для оперативного определения элементов траектории целесообразно применить приближенный метод расчета, разработанный в диссертации.

4. Наиболее значимый эффект по экономии энергии достигается при заблаговременном информировании машиниста об изменении условий пропуска, что позволяет рассчитать и реализовать оптимальную скоростную траекторию. Применение этой меры дает экономию до 7 проц. в поездке грузового поезда на плече 300 км.

5. Прицельные диспетчерские регулировки, направленные на профилактику отклонений в движении грузовых поездов, обеспечивают экономию электроэнергии в размере 6-8 проц. от полного расхода, или 3,5 млн. кВтч в границах участка диспетчерского управления протяженностью 250 км (в годовом исчислении).

5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА РАБОТЫ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПЕРСОНАЛА: ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

5.1 Система поддержки принятия корректирующих графических решений

Основными недостатками традиционной системы текущего управления движением поездов являются субъективность выбора и отсутствие экономического обоснования мер, корректирующих график движения. Решение указанных проблем облегчается при обеспечении поддержки работы персонала интеллектуальной компьютерной системой (СППР). Интеллектуальный «советчик» диспетчера может реализовать как функцию планирования пропуска потока, так и разработку программного режима ведения каждого поезда.

Система управления движением поездов, ориентированная на использование адаптационных механизмов, строится на основе методологических принципов функционирования АСУ технологическими процессами. В качестве основных компонентов системы выделяют управляемый объект, подсистему сбора, обработки информации и исполнительную подсистему (Рисунок 5.1).

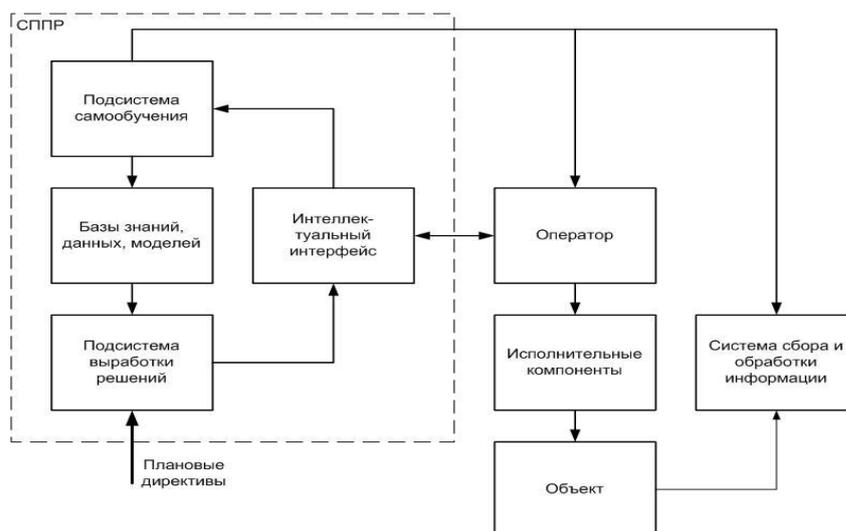


Рисунок 5.1 - Обобщенная схема интеллектуальной АСУ

Управляемым объектом в железнодорожной системе является совокупность поездов. Определяющие требования, которые служат опорной информацией для оперативного управления, задаются графиком движения. Обратная связь, замыка-

ющая кольцо управления, предназначена для компенсации возмущений. Важным элементом обратной связи служит модуль СППР. Источниками данных для моделирующего «ядра» служат системы АСОУП, ГИД «Урал-ВНИИЖТ» и др.

Основными требованиями, предъявляемыми к СППР поездного диспетчера, являются малое время поиска оптимальных решений, способность эффективно предотвращать распространение задержек и реализовывать регулировки через агентов исполнительного уровня. Особенностью интеллектуальной СППР, отличающей ее от традиционных средств информационного обеспечения, является наличие функций самообучения, использования баз знаний и баз данных. Набор вариантов урегулирования нештатной ситуации передается диспетчеру, который и принимает окончательное решение.

Существуют варианты централизованного и децентрализованного управления потоком. Полная централизация предполагает расчет в ДЦУП каждой скорректированной нитки, передачи ее параметров на поезд по каналу связи. В распределенной системе кривая скорости рассчитывается на каждом тяговом средстве.

Диспетчерская СППР содержит совокупность локальных сегментов, каждый из которых представлен блоком обработки информации («планировщиком») и интерфейсом взаимодействия с человеком-оператором. Локальный сегмент обслуживает круг поездного управления или зону компетентности специализированного диспетчера (локомотивного, вагонного и др.). Сервер, решающий задачу масштаба региона («координатор ДЦУП»), связан с локальными планировщиками посредством локальной вычислительной сети [34].

Общая архитектура и функции интеллектуальной СППР для оперативного управления движением на участке железной дороги описаны в работах [14, 279, 284]. Наиболее развитыми являются система, разработанная в рамках европейского проекта COMBINE [216], и система ROMA [267]. На основе актуальных данных в СППР вырабатываются рекомендации, которые передаются диспетчеру или напрямую структурам линейного уровня (Рисунок 5.2). Вариант использования СППР в процессе управления движением грузовых поездов на участке проведения ремонтного окна описан в [147].



Рисунок 5.2 - Архитектура и внешние связи СППР поездного диспетчера

В СППР распределенного управления [166] основным элементом является интеграционный процессор, который собирает информацию с периферийных сегментов и генерирует совокупность решений, основанных на величине общих издержек. Алгоритм, который реализуется в периферийном узле, служит решению задачи рационального распоряжения одним ресурсом (локомотивом, станционным устройством и др.).

Важнейшей функцией диспетчерской СППР является обеспечение человеко-машинного диалога при выработке управленческих решений [1]. Один из эффективных типов интерфейса *график блокировочных времен* (Рисунок 5.3) реализован в системе РОМА. График наглядно показывает места конфликтов между поездами, а также подсказывает варианты регулировок.

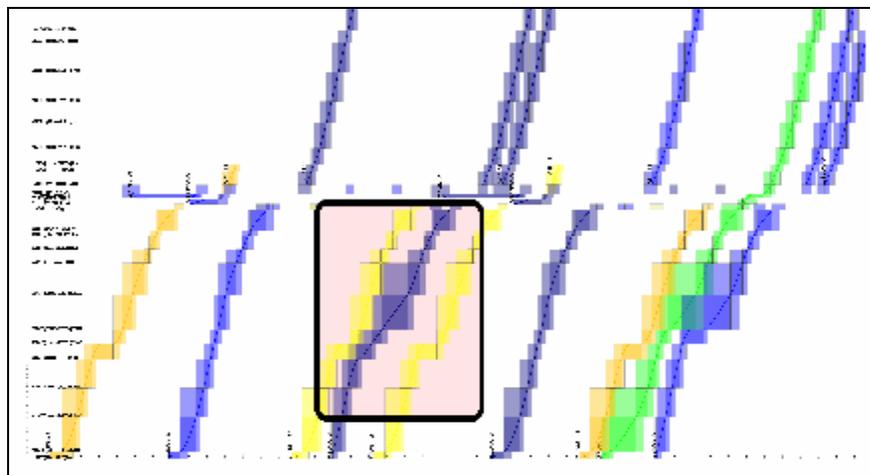


Рисунок 5.3 - Интерфейс «график блокировочных времен»

Процесс перепланирования начинается с момента, когда анализатор СППР обнаруживает значительное отклонение от графика движения или получает данные о техническом (технологическом) отказе на участке. В этом процессе можно выделить два этапа:

Этап 1. Обзор исходных данных с целью выявления отсутствующей (неполной) информации. Устранение неполноты информации осуществляется двумя путями: анализом совокупности однотипных данных, поступающих из разных источников в реальном времени, и использованием положительного опыта, накопленного в базе знаний (массиве опыта [143]).

Этап 2. Разработка плана действий по компенсации последствий или профилактике сбоев в системе. Этот подпроцесс включает:

- обобщение ситуации, определение сегментов баз данных, знаний, моделей, необходимых для проведения дальнейшего анализа;
- выбор стратегии ликвидации затруднений;
- подбор тактик – вариантов регулировочных мероприятий;
- синтез управляющих воздействий для реализации каждой из тактик.

В результате корректировки графика назначаются порядок, маршруты следования поездов и моменты прохождения поездами ключевых точек. Если для поезда не находится предписанный маршрут, позволяющий ликвидировать затруднение, система выводит диспетчеру запрос на введение нестандартного маршрута или отмену следования поезда.

Диалоговый режим работы пользователя СППР организуется следующим образом. Тип задачи, актуальной в данный момент времени, задает диспетчер, вводя соответствующий запрос в интеллектуальную подсистему посредством программы организации диалога. Подсистема выбирает требуемую модель из базы знаний, наиболее близкую к складывающейся реальной ситуации, и производит ее настройку на эксперимент. Выполнив моделирование, СППР выводит пользователю результаты в виде вариантов регулировок с оценками их эффективности. Окончательное решение принимает ЛПР путем выбора одного из вариантов.

В случаях, когда присутствуют высокие коммерческие риски или имеется недостаток прогнозной информации, для выработки решения по пропуску поездов привлекается ряд работников диспетчерского центра. Это осуществляется с помощью процедуры согласования позиций, для реализации которой используется подсистема коллективного анализа ситуации. Коллективную работу поддерживает программный модуль СППР, обеспечивающий независимое изменение графического документа (чертежа) любым из участников, – многопользовательский редактор векторной графики [116].

Отличительными чертами алгоритмов работы СППР, которые вытекают из результатов настоящего исследования, являются использование критериев коммерческой приоритетности поездов и локальной эффективности диспетчерских регулировок – наряду с условием пунктуальности.

5.2 Реализуемость оптимизационных алгоритмов в СППР

Решение оптимизационной задачи по корректировке графика движения в реальном времени предполагает поиск решения, достаточно близкого к оптимальному, за время, не превышающее одной минуты. Определим, насколько существующие алгоритмы удовлетворяют этому требованию. Для этого проанализируем результаты модельных экспериментов по поиску графических решений для большой сети и сложных поездных ситуаций.

Исследования показывают, что наибольшую размерность имеют оптимизационные задачи по коррекции движения на загруженных линиях пригородного сообщения. В серии экспериментов [218] моделировался двухпутный участок железной дороги протяженностью 50 км, содержащий 4 станции с развитой путевой инфраструктурой. Часовая интенсивность потока по узловой станции принята равной 40 парам, по периферийным - 26 парам поездов. Горизонт прогнозирования при проведении экспериментов составил один час. В условиях множественных опозданий (до 27 единиц) вариантный граф, моделирующий движение, содержал примерно 3600 альтернативных ребер. Поиск оптимального решения

производился с использованием двух алгоритмов, реализующих локальный поиск и поиск с запретами. Результаты экспериментов (таблица 5.1) показывают, что наилучшие решения дает поиск с запретами. Однако расчет при этом требует увеличенного компьютерного времени - до 110 с., - что недопустимо.

Таблица 5.1 – Характеристики алгоритмов расчета корректирующих решений

		Алгоритм поиска с фиксированными маршрутами	Алгоритм с выбором маршрута – локальный поиск	Алгоритм с выбором маршрута – поиск с запретами
Опоздания при входных отклонениях, с	средние	21,8	15,0	11,0
	макс.	188	127	105
Опоздания при внутренних отказах, с	средние	66,5	64,5	57,5
	макс.	351	344	309
Время счета, с		22	96	110

Увеличение пространственного горизонта прогнозирования приводит к значительному росту числа анализируемых элементов участка. При этом размерность оптимизационной задачи увеличивается экспоненциально. Так, при моделировании движения поездов по радиальной сети, содержащей пять направлений (более 600 блок-участков), среднее компьютерное время при поиске оптимальных корректировок составляет 152 с. [189].

Наиболее полно исследованы задачи определения эффективного распределения ресурсов, аналогичные графическим задачам. Решение большемерной оптимизационной задачи (100 единиц производства, 50 потребителей) по схеме ветвей и границ требует значительного (десятки минут) компьютерного времени [13]. Использование алгоритма, реализующего поиск с запретами, сокращает время счета до 150 с. При этом погрешность расчетов составляет 17 проц. Более качественные характеристики показывает вероятностный вариант поиска с запретами. Погрешность расчета не превышает 4 проц., а расчетное время – 21 с.

Удовлетворительные результаты получены при использовании генетического алгоритма для решения задач оптимизации процессов на железной дороге.

При расчете графика получено решение с погрешностью менее 5 проц. за время, составляющее 95 с. (в среднем) [299]. В работе [186] рассматривались варианты оптимального управления станционной работой. Определено, что при размере парка подвижных единиц порядка ста расчетное время не превышает 1 мин.

Таким образом, констатируем, что при достигнутых результатах в области методов решения оптимизационных задач становится реальным обеспечение расчетного времени порядка одной минуты. При этом отличие полученного решения от оптимального не превышает 10 проц. Задача оперативного перепланирования при использовании модели микро-уровня решается для участка малого размера – не более 50 км. Увеличение протяженности участка до 300 км (что актуально для условий РЖД) требует отказа от использования микро-модели движения поездов, переход к модели меза-уровня.

5.3 Контроль расхода электрической энергии в реальном времени

Эффективное использование энергетического критерия в процессе оперативного управления потоком поездов требует съема информации о расходе в реальном времени. Данные о потребленных объемах могут собираться как с поездов, следующих по участку, так и со счетчиков на тяговых подстанциях.

Первые системы оперативного контроля расхода электроэнергии на тягу поездов разработаны в последнем десятилетии XX века. Активно развивается контроль энергии в реальном времени на скоростных железнодорожных линиях [304]. В США внедрены системы учета энергии с использованием бортовых счетчиков и средств документирования данных [73, 228]. На железных дорогах Европы проблему контроля энергии решают путем съема данных со счетчиков, размещенных на поездах, по сотовой связи [131].

Целью создания системы учета энергии МПС России явилось стремление снизить размер оплаты за электроэнергию. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) служит для дистанционного получения информации о потреблении энергии [4, 69]. Первый уровень представлен обору-

дованием на тяговых подстанциях; включает электронные счетчики, устройства сбора и передачи данных (Рисунок 5.4). На втором уровне используются ПЭВМ, размещаемые в региональных центрах энергочета.

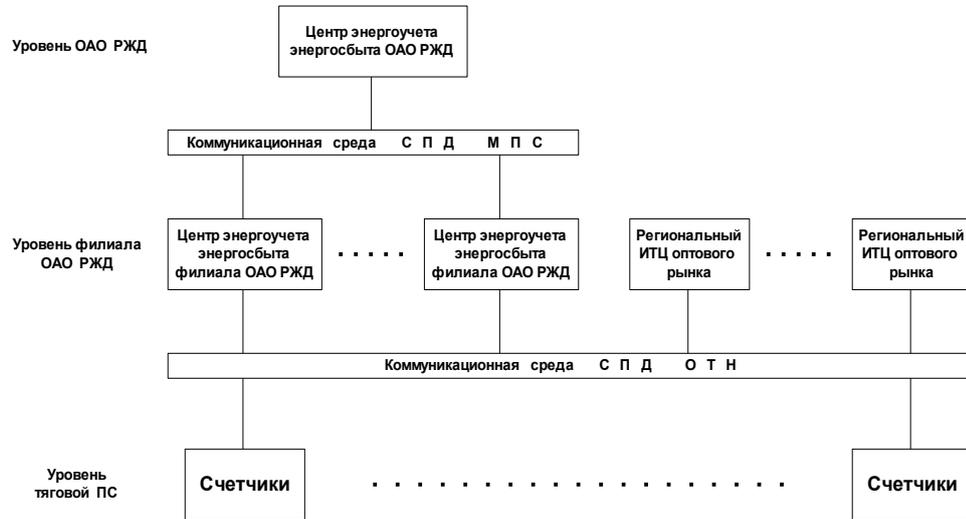


Рисунок 5.4 - Схема АСКУЭ тягового электроснабжения ОАО «РЖД»

Предложенная автором автоматизированная система учета электроэнергии (АСУЭ) [45], ориентированная на задачу оперативного управления энергопотреблением, отличается от системы, служащей для коммерческих расчетов. Сектором сбора первичной информации в АСУЭ служат тяговые подстанции (ТП), обеспечивающие движение в границах круга диспетчерского управления (Рисунок 5.5). В центре обработки формируются интегральные показатели расхода энергии, соответствующие диспетчерским кругам.



Рисунок 5.5 - Архитектура системы сбора данных о расходе по участкам

Работу системы АСУЭ в режиме он-лайн затрудняют сложность обеспечения съема данных об энергопотреблении за малые (порядка 1 мин.) интервалы времени и отсутствие детализированной информации – показателей расхода энергии по каждому фидеру контактной сети [39].

В отличие от коммерческого учета в условиях рынка, где важны объемы энергии как таковые, основным показателем эффективности использования ресурса является количество энергии, потраченное на единицу продукции, - тонно-километр брутто [41]. В качестве отчетной величины используется удельный расход электроэнергии на тягу поездов, характеризуемый показателем расхода E_T на единичный объем перевозок A [42].

Автором разработан комплекс технических средств и организационных мероприятий [45, 212], позволяющий задействовать критерий экономии электроэнергии как при управлении движением в реально складывающихся условиях. Технические и программные средства объединены в автоматизированную информационную систему «Ресурс-Э», основными функциями которой являются сбор и обработка данных об электроэнергии, расходуемой на тягу поездов, с привязкой к объему перевозочной работы [51]. Диспетчерскому персоналу выдаются показатели удельного расхода энергии в границах диспетчерских кругов. Система функционирует в реальном масштабе времени, стандартными интервалами обновления информации являются 0,5, 6 и 12 ч. Ядром системы служит сервер баз данных и приложений, оснащенный узлами коммуникации для сбора первичной информации. Информация извлекается из баз данных, формируемых в системах учета энергии (АСКУЭ) и управления перевозками (АСОУП).

Опытная эксплуатация системы на Дальневосточной железной дороге показала, что получать достоверные данные о грузопотоке и удельном расходе на малых интервалах (порядка 1 ч.) пока не представляется возможным. Причиной служат неконтролируемые задержки и ошибки ввода информации о поездах в базы АСОУП [206]. Удовлетворительное качество информации удастся получить лишь при интегрировании на интервале 12 ч. – продолжительности смены.

5.4 Когнитивные методы и модели в процессе решения диспетчерских задач

5.4.1 Теоретико-игровая модель выбора рациональной корректировки графика

А. Уровень интеллекта системы оперативного управления движением определяется мыслительными способностями человека-оператора (диспетчера). Разрешая конфликтную ситуацию, оператор строит модель, вырабатывает варианты и выбирает из них наилучший. Поиск решения затруднен, когда информация о ходе процесса слабо структурирована или недостаточна. В этом случае эффективны когнитивные методы, в первую очередь, методы экспертного анализа. В основе принятия решений при этом лежит синтез знаний, опыта и интуиции человека. Проведение когнитивного анализа в его традиционном виде трудоемко и требует большого времени. Задачи же оперативного управления необходимо решать в темпе развития реального процесса. Поэтому исследование проблемы использования экспертных методов для принятия решений в оперативной обстановке представляет большой интерес.

В области когнитивного анализа сложной ситуации и принятия управленческого решения наиболее распространены игровые методы. Рассмотрим возможность их использования в системе поездного диспетчерского управления [53].

В процессе управления сложной системой, в частности, железной дорогой, сталкиваются интересы ряда акторов, что позволяет моделировать их поведение как участников некоторой игры. Игровые методы дают формальный аппарат для распределения определенного ресурса между двумя (или несколькими) участниками в соответствии с оговоренными правилами [12, 21]. Такие методы, в частности, используются при решении задач развития сети железных дорог (см., например, [250]). Имеется ограниченное число работ, в которых строятся теоретико-игровые модели для решения задач управления, в частности, при определении цены доступа к инфраструктуре [239]. В [128, 292] исследуется проблема регулирования потока транспортных средств при наличии централизованного контроля. Основной трудностью, которая препятствует использованию игровых методов в диспет-

черском управлении, является необходимость построения модели ситуации в реальном времени – помимо собственно поиска оптимального решения.

У работников предприятия имеются и общие (корпоративные), и личные интересы, часто не совпадающие. Так, у персонала ДЦУП нередко возникают противоречия при определении действий по разрешению сложной ситуации. Например, один из работников (диспетчер железнодорожного направления) отстаивает позицию «Скоростника», другой (поездной диспетчер) - «Экономиста». Задачи поиска оптимальных решений при существовании частных интересов отдельных личностей рассматриваются теорией *корпоративных игр*, более узко – разделом *игр с непротивоположными интересами* [21]. Оптимальные решения вырабатываются работниками путем диалога и (в идеале) во взаимодействии с компьютерным «советчиком».

В качестве внешнего «противника» особого рода в теории игр рассматривается совокупность непредвиденных влияний. Этот набор событий обозначают термином «природа», а соответствующий класс моделей - *играми с природой*.

Б. В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда к временно однопутному участку с четного направления приближаются поезд №1 (тяжеловесный), с нечетного - №2 (легковесный, контейнерный) и №3 (сборный). Графиком предусмотрен безостановочный пропуск. Если же поезд №1 опаздывает, возникают неграфиковые задержки. Диспетчер должен принять решение, в каком порядке пропустить поезда по однопутному участку. Допускаем, что неплановые остановки малы, не вызывают опоздания по прибытию. Критерием выбора регуляционного решения в этом случае может служить расход энергии.

Согласно сложившейся практике, очевидным действием является остановка поезда №1 перед участком окна и беспрепятственный пропуск контейнерного поезда №2. Однако, случайные факторы могут привести к дополнительным отклонениям траекторий, что вызовет цепь неграфиковых остановок. Поэтому более эффективными могут стать другие варианты пропуска: с целенаправленным ускорением или замедлением поездов (Рисунок 5.6). При благоприятных услови-

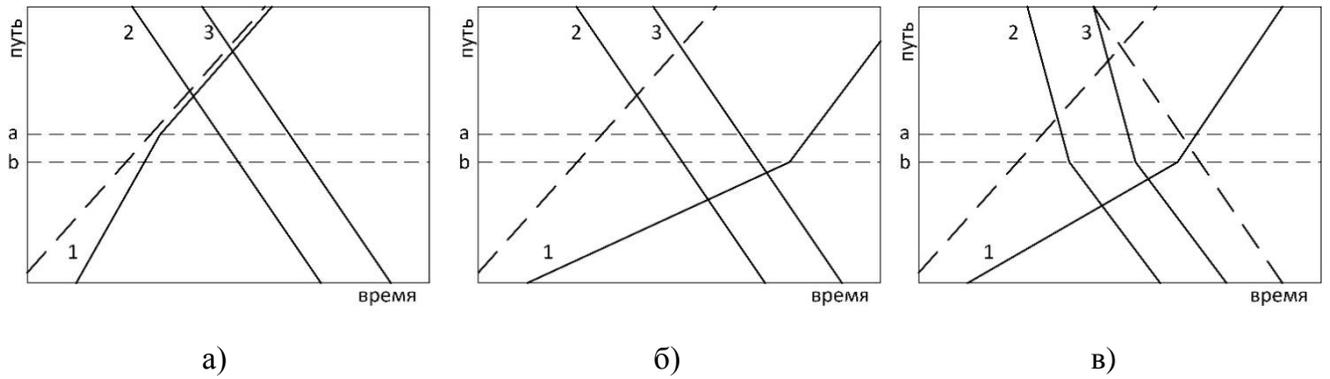


Рисунок 5.6 - Варианты пропуска поездов по участку с «окном» в границах [a, b]ях, когда отсутствуют дополнительные отклонения, удается исключить остановки, сэкономить значительный объем энергии. Можно также выбрать оптимальный вариант коррекции и в случае, когда неграфиковая остановка становится очень вероятной (неизбежной). Описываемой ситуации соответствует теоретико-игровая модель с участием воображаемого игрока «природа», ведущего себя с различной степенью «агрессивности». Если возникновение препятствий на пути следования поезда маловероятно, полагаем $P_{ост\ ij} = 0$. В других же случаях вероятность остановки из-за случайных факторов $P_{ост\ ij}$ относительно велика; в нашем случае принимаем ее равной 0,3.

При построении теоретико-игровой модели полагаем, что каждый из вариантов регулировки отражается элементом платежной матрицы вида:

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

где $\Delta A_{проф\ ij}^{тяж}$, $\Delta A_{проф\ ij}^{лег}$ - дополнительные затраты на выполнение профилактических мероприятий соответственно по поездам №1 и №2;

$\Delta A_{след\ ij}^{тяж}$, $\Delta A_{след\ ij}^{лег}$ - потери энергии, возникающие из-за отклонения от графикового режима последующих поездов, движущихся «по удалению»;

$A_{ост}^{тяж}$, $A_{ост}^{лег}$ - потери при остановке соответственно поездов №1 и №2.

Показатели дополнительного расхода при различных вариантах пропуска приведены в таблицах 5.2 и 5.3. При расчете учтено, что потеря энергии при остановке тяжеловесного поезда составляет 200 кВтч, легковесного - 150 кВтч.

Таблица 5.2 - Компоненты энергозатрат по поезду №1, кВтч

$P_{ост\ ij}$	Режим ускорения				Режим замедления			
	$\Delta A_{проф\ ij}^{тяж}$	$\Delta A_{след\ ij}^{тяж}$	$A_{ост}^{тяж}$	$\Delta A_{ij}^{тяж}$	$\Delta A_{проф\ ij}^{тяж}$	$\Delta A_{след\ ij}^{тяж}$	$A_{ост}^{тяж}$	$\Delta A_{ij}^{тяж}$
0	250	0	0	250	-250	200	0	-50
0,3	250	0	70	320	-250	200	180	130

Таблица 5.3 - Компоненты энергозатрат по поезду №2, кВтч

$P_{ост\ ij}$	Режим ускорения				Режим замедления			
	$\Delta A_{проф\ ij}^{лег}$	$\Delta A_{след\ ij}^{лег}$	$A_{ост}^{лег}$	$\Delta A_{ij}^{лег}$	$\Delta A_{проф\ ij}^{лег}$	$\Delta A_{след\ ij}^{лег}$	$A_{ост}^{лег}$	$\Delta A_{ij}^{лег}$
0	200	0	0	200	-100	200	0	100
0,3	200	0	50	250	-100	200	170	270

В режиме нагона тяжелый поезд перерасходует 250 кВтч на участке протяженностью два-три перегона. Аналогичный показатель для легкого поезда составляет 200 кВтч. Если же поезду назначено дополнительное время хода (замедление), резерв используется для обеспечения энергооптимального режима. Это приводит к экономии по рассматриваемым поездам соответственно 250 и 100 кВтч. Движение «по удалению» с возникновением цикла торможение/ускорение дает потерю, как минимум, 100 кВтч на поезд. Полагаем, что этот процесс (следование на желтый сигнал) при неграфиковой остановке тяжеловесного поезда распространяется на два последующих поезда.

Значения суммарного расхода при реализации режимов ускорения и замедления даны соответственно в пятом и девятом столбцах таблиц. Затраты энергетического ресурса при возникновении остановок из-за случайных влияний возрастают, что отражено во вторых строках таблиц.

Первый рассматриваемый сценарий характеризуется отсутствием риска неграфиковой остановки, второй – 30-процентным риском остановки тяжелого поезда, третий – риском остановки нечетного (легкого) поезда. Платежные матрицы для этих вариантов записываются следующим образом:

$$\Delta\Pi^{p_{ост}=0} = \begin{pmatrix} -450 & -350 \\ -150 & -50 \end{pmatrix}; \quad \Delta\Pi^{p'_{ост}=0,3} = \begin{pmatrix} -520 & -420 \\ -330 & -230 \end{pmatrix}; \quad \Delta\Pi^{p''_{ост}=0,3} = \begin{pmatrix} -500 & -520 \\ -200 & -220 \end{pmatrix}$$

Более эффективной считаем ситуацию, в которой потеря энергии минимальна. Приводим матрицы к стандартному виду, прибавляя к их элементам положительное число M . В результате, платежные матрицы приобретают вид:

$$\Delta\Pi^{p_{ост}=0} = \begin{pmatrix} 0 & 100 \\ 300 & 400 \end{pmatrix}; \quad \Delta\Pi^{p'_{ост}=0,3} = \begin{pmatrix} 0 & 100 \\ 190 & 290 \end{pmatrix}; \quad \Delta\Pi^{p''_{ост}=0,3} = \begin{pmatrix} 20 & 0 \\ 320 & 300 \end{pmatrix}$$

Анализ, проведенный по методу минимакса [12], показывает, что игроки имеют чистые оптимальные стратегии. Во всех трех играх участнику I (поезду №1) целесообразно использовать вторую стратегию – замедление следования. Оптимальной же стратегией игрока 2 в первых двух играх служит ускоренное движение, в третьей – замедленное. Как видим, рациональный выбор режима позволяет достичь лучшего экономического результата даже при высокой вероятности возникновения неграфиковой остановки.

Итоговым результатом анализа служит заключение, что оптимальной стратегией при отсутствии угрозы возникновения препятствий служит замедление обоих поездов. Если же остановка становится неизбежной ($p_{ост} \rightarrow 1$), более рационально использовать противоположную стратегию – ускорить следование поезда №1. Цена игры - перерасход энергетических затрат - в неблагоприятных ситуациях достигает 330 или 220 единиц. Эти величины характеризуют максимальный проигрыш перевозчика в каждой из вероятных ситуаций. Если же остановки не произойдет, потеря снизится до 150 кВтч.

5.4.2 Задача оптимального фрагментирования потока поездов

Оптимальный сценарий функционирования участка дороги, описанный в п. 1.8, предполагает, что при интенсивном режиме с участковой станции отправляется максимально возможное число поездов. Экономичный же режим реализуется в периоды спада интенсивности потока. Решение задачи оптимизации заключается в поиске такого соотношения числа "экономичных" и "интенсивных" поез-

дов в заданном периоде времени, которое обеспечивает максимум прибыли. Полагаем, функционирование интенсивного сегмента потока грузовых поездов контролируется региональным диспетчером (ДГП). Диспетчер же участка (ДНЦ) управляет движением экономичных поездов. Решая задачу повышения дохода корпорации, ДГП стремится к максимально возможному увеличению числа пропущенных поездов, а поездной диспетчер отстаивает позицию уменьшения интенсивности потока при улучшении качества (и экономики) движения. Полагаем, что игроки – ДГП и ДНЦ - конкурируют между собой, стараясь получить в управление как можно большую часть потока поездов и, соответственно, более весомое вознаграждение. Процесс выработки компромисса моделируется игровой задачей кооперативного типа.

Сформулируем задачу определения оптимального сочетания режимов экономичного и ускоренного пропуска [55]. Положим, за период диспетчерской смены необходимо пропустить по участку дороги N грузовых поездов. При этом часть потока $N^{инт}$ пропускается по традиционной (интенсивной) технологии, другая $N^{экон}$ – по энергоэффективной. Задача заключается в том, чтобы назначить определенное число экономичных $N_0=N^{экон}$ и ускоренных $N_2=N^{инт}$ поездов такое, чтобы был получен наилучший экономический результат: $N_{макс}=N_0+N_2$.

В результате распределения потока в «нулевой» сегмент включается число поездов $N_0=(N_{0\text{ ДНЦ}} + N_{0\text{ ДГП}})$, где первое слагаемое отражает ход в игре поездного диспетчера, второе слагаемое соответствует ответному ходу игрока ДГП. Аналогично, в сегмент 2 включаются поезда числом $N_{2\text{ ДНЦ}}$ и $N_{2\text{ ДГП}}$.

Задача оптимального выбора структуры потока может решаться с использованием различных критериев. Первый из них характеризует объем перевозочной работы, который измеряется показателем грузооборота Γ . Второй, отражающий эффективность процесса (с позиции перевозчика), есть размер прибыли с учетом потерь на штрафы.

Функциями производительности участка дороги служат часовые объемы пропущенного грузопотока $\Gamma^i(N^{экон})$ и $\Gamma^i(N^{инт})$ соответственно для экономичного и интенсивного сегментов. Эти функции носят нелинейный характер. С увеличени-

ем числа поездов рост потока замедляется из-за перенасыщения участка. Для описания указанной зависимости используем степенную модель изменения производительности при вариациях объема задействованного оборудования – функцию Дугласа-Кобба. Если увеличение грузопотока Γ_1 производится вследствие усилий ДГП, эта функция имеет вид:

$$\Gamma_1(N) = N^{\alpha_1}$$

Зависимость грузопотока от числа поездов, пропущенных по экономической технологии, более слаба. Показатель степени α_2 функции производительности $\Gamma_2(N) = N^{\alpha_2}$ принимает уменьшенное значение.

Пространство всех возможных решений кооперативной игры двух участников – совокупность сочетаний $(N^{\text{экон}}, N^{\text{инт}})$ – представляется в виде диаграммы Эджворта-Боули (рисунок 5.7). Пространство ограничено двумя парами сопряженных систем координат O_1 и O_2 , первая из которых соответствует стратегиям (решениям) ДГП, вторая – стратегиям ДНЦ. Значения величин $N^{\text{инт}}$ и $N^{\text{экон}}$ откладываются на соответствующих координатных осях.

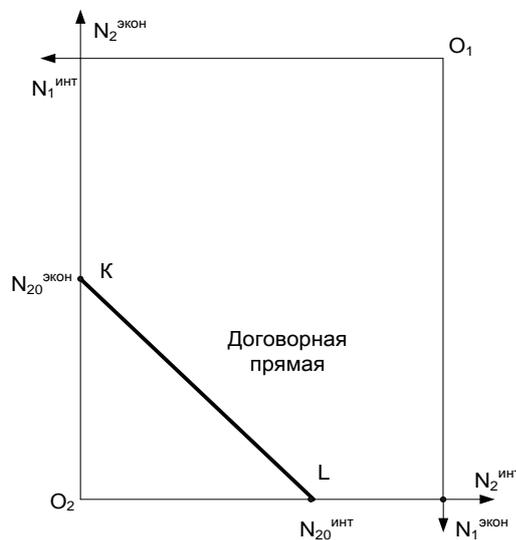


Рисунок 5.7 - Диаграмма Эджворта-Боули для фрагментированного потока

Максимальный объем грузопотока при наличии конкуренции двух игроков достигается на *договорной линии* [98]. Эта линия включает множество стратегий, оптимальных по Парето. Уравнение договорной линии имеет вид:

$$N_2^{\text{экон}} + N_2^{\text{инт}} = N \left(1 + \alpha \frac{\theta_1}{\theta_2} \right)^{-1}, \quad \alpha = \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\alpha_2(1-\alpha_1)},$$

где $\theta_1 = N_1/N$, $\theta_2 = N_2/N$ - доли потока поездов, которые руководитель диспетчерской смены отводит в управление соответственно ДГП и ДНЦ.

Договорной прямой KL соответствует линия максимального грузопотока $[\Gamma'_{\text{макс}} \Gamma''_{\text{макс}}]$ (рисунок 5.8).

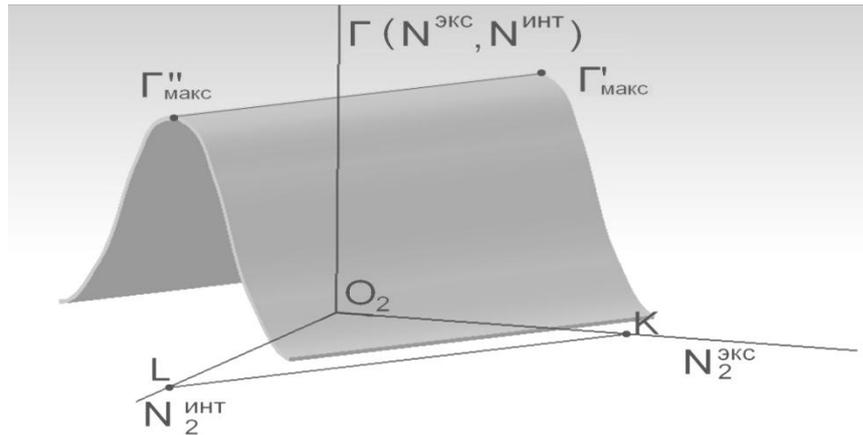


Рисунок 5.8 - Зависимость производительности от структуры потока поездов

Выбор варианта - точки на линии KL - сопряжен с разрешением противоречия между игроками. Число поездов, отданное в управление поезвному диспетчеру, растет при смещении решения вдоль договорной линии по направлению к точке K . В то же время доля потока, отведенная ДГП, падает. При этом уменьшается оценка вклада последнего в процесс улучшения экономического результата, снижается премия. Поэтому принятие окончательного решения требует переговоров между ДГП и ДНЦ, достижения компромисса. Рассмотренный оптимизационный алгоритм может быть реализован на практике, если возложить расчет вариантов, их эффективности и обеспечение диалога между диспетчерами на средство компьютерной поддержки.

5.4.3 Использование экспертных методов в диспетчерских задачах

А. Экспертные методы формализуют логический процесс при решении сложной задачи. Эти методы используются как в работе одного эксперта, так и при

коллективном принятии решений. Наиболее эффективны при решении диспетчерских задач метод анализа иерархий (МАИ) и метод аналитической сети (МАС). Основными идеями, положенными в основу указанных методов, являются иерархическая декомпозиция задачи, определение рейтинга частных факторов и альтернативных решений [74, 273, 274].

Иерархическая схема, полученная в результате декомпозиции, включает главную цель (главный критерий, фокус) и несколько групп (уровней) частных целей или однотипных факторов (рисунок 5.9). В качестве последних выступают альтернативные сценарии поведения (управления) и их свойства. Нижний уровень представлен вариантами A_i реализации пути к достижению цели.

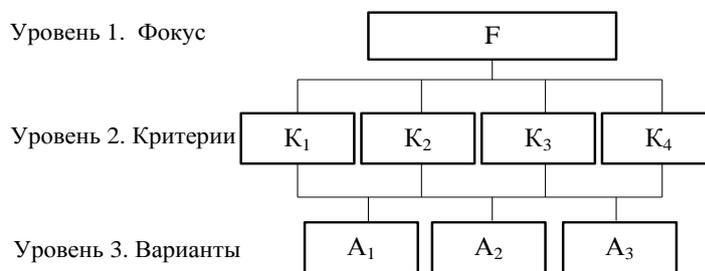


Рисунок 5.9 - Обобщенная иерархическая структура

Иерархические модели, строящиеся в МАИ и МАС, имеют кластерную структуру. Кластеры являются элементарными иерархиями. В пределах кластера оперируют понятием *вектора приоритетов*. При соединении кластеров в систему конструируют *рейтинг альтернатив* на основе указанных векторов.

Оптимизационная задача формулируется следующим образом: найти приоритетность признаков объекта или сценариев его функционирования с позиции их влияния на фокус (главную цель). В процессе решения задачи с использованием МАИ определяют степень вклада элементов самого низкого уровня иерархии – уровня альтернатив – в достижение общей цели. Вектор, отражающий весомость элементов каждого нижестоящего уровня (узлов кластера) по отношению к вышестоящему, и *вектор приоритетов решений* рассчитывают по методике [274].

Оценка приоритетов (весов) элементов производится экспертом путем парных сравнений узлов (факторов). Определяются оценки важности (вероятности) каждого узла по критерию, заключенному в вершине кластера. Аналогично

проводится сравнение кластеров, имеющих общую вершину. При проведении сравнений используется определенная шкала – упорядоченный набор градаций признака. Результаты заносятся в матрицу парных сравнений.

Методология МАИ позволяет разбить большую задачу на ряд малых самостоятельных задач. Благодаря этому, для подготовки решения можно привлечь нескольких экспертов, работающих над локальными задачами, или выполнять этапы процесса одновременно. Например, актуализация иерархической схемы производится для всей предстоящей диспетчерской смены, а проведение процедуры поиска решения – в период ликвидации возникшей нештатной ситуации.

Алгоритмическая схема определения вектора приоритетов выглядит следующим образом. Данные сравнительного анализа признаков, проводимого экспертом, представляются в виде членов матрицы парных сравнений (см. таблицу 5.4).

Таблица 5.4 - Формат матрицы парных сравнений по показателю X

	Признак 1	Признак 2	Локальные приоритеты
Признак 1	1	a_{12}	\bar{x}_1
Признак 2	a_{21}	1	\bar{x}_2

Элемент матрицы отражает силу связи признаков A по заданной дискретной шкале. При этом значение величины a равно $1/A$

Приоритет признака рассчитывается как: $\bar{x}_i = \frac{\bar{a}_i}{\sum_h \bar{a}_i}$, $\bar{a}_i = \sqrt[h]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \dots \cdot a_{ih}}$.

Машинное моделирование позволяет часть операций по заполнению матрицы провести автоматически, используя актуальные данные.

Приоритетность каждого из вариантов решений определяется путем использования процедуры синтеза множественных суждений. Эта процедура основана на взвешивании локальных приоритетов признаков \bar{x}_{jk} весами критериев \bar{x}_k :

$$Y_i = \sum_n \bar{x}_{jk} \cdot \bar{x}_k,$$

где n – число критериев сравнения вариантов.

Глобальный вектор приоритетов Y показывает результат ранжирования альтернатив относительно цели высшего уровня. Методика анализа, разработанная в рамках МАИ, позволяет оценить противоречивость данных из-за субъективных ошибок экспертов путем расчета *индекса согласованности суждений* и минимизировать расхождения.

5.4.4 Решение графической задачи с использованием аппарата МАИ

Рассмотрим, как формализуется задача поиска компромисса в конфликтной управленческой ситуации, когда позиции диспетчеров ДЦУП по выбору регуляционного мероприятия различаются [31]. Для определенности, опишем решение задачи по изменению очередности пропуска поездов по участку, что необходимо для ликвидации сбоя. Процесс выбора очередности формализуется с помощью иерархической модели, приведенной рисунке 5.10. Главной целью (фокусом)

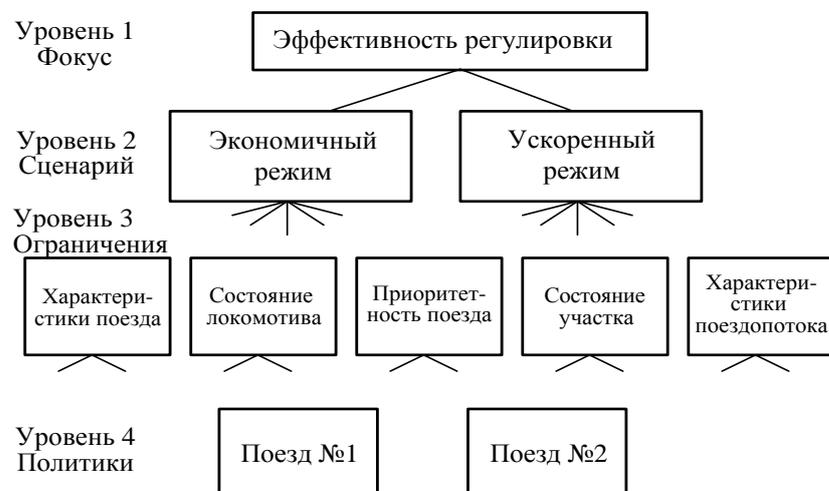


Рисунок 5.10 - Иерархическая модель выбора очередности поездов

служит максимальный экономический эффект при выполнении данной регулировки. В качестве подцелей (субкритериев) выступают режимы движения потока, направленные на достижение максимальной эффективности. Приоритеты (веса) каждого из субкритериев в конкретном рабочем периоде назначает лицо, которое представляет верхнее звено управления, - главный диспетчер. Третий уровень иерархии включает текущие и прогнозные характеристики перевозочного

процесса, а также факторы, определяющие приоритетность поездов в данной конкретной ситуации. Через «входы» этого уровня в задачу вводятся как данные из систем контроля, так и оценки ситуации, которые вырабатывают другие эксперты (работники депо, станций) или вышестоящие руководители.

Положим, решение разрабатывают два лица, позиции которых не совпадают. Диспетчер направления заинтересован в максимально интенсивном пропуске потока, при этом он не концентрирует свое внимание на уровне издержек. В то же время, поездной диспетчер настроен в большей степени на экономичное использование ресурсов. При анализе определяют степень влияния каждого из акторов на ход процесса, используют эти показатели при выработке компромиссных решений. При этом некоторый усредненный план действий разрабатывается с учетом весомости мнения каждого из акторов в служебной иерархии. Приоритетность мнений каждого m -го участника отражается путем введения взвешивающего коэффициента w_{mk} (в интервале $[0...1]$), который показывает уровень компетентности и (или) информированности актора в данном сегменте процесса. Так, к примеру, в области коммерческого оценивания поездов более высоким приоритетом обладает мнение руководителя смены – по сравнению с ДНЦ.

Значения весовых коэффициентов w_{mk} используются для корректировки локальных векторов приоритетов: $x'_{ikm} = \overline{x_{ikm}} \cdot w_{km}$, которые затем усредняются в границах данного уровня (кластера): $\overline{x'_{ik}} = \frac{1}{m} \sum_m x'_{ikm}$. Процедура синтеза множественных суждений в результате дает компромиссный план действий, то есть смягчает конфликт интересов участников.

Описанный способ решения оптимизационной задачи принципиально отличается от способов, основанных на статистическом прогнозировании процесса движения поездов [156]. Такое прогнозирование носит формальный характер, во многих случаях не учитывает важные нюансы процесса. При решении оптимизационной задачи с участием экспертов (диспетчеров) появляется возможность в максимальной степени учесть многоплановость, уникальность ситуации на поли-

гоне. Метод МАИ позволяет при выработке решения учесть и субъективные моменты, такие, как личностные качества персонала станций и машинистов поездов.

5.4.5 Иерархическая модель в задаче выбора оптимальных регулировок

В рамках настоящего исследования разработана иерархическая модель формирования эффективных решений, ориентированная на задачу смягчения конфликтов между диспетчерами [202]. Синтез модели произведен с помощью методики прямого МАИ-анализа; графическая интерпретация ее структуры и связей приведена на рисунке 5.11. Модель содержит пять уровней. Фокусом проблемы является экономическая эффективность пропуска поездов по участку. В качестве критериев второго уровня используется макро- или микро-эффективность. Уровень 3 отражает влияние ограничений, которые накладываются на движение со стороны инфраструктуры и смежных сервисов. К этим ограничениям относятся плановые перерывы, технические и технологические отказы, а также ограничения по рабочему времени членов локомотивных бригад.

Субъекты, которые участвуют (нередко - конфликтуют) в выработке и реализации решений, находятся на уровне 4. Основными акторами процесса текущего управления являются диспетчер направления (ДГП), поездной диспетчер (ДНЦ) и дежурный по станции (ДСП). Каждый из них имеет свои интересы, преследует свои цели, описание которых приведено на уровне 5. В результате влияния совокупности случайных факторов и действий персонала может реализовываться ряд сценариев развития процесса (уровень 6). В частности, это может быть изменение очередности, режима следования грузовых поездов, замена локомотивов и др. Задачей иерархического анализа является определение ряда сценариев развития ситуации и выбор из них наиболее эффективного.

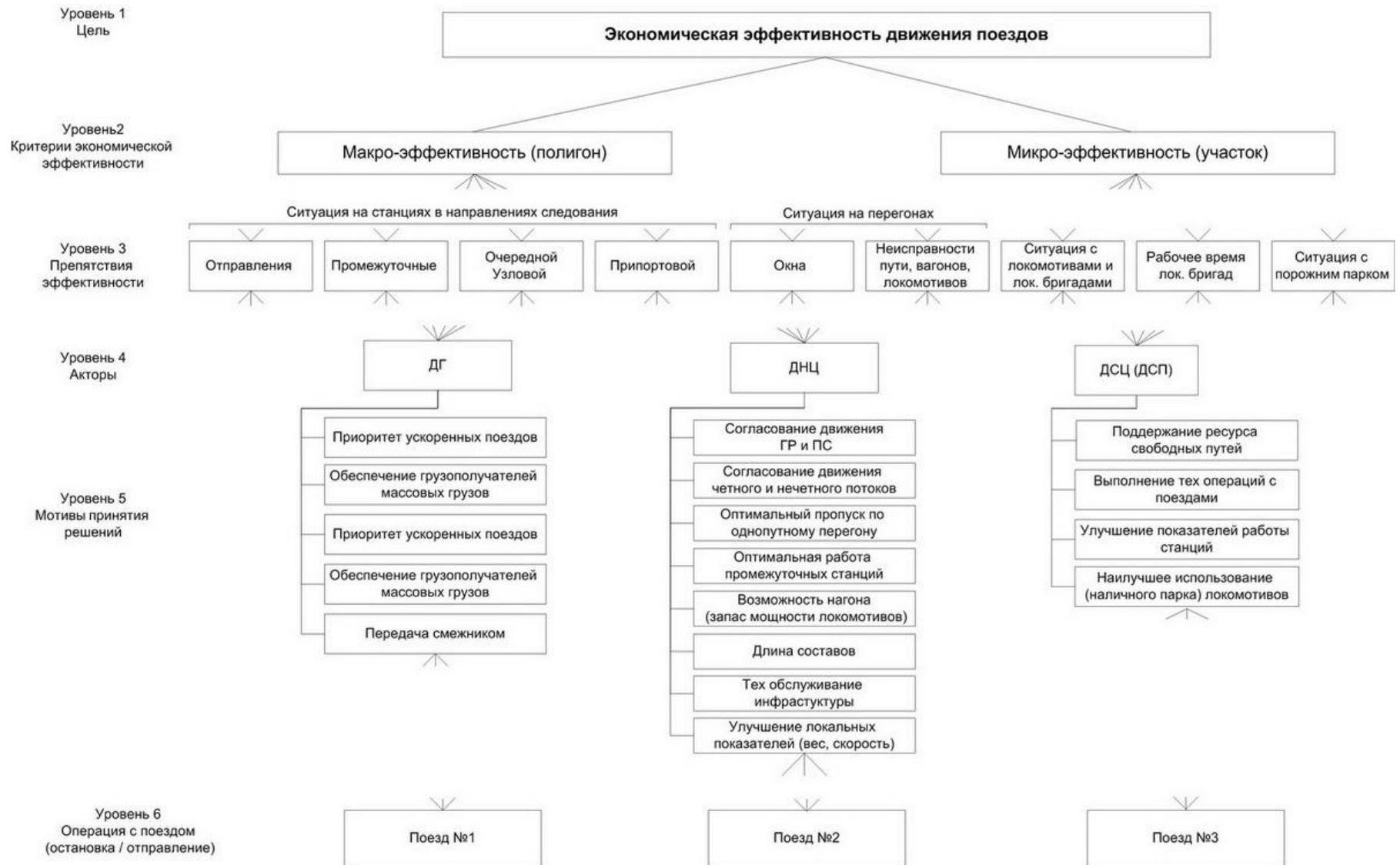


Рисунок 5.11 - Обобщенная иерархическая модель формирования приоритетов мероприятий по корректировке графика

5.4.6 Использование аппарата МАИ при решении задач реального времени

А. При оперативном управлении транспортной системой продолжительность процесса принятия решения не должна превышать нескольких минут. Это требует видоизменения методики экспертного анализа. Некоторые идеи по использованию экспертных методов в оперативной обстановке изложены в [266]. Однако решение рассматриваемой проблемы далеко от завершения. Автором диссертации предпринята попытка использования метода анализа иерархий в задачах поездного диспетчерского управления [202, 214].

Рассмотрим новый алгоритм построения иерархической модели, который отличается от традиционной методики, разработанной Т. Саати. В стандартном варианте МАИ иерархия строится для одного фиксированного сценария. Состав критериев каждого из уровней выбирается расширенным, чтобы учесть всевозможные нюансы развития процесса. Однако при этом размер матриц парных сравнений оказывается большим, что ведет к избыточным затратам времени.

Предлагаемый механизм моделирования включает операцию оперативной перестройки иерархической схемы в условиях быстрых перемен ситуации. К примеру, могут сместиться приоритеты управления. Так, для одного поезда наиболее значимой в данный момент может оказаться коммерческая приоритетность, для другого – техническое состояние локомотива. Информацией о возникновении ограничения владеет поездной диспетчер. Поэтому целесообразно поручить ему выбор вида затруднения, который учитывается в данном эпизоде. Свой выбор диспетчер фиксирует путем ввода соответствующего признака в СППР. Объем операций взаимодействия с компьютером при этом минимален.

Приоритет мнения каждого из ЛПР при выборе регулировочных мер учитывают путем установления соответствующих весов. Например, вес позиции ДГП при принятии решения об отправлении (остановке) поезда на промежуточной станции относительно невысок (0,1-0,2). В то же время, при оценке ситуации на припортовой станции – станции назначения маршрута – голос ДГП должен быть решающим (вес 0,8-0,9). Весомость каждого из критериев 3-го уровня иерархии –

уровня ограничений – оценивает ДГП с позиции обеспечения высокой микро-эффективности. Парные сравнения вариантов регулировок по этим критериям проводит ДНЦ.

Для разгрузки диспетчера - исключения рутинных операций, - построение матриц парных сравнений показателей приоритетности, массы, длины и др. должно выполняться в автоматическом режиме. На ДНЦ возлагается задача оценки поездов лишь по критериям с неполной информационной основой.

Б. В качестве примера использования методологии иерархического анализа рассмотрим ситуацию выбора одного из поездов, который нужно остановить на станции в период действия ограничения. Выбор диспетчер производит между тремя грузовыми поездами. Поезд №1 – контейнерный, имеющий большую длину (100 платформ, длина около 2 км) и относительно небольшую массу (2000 т.). Два других поезда имеют малую длину. Угольный маршрут №2 обладает массой 6000 т., сборный поезд №3 – массой 3200 т. Требуется определить вариант остановки одного из поездов, который дает наименьшие экономические потери для перевозчика.

Допустим, остановка любого из поездов при реализации обгона возможна на одной из станций, где имеются необходимые пути. При принятии решения примем во внимание коммерческую ценность (для перевозчика) указанных поездов (см. второй столбец таблицы 5.5) и дополнительные затраты на оплату энергии, которые возникают в случае остановки поездов (четвертый столбец).

Таблица 5.5 - Сводные данные анализа приоритетности остановки поездов

Номер и тип поезда	Коммерческий вес	Показатель длины поезда	Расходы при остановке, руб	Расчетный приоритет	
				режим интенсивный	режим экономичный
№1 (контейн.)	1,0	1,0	30	3	1
№2 (тяжелый)	0,5	0,7	100	2	3
№3 (сборный)	0,9	0,7	60	1	2

В период следования указанных поездов участок может работать в одном из двух режимов: ускоренного или экономичного пропуска потока. Анализ, проведенный по методике МАИ, показывает, что в первом случае приоритетным вари-

антом регулировки является оставление на станции поезда №3. Если же используется экономичный режим, отсутствует риск отклонений от графика, более обоснованным решением оказывается остановка поезда №1 - контейнерного. Как видим, эффективное решение отличается от традиционно используемого диспетчером, когда контейнерный поезд пропускается первым, – даже если у него есть резерв времени для дальнейшего движения по маршруту.

5.5 Элементы гибкой технологии диспетчерского руководства

5.5.1 Превентивное регулирование движения потока поездов

Эффективным направлением в оперативном управлении движением поездов является реализация превентивных мер, разработанных на основе прогноза развития ситуации [261, 300]. Исследования в этом направлении немногочисленны. В частности, автором работы [147] предпринята попытка решения ограниченной задачи – корректировки движения поездов в период ремонтного «окна» при возникновении отклонений от графика.

Рассмотрим основные аспекты технологии текущего управления грузовым движением на участке большой пространственной протяженности, не ограничиваясь периодами «окон» [50]. Будем полагать, что при профилактике конфликтов диспетчер руководствуется гибкими нормативами графика, использует уровень локальной прибыли в качестве оптимизационного критерия.

Относительная свобода действий диспетчера по корректировке графика реализуется путем целенаправленного изменения межпоездных интервалов, перегонных времен, а также порядка следования поездов [38, 199]. Прежде чем планировать профилактические меры, ДНЦ намечает возможные пространственно-временные зоны (очаги) напряжений (рисунок 5.12), в которых присутствует повышенная вероятность локализации отказов [50]. Например, зоной напряжений становится участок ремонтных работ в период окончания окна, если реальна вероятность его передержки. Аналогичной зоной является станция, на которой возни-

кает нехватка путей для пропуска поездов. Превентивные меры дают наибольший эффект, если их использовать в зонах разрядки, где вероятность отклонений мала.

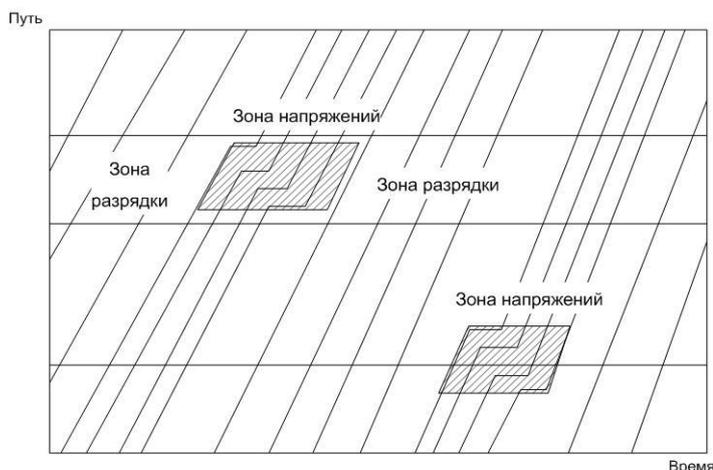


Рисунок 5.12 - Зоны напряжений и разрядки на полигоне поездной работы

Очевидно, если назначить режим с увеличенным интервалом, часть ниток нормативного графика использовать не удастся. Однако съём ниток имеет место и при неконтролируемом процессе возникновения сбоя. Только в последнем случае к потере пропускной способности прибавляется дополнительный расход энергетического ресурса при вынужденных задержках.

Основной проблемой, решение которой позволяет увеличить эффективность профилактических регулировок, является обеспечение надежности прогнозирования зон возникновения отказов. Здесь применяются как методы вероятностного моделирования (в частности, метод ситуационно-эвристического нормирования [143]), так и детерминированные модели и алгоритмы, использующие оперативную информацию и диалог человек - машина [218].

Левую границу очага напряжения следует понимать как момент, начиная с которого внимание участников процесса – диспетчера и машинистов – должно обостриться в ожидании появления препятствия (отказа). Правая граница характеризует момент прекращения мероприятий, которые вводятся для смягчения последствий сбоя. Временной интервал между соседними зонами напряжений представляет собой одну из реализаций случайного процесса накопления скрытых дефектов (отклонений от норм). Для описания потока событий на реальных участках используют аппарат теории Марковских процессов [152].

При прогнозировании отклонений от графика необходимо использовать статистику событий отправления, прибытия поездов и времен хода по перегонам, где имеются зоны напряжений [38, 50]. К примеру, на рисунке 5.13 показана плотность вероятностей распределения межпоездного интервала $I_{вых}$ на выходе перегона (при прибытии на станцию) [93]. Если интенсивность потока возрастает, плотность $p(I_{вых})$ все больше концентрируется в области малых значений.

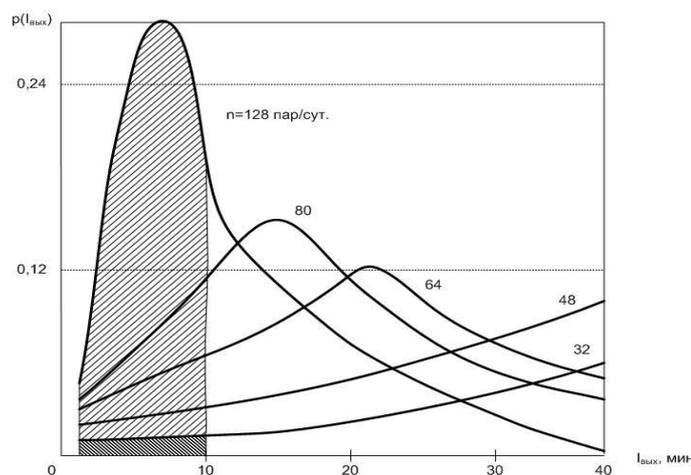


Рисунок 5.13 - Плотность распределения интервалов на прибытия на станцию

При малой загруженности, соответствующей 32 парам поездов за сутки, доля малых интервалов ($I < 10$ мин.) составляет несколько процентов. На графике это отражается сегментом с плотной штриховкой. Если же интенсивность потока велика (соответствует 128 парам), доля малых интервалов и, следовательно, вероятность возникновения неграфиковых остановок возрастает до 40% (сегмент с разреженной штриховкой). Таким образом, подвод поездов к загруженной станции с увеличенным интервалом позволяет снизить процент опозданий.

5.5.2 Приемы эффективного ситуационного поездного управления

Основываясь на наблюдениях, полученных при изучении работы персонала ДЦУП, и рекомендациях специалистов, сформулируем перечень мер, которые эффективны в процессе ситуационного управления движением грузовых поездов:

- полное, своевременное информирование машинистов о ситуации;

- максимально возможное уменьшение числа остановок на тех элементах, где трогание поезда сопровождается повышенным расходом энергии;

- целенаправленное увеличение времени хода на сложных перегонах.

Снижение скорости грузового поезда (группы поездов) по команде, поступающей из ЦУП (*прицельное замедление*), является реакцией на появление внезапного препятствия на пути следования. Локально вводимый резерв используется для подстройки траекторий поездов с целью экономии ТЭР. Например, диспетчеру поступает информация о передержке ремонтного окна. Поезда, которые в соответствии с графиком должны были проследовать беспрепятственно, могут остановиться. Чтобы избежать остановок, уменьшить потерю энергии, диспетчер вправе принять один из вариантов профилактической регулировки: (а) прицельного замедления или (б) увеличения интервала (Рисунок 5.14). Эти корректировки уменьшают число вторичных остановок.

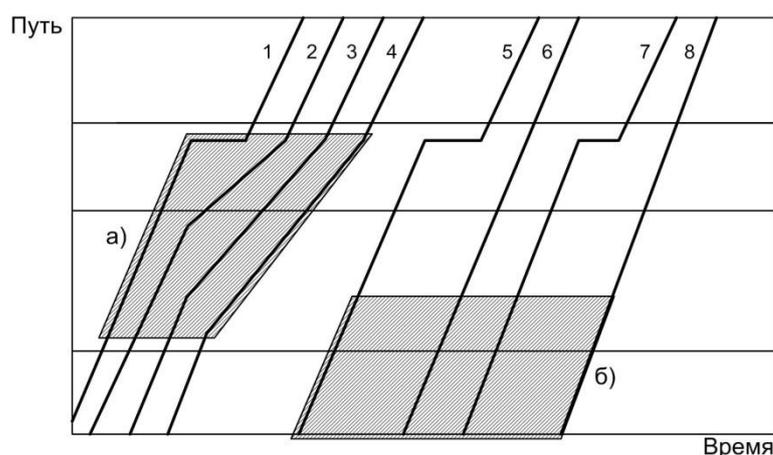


Рисунок 5.14 - Профилактические меры, устраняющие неграфиковые остановки
а) маневр скоростью; б) маневр поездным интервалом

Схема выполнения скоростного маневра с целью предотвращения вторичной остановки иллюстрируется рисунком 5.15. Поезд №2 в момент получения информации об остановке лидера снижает скорость и следует в этом режиме, пока поезд №1 не уйдет на величину минимального интервала $\Delta s_{граф}$.

Определим, какую нужно выбрать скорость v_2' поезда №2 после получения команды на замедление, чтобы он не попал в зону действия запрещающего сигнала.

ла [46]. Такое условие выполняется, если интервал Δs при сближении поездов превышает $\Delta s_{y\delta}$ - протяженность двух блок-участков.

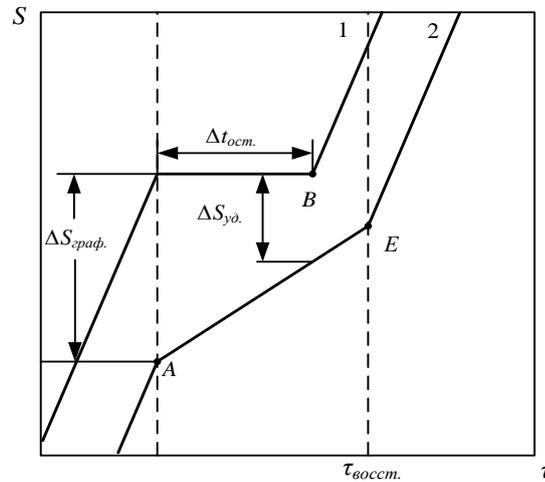


Рисунок 5.15 – Схема реализации прицельного замедления поезда

Условие $\Delta s > \Delta s_{y\delta}$ соблюдается при выборе следующего значения скорости:

$$v_2' < \frac{\Delta s_{y\delta}}{\Delta t_{осм}} \left(\frac{\Delta s_{граф}}{\Delta s_{y\delta}} - 1 \right)$$

Относительная потеря скорости, равная $\delta v_2 = \frac{v - v_2'}{v}$, составляет:

$$\delta v_2 > 1 - \frac{\Delta t_{уд}}{\Delta t_{осм}} \left(\frac{\Delta s_{граф}}{\Delta s_{y\delta}} - 1 \right)$$

Зависимость δv_2 от относительной величины $\frac{\Delta s_{граф}}{\Delta s_{y\delta}}$ (рисунок 5.16)

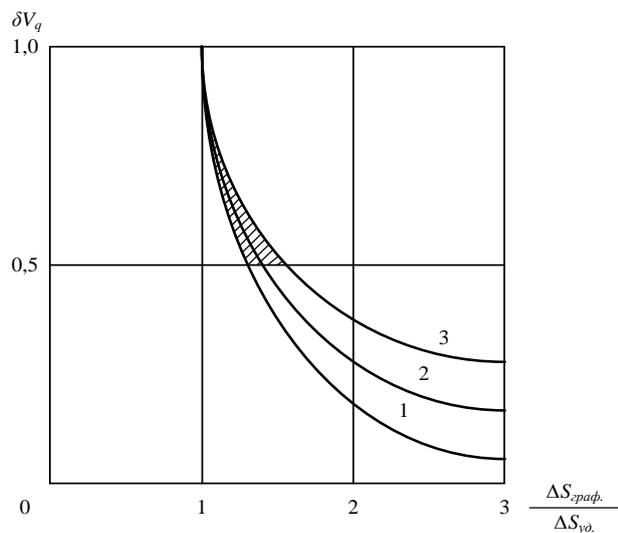


Рисунок 5.16 - Зависимость величины потери скорости поезда от интервала

позволяет заключить, что уменьшение межпоездного интервала ведет ко все более значительной потере скорости. Как правило, скорость поезда №2 не рационально снижать более, чем наполовину. Зона, которая соответствует такому пределу уменьшения скорости, заштрихована.

После трогания поезда №1 (точка *B* на рисунке 5.16) целесообразно сохранить пониженную скорость заднего поезда в течение времени Δt_{BE} , что необходимо для восстановления интервала. К примеру, если интервал равен 10 км и скорость поезда понижена до 40 км/ч, запас времени Δt_{BE} составляет 7,5 мин.

Получим оценку величины экономии при выполнении прицельной регулировки. Положим, корректируется движение груженого поезда массой 6 тыс. т. Если протяженность участка замедленного движения равна 10 км, экономия энергии при снижении скорости с 80 до 40 км/час составит 130 кВтч. Исключение остановки сэкономит еще 250 кВтч. Общий эффект от выполнения регулировки достигнет 380 кВтч.

Как указано в п. 4.4, значительный потенциал экономии содержится в рациональном использовании режима выбега. Удлинение участка выбега сопровождается увеличением времени хода. Расчеты показывают, что такое увеличение является весьма умеренным. Так, например, при следовании поезда по маршруту протяженностью около 400 км. на высокоскоростной магистрали, где режим выбега занимает более двух третей времени, экономия энергии при рациональном управлении достигает 8 проц. [237]. Ход поезда по сравнению с минимумом, реализуемым при использовании режима наиболее интенсивной тяги, увеличивается на 4-8 мин., или на 6 проц. от времени поездки. Аналогичный результат получен в работе [135], где применение режима выбега поезда перед участком с ограничением скорости позволяет сэкономить до 15 проц. энергии.

5.6 Оценка эффективности работы диспетчерского персонала

А. Работников диспетчерского центра мотивируют на эффективное использование подвижного состава, инфраструктуры и энергоресурса. Этому служит система показателей качества работы по пропуску потока поездов. Основными индикаторами, характеризующими качество работы персонала ДЦУП на Российских дорогах, являются участковая скорость и средний вес поезда. Интенсивность использования подвижного состава отражают величинами производительности локомотивов, оборота и простоя вагонов. В системе оценки качества работы отсутствуют показатели расходования энергетического ресурса и финансовых затрат.

Имеются немногочисленные работы, которые исследуют вопрос оценивания качества работы поездного диспетчера в оперативной обстановке (см., например, статьи [157, 257]). Предложено определять качество на основе соответствия фактического проследования грузовых поездов расчетному графику, пассажирских - нормативному. Опорные значения показателей определяются из «идеального» графика движения, построенного до начала смены на основе данных о реальном состоянии участка. Показатели рассчитываются согласно методике ситуационно-эвристического нормирования (СЭМН). Качество управления определяется близостью накопленной балльной оценки, полученной диспетчером за анализируемую смену, аналогичному показателю, которым характеризуется некая «эталонная» смена. Оценивают диспетчерскую смену количеством баллов, которое отражает близость графика исполненного движения нормативному. Недостатками предложенной методологии являются слабая разработанность критерия, а также отсутствие учета факторов, не зависящих от ДНЦ.

Б. Исследования показывают, что качество работы участка коррелирует с объемом энергии, потребляемой на тягу поездов [206]. Объем топлива (энергии) уменьшается при выборе рациональной тактики пропуска потока поездов. Субъектом, непосредственно реализующим указанную тактику, является поездной диспетчер. Поэтому управление расходом топлива следует рассматривать как одну из функций диспетчера – наряду с функциями соблюдения графика

движения и обеспечения безопасности [54]. ДНЦ реализует функцию управления расходом независимо от того, делает он это осознанно или интуитивно.

В качестве показателя эффективности целесообразно использовать *удельный расход топлива (энергии)* в границах круга диспетчерского управления. Фактический удельный расход сравнивается с нормативным, установленным для данного круга на определенный период времени (например, на диспетчерскую смену). Результат сравнения фактического расхода с нормой служит основой для мероприятий по стимулированию работника.

Сформулируем основные положения, на которых строится система оценки качества работы персонала ДЦУП по критерию расходования ТЭР [50]. Базовым элементом служит показатель расхода энергии на тягу за период одной диспетчерской смены (12 часов). Чтобы двенадцатичасовая выборка объективно оценивала качество работы, необходимо в максимально возможной степени снизить влияние случайных факторов, не зависящих от усилий диспетчера. К таким факторам относятся качество функционирования узловых станций, равномерность подхода поездов с соседних участков, наличие ограничений в движении из-за технических отказов.

Нивелирование влияния случайных факторов на результаты контроля может производиться двумя способами. Первый заключается в установлении дифференцированной нормы расхода энергии в границах диспетчерского круга для каждой смены. Норма рассчитывается после завершения смены с учетом реальных характеристик потока поездов, задержек и ограничений. Результат работы ДНЦ по критерию энергозатрат сравнивается с некоторым «идеальным» значением, отражающим специфику данной смены.

Второй способ использует усреднение показателей расходования энергии диспетчером за большой период времени. При этом количество «плохих» и «хороших» смен – с точки зрения стартовых условий, – в среднем, оказывается сопоставимым с аналогичной ситуацией для другого диспетчера. Анализ показателей энергоемкости участков дороги в реальных условиях показал, что усреднения на месячном интервале хватает для получения достаточно объективной сравнитель-

ной оценки работы поездных диспетчеров по критерию энергопотребления. За время наблюдений на протяжении года встречались редкие смены с аномально тяжелыми стартовыми условиями. Наличие одной смены со значительно повышенным расходом энергии слабо сказалось на месячном результате ДНЦ, которому пришлось работать в эту смену.

Усреднение на месячном интервале осуществляется следующим образом. Фиксируются показатели расхода энергии E_i и выполненной работы A_i в границах круга по каждой из смен, в которые работал данный диспетчер. Показатель удельного расхода рассчитывается как отношение суммарных значений объема потребления и работы по всем n сменам данного месяца.

Для решения задачи оперативной корректировки движения необходимо иметь показатель потребления за короткий период времени. В настоящее время минимальный интервал съема показателей, используемых при оперативном управлении, составляет 3 часа. Очевидно, интервал контроля энергии не должен превышать указанного значения.

Результаты эксплуатации системы оперативного управления на опытном полигоне показали отсутствие реальной возможности – по крайней мере, на начальном этапе использования энергосберегающей технологии, – реагирования на столь интенсивно поступающую информацию. Поэтому в качестве минимального интервала интегрирования принято значение 12 часов, соответствующее продолжительности диспетчерской смены.

В. В качестве опорной величины при контроле работы персонала ДЦУП используется *нормативный удельный расход энергии* на тягу поездов в границах диспетчерского круга [42]. На начальном этапе функционирования системы оперативного управления расходом в качестве нормы выступает усредненное значение по ряду фактических показателей, достигнутых разными поездными диспетчерами, которые обслуживают данный круг.

Качество работы j -го поездного диспетчера по критерию расходования энергии оценивается месячным удельным расходом b_j . Нормативный расход b_n

определяется как среднее значение ряда показателей, полученных для всех ДНЦ данного круга. В стандартной ситуации – наличии цикла из четырех диспетчерских смен – по итогам месяца составляется ранжирный ряд вида: b_A, b_B, b_B, b_T - в порядке возрастания месячных показателей расхода для всех смен. Диспетчеры A и B , показатели которых меньше нормативного, считаются достигшими лучших результатов в расходовании энергии на тягу.

Нормативное значение удельного расхода, которое установлено рассмотренным способом, позволяет достаточно эффективно организовать стимулирование усилий персонала ДЦУ к экономии энергии на тягу. Однако служить плановым показателем и ориентиром для совершенствования технологии в долгосрочном плане не может.

На длительных интервалах времени – декадном, месячном – неравномерность потока поездов и случайный характер ограничений сглаживаются. Это позволяет определять нормативное значение расхода энергии. Что касается более коротких интервалов времени, в частности, диспетчерской смены, выполнить прогноз намного сложнее. Причиной этого служит ярко выраженная специфика ситуации в каждой смене. Возможность объективного нормирования показателя расхода энергии возникает, если использовать динамическую модель потребления энергии, наполняемую оперативными данными о движении (см. п. 4.2).

Таким образом, констатируем, что наиболее объективным результатом контроля расхода энергии в границах участка дороги оказывается в случае, если нормативное его значение устанавливается с учетом всей совокупности реальных факторов, действовавших в период диспетчерской смены. Максимум объективности нормы, установленной для центра управления, достигается в том случае, если при ее расчете исключить объемы энергии, которые связаны с отказами подвижного состава, работой станций и др. [41].

5.7 Исследование эффективности работы диспетчеров в реальных условиях

Целью исследования являлось определение связи показателей расхода электроэнергии на тягу с качеством работы поездных диспетчеров, уровнем их профессиональной подготовки. Опытный полигон, на котором проводилось исследование, лежит в границах ст. Бира – ст. Губерово Дальневосточной железной дороги. Указанный участок – часть Транссибирской магистрали – имеет длину 531 км. Участок охватывается двумя диспетчерскими кругами: Бира-Хабаровск и Хабаровск-Губерово.

Нами проведено исследование динамики показателей расхода энергии диспетчерскими сменами на отчетных – месячных – интервалах. Определялись объем выполненной работы и расход энергии по каждой смене. Показатели по всем сменам за отчетный месяц суммировались. Данные, которые характеризуют расход энергии каждым из ДНЦ, сведены в таблицы 5.6, 5.7.

Как явствует из приведенных данных, на круге Бира-Хабаровск лидировали по критерию энергопотребления диспетчеры Путрик, Ларионов и Григорьев, на круге Хабаровск-Губерово - Бубело и Кононец.

Таблица 5.6 - Удельный расход энергии на круге Бира – Хабаровск

	январь		февраль		март		май	
	удель. расход	место						
Антипов И.	113,1	2	126,5	2	120,3	4	-	-
Довиденко В	-	-	-	-	110,6	2	108,5	4
Григорьев А.	112,1	1	130,9	4	-	-	106,8	2
Краснов И.	-	-	126,9	3	118,4	3	107,3	3
Ларионов П.	124,6	3	-	-	109,1	1	-	-
Путрик Е.	-	-	124,5	1	-	-	106,6	1

Таблица 5.7 - Удельный расход энергии на круге Хабаровск - Губерово

	декабрь		январь		февраль		март		май	
	удель. расход	место								
Батуренко О.	131,4	1	-	-	153,0	4	-	-	137,5	4
Бубело Н.	146,1	2	151,9	1	150,3	2	135,3	1	133,9	2
Дюльдин Р.	-	-	154,2	2	-	-	-	-	-	-
Морозова О.	-	-	164,9	4	-	-	138,7	3	-	-
Степанюк Б	149,8	3	155,9	3	145,5	1	141,7	4	134,6	3
Кононец С.	-	-	-	-	151,6	3	135,6	2	131,1	1

Чтобы оценить соответствие результатов по расходу энергии общему профессиональному уровню работы диспетчеров, выполнен опрос руководителей ДЦУП. Каждому из опрашиваемых предлагалось расположить фамилии диспетчеров в порядке возрастания качества управления ими потоком поездов. Результаты опроса первой группы приведены в таблице 5.8. Опрос показал, что оценки

Таблица 5.8 - Ранжирование диспетчеров круга Бира-Хабаровск

ФИО диспетчера	Уровень, указанный руководителем			
	ДЦУ Б.	ЗамДЦУ А.	ЗамДГ Х.	ЗамДГ И.
Антипов И.	3	4	4	2
Григорьев А.		3	3	
Краснов И.		6	5	
Кузьмин Н.		2		
Ларионов П.	1	1	1	1
Путрик Е.	2	5	2	3

руководителей в достаточной степени соответствуют результатам усилий по экономии энергии. Так, к лидерам, имеющим наиболее высокий профессиональный уровень, причислены Ларионов и Путрик. Таким образом, следует признать объективную оценку, которая основана на учете данных о расходе энергии, адекватной общему уровню работы поездного диспетчера.

Исследования показывают, что потенциал экономии энергоресурса более, чем на половину, зависит от усилий ДНЦ. Рациональное руководство движением дает значительно больший суммарный эффект экономии, чем улучшение управления единичным поездом. Каждый процент энергии, сэкономленный диспетчером в течение 12-часовой смены, в десятки раз весомей процента, сэкономленного машинистом. За сменный период диспетчер грузонапряженного участка управляет (косвенно) потоком энергии, который составляет не менее 500 тыс. кВтч.

Анализ статистики показывают, что средняя частота появления неграфиковых задержек при следовании грузового поезда в границах участка обслуживания одной локомотивной бригадой (300 км, Транссибирская магистраль) составляет не менее двух единиц. Сверхнормативный расход энергии на тягу поездов при пропуске 70 пар поездов превышает 6,5 млн. кВтч ежегодно. Устранение хотя бы трети задержек путем эффективного диспетчерского управления приведет к экономии более чем 2 млн. кВтч электроэнергии.

Выводы по разделу 5

1. Необходимыми функциями диспетчерской СППР являются выбор модели, адекватной текущей ситуации, и определение оптимального решения по корректировке графика движения с использованием критериев пунктуальности и экономической эффективности.

2. Расчетное время при построении прогноза развития ситуации на протяженном участке (300 км и более), определении оптимальной регулировки не превышает одной минуты при использовании модели движения мезауровня и приближенных алгоритмов, в частности, эффективных эвристик.

3. Использование теоретико-игровой и иерархической моделей, аппарата МАИ позволяет при поиске рациональных диспетчерских решений учесть трудноформализуемые факторы – коммерческие, личностные и др.

4. Сочетание режимов прицельного ускорения и замедления движения поездов – адаптационный механизм профилактики отклонений - дает значительный

вклад в экономию текущих эксплуатационных затрат (более 5 проц.) за счет снижения расхода энергии.

5. Эффективность процесса экономии энергии более, чем на половину, зависит от усилий ДНЦ. Поэтому энергетический критерий обязательно должен быть введен в систему показателей работы диспетчерского персонала.

6. Потенциальная экономия энергии в границах участка протяженностью 300 км магистрального железнодорожного направления при использовании разработанной методики гибкого управления движением смешанного потока поездов превышает 2 млн. кВтч за год.

6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ

6.1 Постановка задачи оптимизации по экономическому критерию

Качество функционирования компании - железнодорожного перевозчика - оценивается, в первую очередь, с точки зрения удовлетворения запросов пользователей. С другой стороны, используются экономические критерии, которые служат для обеспечения эффективности процесса ее функционирования. Экономической целью компании является максимизация прибыли. Это достигается путем увеличения объема перевозок (доходной части) и улучшения эффективности использования инфраструктуры и подвижного состава - снижения затрат. Оперативное управление в состоянии влиять на обе компоненты, что должно быть отражено в модели формирования экономического результата [40].

Использование экономических критериев в задачах оптимизации процессов на железной дороге идет по двум направлениям [46]. Первое эффективно при оценке пассажирского движения, в котором возникают отклонения от графика. В ряде работ каждой задержке поезда приписывается дополнительный расход денежного ресурса. Второе направление исследует экономический результат выполнения грузовых перевозок в макро-масштабе – масштабе сети. При этом анализируется баланс доходов и расходов перевозчика. Разработок в области микроэкономики движения поездов неоправданно мало. Задачи использования экономической оценки при определении приоритетов пропуска поездов исследуются в [30, 245, 271].

В условиях большой загруженности инфраструктуры возникают отклонения от графика движения, что сопровождается появлением дополнительных затрат и штрафов. Корректирующие действия, направленные на устранение отклонений, ведут к снижению экономических потерь. При выборе регулировки решается оптимизационная задача, критерием служит *локальный экономический результат* деятельности перевозчика.

Основная часть усилий поездного диспетчера нацелена на исключение задержек, что подразумевает приоритет временного критерия качества принимаемых решений. Такой подход в грузовом сегменте нередко дает малоэффективные решения. В ряде случаев, когда предотвращается конфликтная ситуация, чреватая большим перерасходом ресурсов, задержка поезда приносит гораздо меньший ущерб – по сравнению с ускоренным пропуском.

Показатели качества движения поездов слабо ориентированы на решение задач управления реальным временем. С целью обоснования критериев, эффективных в процессе диспетчеризации, представим модель формирования экономического результата, которая ориентирована, главным образом, на грузовой сегмент.

В традиционной постановке задачи критерием считают *суммарные зависящие расходы* по всем поездам, которые следуют в границах участка $\sum_i P_i \rightarrow \min$ [92]. Величина P_i включает расходы по пропуску поезда, потери, связанные с потенциальными штрафами, а также вероятную упущенную прибыль из-за снижения оборота вагонов. Чтобы получить оптимальное графическое решение, в экономико-математической модели целесообразно использовать критерий *приращения общего расхода* по всем регулировкам:

$$\sum_i \Delta P_i \rightarrow \min \quad (6.1)$$

Нерациональные диспетчерские регулировки могут вызывать снижение доходной части D экономического результата из-за уменьшения числа пропущенных грузовых поездов. Поэтому поиск оптимальных решений должен основываться на более полной модели, отражающей формирование прибыли в процессе продвижения потока поездов. Целевой функцией, используемой при разработке оптимального плана пропуска поездов, в общем случае является *локальный экономический результат* : $\sum_i \Pi_i \rightarrow \max$.

Задача оптимизации пропуска поездов по участку железной дороги при обеспечении динамичного реагирования на возникающие отклонения формулируется следующим образом. Требуется определить *порядок следования и скоростные траектории грузовых поездов*, которые планируются к пропуску по участку в

предстоящий заданный период времени, *при условии обеспечения минимума зависящих расходов и максимума доходов* [56].

6.2 Экономическое оценивание процесса движения пассажирских поездов

Качество функционирования комплекса пассажирских перевозок может рассматриваться в двух аспектах [212, 233]. Первый аспект предполагает оценку степени удовлетворения запросов пассажиров; при этом применяют критерии затрат времени (time cost), числа и продолжительности задержек (lateness level). Обобщенной оценкой качества управления в пассажирском сегменте нередко служит показатель «уровень надежности графика» (train operating reliability) [80].

Второй аспект касается оценивания качества функционирования компании–перевозчика. Организация перевозочного процесса, технология оперативного управления должны обеспечивать резистентность к малым отклонениям траекторий движения транспортных средств от графика (delay propagation resistivity) и устойчивость (schedule robustness) - способность быстрого возврата к нормальному функционированию после ликвидации причины сбоя.

Обширный круг работ по проблеме оперативного управления ориентирован на интенсивное пассажирское движение, которое развито в странах Европы и в других регионах с высокой плотностью населения. В процессе поиска оптимальных регулировок обычно требуют минимизации *совокупной задержки поездов по прибытию на станции* или *средней величины опоздания* [291]. При оптимизации графика пригородного или внутригородского движения используют также критерий *максимальной равномерности расписания* [77].

Число предложенных ранее критериев оптимизации движения пассажирских поездов достигает тринадцати [275]. Основным недостатком этих критериев является игнорирование масштаба ущерба, нанесенного пользователям опозданиями. С целью устранения недостатка, предложено [297] использовать показатель «*накопленная задержка*» (cumulated passenger delay) $d(T)^{ко.мп}$, который учитывает

поток пассажиров, задержавшихся в пути, и число пассажиров, которые опоздали на стыковые поезда в пунктах пересадок:

$$d(T)^{комн} = \sum^K \sum^I \left[\Delta_{ki}^{проб} P_i + \sum^J H(\Delta_{ij}^{неп}) P_{ij} \tau_j \right]$$

При расчете общих потерь суммируются задержки пассажиров, перевозимых во всех поездах I . При этом учитывается число пассажиров P_i , которые понесли потери на беспересадочных маршрутах, и P_{ij} , - потерявших время вследствие ожидания пересадок J . Функция $H(\Delta_{ij}^{неп})$ принимает значение 1 в случаях, когда ожидание пассажиров следующего поезда составляет τ_j .

Некоторые авторы, понимая ограниченность такого подхода, пытаются ввести определенные ценовые показатели, которые отражают удовлетворенность пассажиров в перевозках. Так, в [219, 243] в качестве целевой функции $G(S_x, S_n)$ при поиске рационального решения используется функция штрафов – взвешенная сумма отклонений $\Delta t_{ij} = t_{ij} - t_{ij}^н$ расчетных моментов t_{ij} прибытия на станции от графиковых моментов:

$$\min G(S_x, S_n) = \sum_{i=1}^N [\delta L_+ \Delta t_{ij}^+ + \delta L_- \Delta t_{ij}^-],$$

где δL_+ , δL_- - штрафы соответственно за опоздание и опережение поезда.

6.3 Показатели качества грузового движения

Макроэкономическая эффективность движения грузовых поездов оценивается по показателям годовых эксплуатационных расходов, экономического эффекта и сбережения ресурсов [17]. В качестве индикаторов, характеризующих качество текущей работы дороги, используются величины участковой скорости, средней массы поезда, расчетного и фактического числа пропущенных поездов. Эти показатели малоэффективны при решении локальных диспетчерских задач. Нередко такой "инструментальный" подход препятствует действиям, направленным на получение максимальной прибыли. Опубликован ряд работ (в частности,

[18, 75, 266, 280]), в которых намечены контуры микроэкономического подхода к решению задач оперативного управления.

Качество следования пассажирского поезда определяют по степени приближения фактического расписания к нормативному (графиковому) на всех остановках. В грузовом движении пунктуальность проследования поездами отдельных пунктов имеет смысл, отличный от точности соблюдения расписания. Грузовой график акцентирует внимание на ограниченном числе точек – технических и узловых станциях. Траектории движения между этими точками могут быть различными. Имеющиеся степени свободы (добавки времени, развитая инфраструктура), в принципе, позволяют оптимизировать траекторию каждого из поездов.

Показателями качества работы грузового сегмента выступают использование пропускной способности (train operating productivity), эксплуатационные расходы (cost-effective operating) и прибыль при пропуске потока поездов. При анализе влияния изменений объемов работы на результат перевозок разделяют номенклатуру расходов на две группы: переменные и условно-постоянные.

Определение экономических результатов деятельности Российских железных дорог производят в соответствии с положениями метода расходных ставок [98]; этот метод используют также при оценивании эффективности организационных, технических, технологических мероприятий. К объемным показателям относят величины вагоно-километров, тонно-километров брутто, числа погруженных вагонов и т.п. Качественными показателями являются среднесуточный пробег вагонов и локомотивов, средняя масса поезда, участковая и техническая скорости, время оборота грузового вагона.

Детализированная система единичных норм расходов на измерители поездной работы (система ЕНР, [91]) разработана для решения оптимизационных задач. Измерители в системе ЕНР объединяют в три группы:

- энергетические: механическая работа сил тяги, сопротивления движению и израсходованный энергоресурс;
- временные: локомотиво-часы, вагоно-часы, бригадо-часы;
- пробежные: локомотиво-, вагоно- и тонно-километры.

Величину затрат по пропуску поезда представляют как суммарный расход, исчисляемый в системе ЕНР [9]:

$$P = (N_{ваг}e_{ваг} + N_{лок}e_{лок} + N_{бр}e_{бр})T + A_3e_3, \quad (6.2)$$

где $N_{ваг}$, $N_{лок}$, $N_{бр}$ - число вагонов, локомотивов и бригад;

$e_{ваг}$, $e_{лок}$, $e_{бр}$ - расходные ставки соответственно по вагоно-часу, локомотиво-часу, бригадо-часу;

A_3 , e_3 - объем и стоимость единицы потребленного энергоресурса.

В качестве критерия оптимальности решений при проектировании новых и модернизации действующих линий используют оценочную энергетическую модель [133]. В суммарных расходах выделяют денежные затраты на тягу поездов, а также на ремонт подвижного состава и пути (закрывающий член):

$$P = (A_3e_3 + Te_1) + A_w e_2 + A_m e_3 \quad (6.3)$$

Последние составляющие полагают пропорциональными работе сил сопротивления движению поезда A_w и работе тормозных сил A_m . Показано, что эти составляющие слабо меняются при изменении условий пропуска, что служит основанием для упрощения выражения (6.3):

$$P = A_3e_3 + Te_1 \quad (6.4)$$

На зарубежных дорогах (в частности, в Европе) часто применяют временные критерии качества пропуска грузовых поездов [266].

Попытка использования экономического показателя при оценивании качества пропуска грузовых поездов предпринята в [18]. Рассмотрена прибыль Π от использования одной нитки графика как разность между доходом перевозчика $D_{мар}$ и суммарным расходом P на пропуск поезда по маршруту:

$$\Pi = D_{мар} - P \quad (6.5)$$

Существенным недостатком предложенной экономической модели является отсутствие учета потери ресурсов (главным образом, энергии) на каждом отклонении от графика. В работе [176] предложен критерий, учитывающий временные и энергетические характеристики.

Вопрос использования эффективных критериев оценки оперативной работы в ОАО «РЖД» до сих пор остается проблемным. Так, в основополагающем документе «Единый технологический процесс железных дорог» [64] отсутствуют четкие экономические критерии.

6.4 Модель формирования экономического результата грузовой перевозки

Эконометрическая модель перевозки отражает процесс дискретного позиционирования поезда в пространстве "координата – время – стоимость" [40]. Траектория изменения состояния объекта представляется совокупностью точек, каждой из которых приписывается пространственное (станция или контрольный пункт), временное положение и некоторый экономический показатель. В качестве такого показателя используется величина текущей разности доходной и расходной компонент, или *локальная прибыль* Π . Новое (накопленное с начала перевозки) значение этой величины фиксируется в точке, соответствующей окончанию каждой очередной операции [198].

Траекторию изменения экономического результата при движении поезда по маршруту отобразим в координатах "время – прибыль" (рисунок 6.1). Отметки на шкале времени соответствуют моментам начала и окончания операций безостановочного следования по участкам (элементы графика AB , $A'B'$, CD , $C'D'$) и обслу-

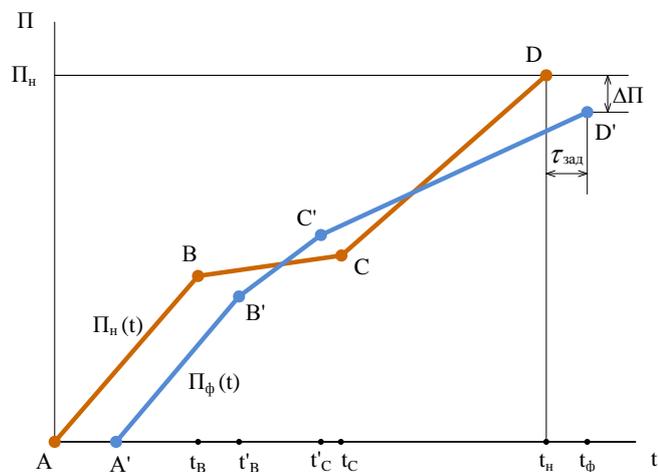


Рисунок 6.1 - Формирование экономического результата при движении поезда

живания на станции ($BC, B'C'$). Ординаты точек показывают значения текущей прибыли, накапливаемой к соответствующим моментам времени: $\Pi_n(t)$ - при графиковом (нормативном) движении, $\Pi_\phi(t)$ - при фактическом движении. Величина отклонения фактической прибыли $\Pi_{\phi i}$ от нормативной Π_{ni} при окончании любой операции m_i служит наглядной оценкой качества процесса продвижения поезда.

В рассматриваемом примере поезд отправляется с исходной станции с задержкой AA' , выполняет первую операцию – проследование участка AB – с нормативной скоростью. Потенциальная прибыль (ордината точки B') оказывается сниженной из-за вероятного штрафа за опоздание в доставке груза. Обслуживание на станции (элемент $B'C'$) производится в первоочередном порядке (укороченный станционный интервал относительно нормативного значения $t_B t_C$), благодаря чему обеспечиваются улучшение графиковой дисциплины, увеличение показателя Π . Однако на участке CD условия не благоприятствуют нормальному пропуску, возникают задержки. В результате поезд прибывает на конечную станцию с опозданием $\tau_{зад}$ и экономическим результатом, сниженным на величину $\Delta\Pi$ относительно норматива. Уменьшение результата возникает, главным образом, из-за неграфиковых остановок, на выполнение которых расходуется значительный объем дорогостоящего ресурса, – топлива или электроэнергии.

Описанная модель работоспособна и в случаях, когда поезд проходит часть маршрута нестандартным (в т. ч., круглым) путем вследствие затруднений с пропуском потока. При этом часть кривой $\Pi_n(t)$ заменяется новой (нормативной) зависимостью, соответствующей ходу по круглому пути.

Покажем, каким образом прогнозируется экономический результат перевозки с учетом вероятного опоздания поезда по прибытию на станцию назначения и штрафа за задержку доставки груза. Вначале отметим, что если грузовой поезд проследовал по маршруту AB в стандартных (нормативных) условиях – без потерь времени и дополнительных эксплуатационных расходов, - экономический результат при завершении перевозки Π_0 составляет:

$$\Pi_0 = D_0 - P_0, \quad (6.6)$$

где D_0 - плата перевозчику за услугу по предоставлению инфраструктуры;

P_0 - расходы, понесенные перевозчиком - владельцем инфраструктуры.

В реальных условиях возникают затруднения (или улучшения) в формировании и пропуске поезда, что приводит к изменению результата. Доходная часть изменяется на величину ΔD в случае применения штрафных санкций за задержку доставки груза или получения бонуса за поступление груза «точно в срок». Расходная часть увеличивается на ΔP вследствие задержек. Экономический результат с учетом приращений дохода и расхода составляет:

$$\Pi = (D_0 + \Delta D) - (P_0 + \Delta P) \quad (6.7)$$

Допустим, на момент, когда определяется прогноз прибытия на конечную станцию, поезд находится в точке X маршрута. Прогнозируемая оценка величины результата на станции прибытия определяется следующим образом. Предположим, на обеих частях участка в границах маршрута (AX и XB) имеются нарушения графика, что вызывает изменение доходной и расходной частей. Отклонение фактического результата Π от Π_0 при прибытии на станцию назначения B определяется накопленными – до момента проследования указанной точки (на участке AX) - компонентами дохода (ΔD_{AX}), расхода (ΔP_{AX}) и аналогичными величинами для оставшейся части маршрута XB :

$$\Delta D = \Delta D_{AX} + \Delta D_{XB}; \Delta P = \Delta P_{AX} + \Delta P_{XB} \quad (6.8)$$

Пусть поезд прибывает в точку X с задержкой и затем следует до станции B , выдерживая графиковую скорость (рисунок 6.2). Если опоздание на станцию превысит некоторый порог, перевозчик уплачивает штраф. Экономическая потеря, которую несет компания, включает компоненту $-\Delta D_{XB}$:

$$\Delta \Pi = -\Delta D_{XB} - \Delta P_{AX} \quad (6.9)$$

Если же имеется возможность сократить опоздание на участке XB (режим нагона), потерю удастся снизить. В этом случае:

$$\Delta \Pi = -\Delta P_{AX} \quad (6.10)$$

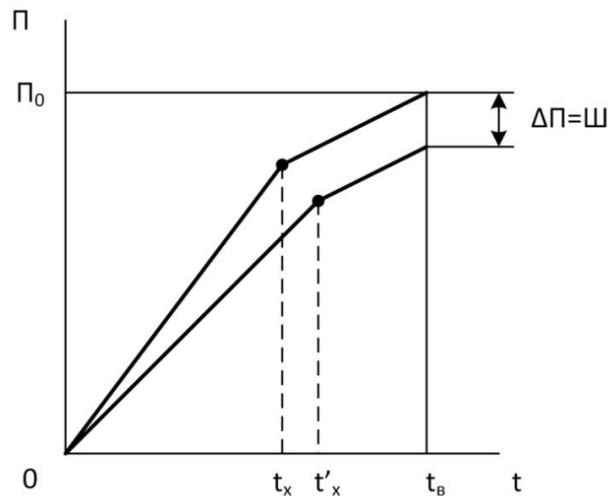


Рисунок 6.2 - Пример формирования экономического результата перевозки

Граница между постоянной и зависящей частями расходного показателя условна. В задаче выбора вариантов регулировки целесообразно к зависящим относить затраты, непосредственно связанные с производительной работой локомотива, технических средств и персонала станций, где производится обслуживание поезда, а также амортизационные расходы по этим средствам.

6.5 Критерий оптимальности в задаче оперативной корректировки графика

Основываясь на предложенной модели, сформулируем *обобщенный показатель эффективности* действий, которые направлены на рациональный пропуск грузовых поездов в условиях возмущений. Как и ранее, будем считать, что экономический результат от пропуска потока поездов - *локальная прибыль П* – есть часть полной прибыли перевозчика, которая соотносится с вкладом рассматриваемого конкретного участка дороги в продвижение поездов по всему маршруту:

$$П = Д - Р, \quad (6.11)$$

где $Д$ и $Р$ – доли дохода и расхода, приходящиеся на данный участок.

При возникновении случайной задержки или целенаправленной остановке поезда по команде диспетчера экономический результат от перевозки снижается на величину:

$$\Delta П = \Delta Д + \Delta Р, \quad (6.12)$$

где ΔD и ΔP - уменьшение доходной части и увеличение расхода.

При фиксированной провозной плате снижение результата составляет:

$$\Delta \Pi = (\Delta D_{\text{ваг}} + \Delta D_{\text{лок}} + \Delta D_{\text{штраф}}) + \Delta P_{\text{аморт}} + \Delta P_{\text{э}}, \quad (6.13)$$

где $\Delta D_{\text{ваг}}$, $\Delta D_{\text{лок}}$, $\Delta D_{\text{штраф}}$ - потери из-за малого оборота состава и штрафов, $\Delta P_{\text{аморт}}$ - дополнительные затраты на амортизацию вагонов и локомотива.

Полученную величину изменения локальной прибыли предлагается рассматривать в качестве критерия, используемого при выборе рациональной регулировки. Оптимальным считается решение, которое обеспечивает достижение минимального значения потерь по всем поездом: $\sum_i \Delta \Pi_i \rightarrow \min$.

Типовой задачей, которую решает диспетчер, является выбор одного поезда из наличной совокупности, первоочередная отправка которого (или остановка) даст наилучший экономический результат для перевозчика. Положим, выбирается один из двух поездов, прибывших на участок управления с опозданием. Чтобы принять обоснованное решение, необходимо сравнить значения результата, которыми характеризуется перевозка грузов обоими поездами по всему маршруту AB :

$$\Delta \Pi = \Pi_2 - \Pi_1 = (D_{02} - D_{01}) - (P_{02} - P_{01}) + (\Delta D_2 - \Delta D_1) - (\Delta P_2 - \Delta P_1), \quad (6.14)$$

где индексы 1 и 2 указывают на принадлежность показателей соответствующим поездам. Если прогнозируемый экономический результат от доставки груза вторым поездом превышает аналогичный показатель первого поезда ($\Delta \Pi > 0$), целесообразно приоритет при отправлении отдать поезду №2.

Очевидно, система оперативного управления влияет только на составляющие, которые отражают *приращения* доходов и расходов. Поэтому оценку выигрыша от регулировочного мероприятия проводим в соответствии с выражением (6.14), из которого исключены условно-постоянные компоненты:

$$\Delta \Pi = (\Delta D_2 - \Delta D_1) - (\Delta P_2 - \Delta P_1) \quad (6.15)$$

Действительно, сама по себе разница $(D_{02} - D_{01})$ в оплате, полученной от компании-оператора, не может служить мотивирующим фактором при определении приоритетности поезда. Вполне реальна ситуация, когда обязательства пере-

возчика по доставке (и санкции за задержку) различных грузов одинаковы, несмотря на отличие тарифов [35].

При исключении из рассмотрения условно-постоянной расходной части преодолевается проблема отнесения на конкретные поезда перманентных затрат по содержанию инфраструктуры. Выбор регулировки основывается только на оценке уже накопившихся потерь, затрат на преодоление будущих задержек и дополнительных расходов, связанных со штрафами или ликвидацией опоздания грузового поезда по прибытию на конечную станцию.

В тех случаях, когда время задержки поезда в пути следования не выбивает его из графика и риск выплаты штрафа за опоздание отсутствует, при выборе оптимального варианта сравнивают лишь зависящие расходы:

$$\Delta\Pi = \Delta P_1 - \Delta P_2 \quad (6.16)$$

Анализ соотношения значений показателя $\Delta\Pi$ позволяет обосновать очередность отправления, остановки (бросания) поездов одного пакета или выбрать наилучшее место выполнения регулировки. Полученный синтетический показатель приводит к одному знаменателю все возможные виды грузовых перевозок и категорий поездов – от высокодоходных: контейнерных, ускоренных, - до низкодоходных, которые перевозят массовые грузы (энергоносители, инертные материалы и др.).

Изменение экономического эффекта $\Delta\Pi_i$ предлагаем использовать в качестве целевой функции при решении оптимизационной задачи [40]. На первом шаге моделирования исключаются те регулировки, которые приводят к отрицательным значениям эффекта:

$$\Delta\Pi_i = (\Delta D_i - \Delta P_i) < 0, \quad (6.17)$$

где ΔD_i - эффект от более раннего снятия затруднения в движении (обработке) поездов при данной регулировке по сравнению с исходным вариантом.

На последующих шагах попарно сравниваются результаты воздействия оставшихся вариантов регулировок, выбирается наиболее эффективный.

При решении оптимизационной задачи по перестройке графика целевая функция в общем случае представляется взвешенной суммой показателей потерь по всем N поездам: $\sum_i w_i \Delta \Pi_i \rightarrow \min$. Вес w_i определяется приоритетностью поезда. Так, очевидно, весомость экономических потерь при опозданиях пассажирских поездов полагается наибольшей, показатель w принимается равным 1. Для грузовых поездов, которые следуют по твердым ниткам, этот показатель оценивают значением, лежащим в пределах 0,6-0,8. Вес потерь по прочим грузовым поездам лежит ниже уровня, равного 0,5.

Работа по экономическому критерию предполагает систематическое ведение и практическое использование баз данных коммерческой "ценности" грузовых поездов и накопленных опозданий на промежуточных этапах их следования по маршрутам. Также подлежат детальному структурированию и накоплению оперативные данные, отражающие дефицитность порожних вагонов разных типов. Таким образом, оптимизационные задачи диспетчерского управления наполняются текущей информацией.

Отметим, что при этом может реализовываться новая, актуальная в рыночных условиях, задача: обеспечение приоритетного пропуска грузовых поездов, срочность которых объявлена грузовладельцем уже в период выполнения перевозки. Речь идет о "прицельном" подводе грузовых поездов к станциям массовой выгрузки (погрузки), в частности, к морским портам. Перевозчик при этом получает дополнительную прибыль (бонус).

6.6 Пример использования экономического критерия в диспетчерском управлении

Покажем на примере, каким образом используется модель формирования прибыли при выработке оперативного управленческого решения. Рассмотрим ситуацию, когда требуется определить очередность отправления с технической станции двух транзитных поездов одинаковой массы, которые следуют по одному

маршруту. Критерием определения очередности служит прогнозируемый показатель потенциального ущерба на конечной станции.

Допустим, поезда реализуют транспортировку различных грузов. Плата за использование инфраструктуры, получаемая перевозчиком, для поезда B выше, чем для поезда A . При этом график функции $\Pi^B(t)$ лежит выше линии $\Pi^A(t)$ (рисунок 6.3). Нормативные зависимости показаны прямыми OP_n^A и OP_n^B .

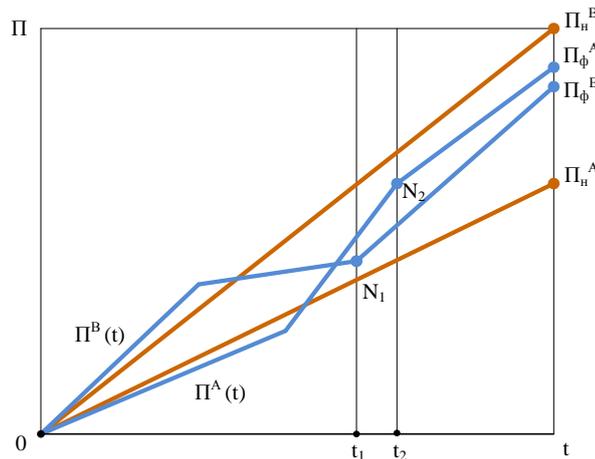


Рисунок 6.3 - Формирование экономического результата при следовании поездов

В процессе следования по маршруту для поезда A сложились благоприятные условия пропуска. Благодаря этому, поезд пришел на станцию N с экономией расходов. На графике это отражается тем, что точка N_1 лежит выше нормативной линии. В то же время по поезду B наметился перерасход затрат, текущий экономический результат (ордината точки N_2) оказался ниже нормативного. При выборе очередности отправления приоритет должен быть отдан поезду B (момент отправления t_1). Кроме того, диспетчер обязан приложить усилия к обеспечению беспрепятственного пропуска этого поезда на оставшейся части маршрута. При этом будут снижены расходы за счет уменьшения числа неграфиковых задержек, что позволит улучшить результат. Так, в рассматриваемом примере итоговый показатель прибыли удастся улучшить, но не до нормативного значения. На это указывает позиция точки Π_ϕ^B — ниже точки Π_n^B . В результате получается, что поезд B , потенциально более прибыльный, в сложившейся конкретной ситуации показывает более скромный экономический результат, чем поезд A .

Использование предложенной модели формирования экономического результата встречает следующие сложности [35]:

- в ряде случаев затруднена оценка доходной компоненты;
- требуется учесть как локальные результаты регулировки, так и отдаленные последствия (например, замедление оборота вагонов).

Указанные затруднения преодолевается путем построения в реальном времени динамической модели движения, вагонной модели и учета конъюнктуры в области железнодорожных перевозок [29].

6.7 Оптимизация движения поездов на основе обобщенной затратной модели

Оптимальное регулирование предполагает такую корректировку траекторий движения (ниток), которая наилучшим образом компенсирует отклонения от графика пассажирских, грузовых ускоренных поездов и обеспечивает максимальную прибыль от пропуска рядовых грузовых поездов.

Выбор наилучшего сценария пропуска потока поездов рассмотрим как динамическую задачу размещения ресурсов. Положим, что множество элементов инфраструктуры I разбито на непересекающиеся подмножества I_t , $t \in T$, где T – совокупность дискретных интервалов времени. Поезда, следующие по участку, образуют множество $J = \{1, \dots, n\}$. Задача поиска оптимального решения формализуется следующим образом:

$$\text{найти} \quad \min \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \left(C_{jt}^0 z_{jt} + \sum_{i \in I_t} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I_t} C_{ij}^{ocm} x'_{ij} \right) \quad (6.18)$$

при условиях:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad j \in J, \quad (6.19)$$

$$\sum_{j \in J_t} p_{ij} x_{ij} \leq v_{it}^0, \quad i \in I, \quad t \in T, \quad (6.20)$$

$$x_{jt} \in \{0, 1\}, \quad j \in J, \quad t \in T. \quad (6.21)$$

Здесь C_{jt}^0 представляет собой накопленный начальный объем эксплуатационных расходов по j -му поезду на момент проведения анализа, C_{ij}^{ocm} - затраты при

остановке поезда на i -м блок-участке. Удельный объем затрат на единицу работы при следовании поезда по i -му блок-участку составляет c_{ij} . Переменные z_{jt} , x'_{ij} при нахождении поезда на данном блок-участке равны 1. Нецелочисленная переменная $x_{ij} \geq 0$ отражает долю работы поезда j , приходящуюся на i -й блок-участок.

Целевая функция задачи (6.18) выражает суммарные затраты на пропуск всех поездов в течение планового периода. Первое условие (6.19) гарантирует полное выполнение всех операций. Условие (6.20) ограничивает возможности выполнения работ имеющимися в наличии техническими средствами. Если в t -м интервале времени выходит из строя определенная доля s_{it} участков i -го типа, второе ограничение приобретает вид:

$$\sum_{j \in J_i} p_{ij} x_{ij} \leq v_{it}^0 - \sum_{\tau=1}^{t-1} s_{i\tau} \sum_{j \in J_i} p_{ij} x_{ij}, \quad i \in I, \quad t \in T \quad (6.22)$$

Считаем, что априори известен для каждого j -го поезда удельный объем затрат c_{ij} на единицу работы (возможно, и в единицу времени) при следовании по i -му блок-участку. При расчете используем ограниченное число фиксированных значений удельного расхода – в соответствии с предписываемыми типовыми режимами движения. В рассмотренной постановке поиск оптимальной совокупности корректировок графика сводится к задаче линейного частично-целочисленного программирования.

Итерационный алгоритм, который необходим для поиска оптимального решения по корректировке грузового графика, использует два критерия: временной и экономический. Этот алгоритм реализует следующую схему:

1. решается задача снижения числа неграфиковых остановок поездов;
2. рассчитывается потенциальный экономический результат при реализации скорректированного графика движения;
3. решается задача максимизации экономического результата путем изменения скорости и (или) порядка следования поездов в точках конфликтов;
4. проверяется и, при необходимости, корректируется график движения с целью минимизации числа неграфиковых остановок.

6.8 Моделирование расходной части локального экономического результата

При построении модели расходной части локального экономического результата используем процессный подход к анализу работы станции или участка дороги [76]. Этот подход заключается в выделении бизнес-процессов и декомпозиции их на более мелкие составляющие – подпроцессы или элементы - с последующим экономическим оцениванием каждого из них. При исчислении результата учитываются все виды издержек, возникающих как при выполнении работ, так и при их невыполнении (простоях). В частности, в процессе ликвидации опозданий расходуется дополнительный объем энергии. Нередко расходы этого вида превышают потери из-за штрафов. Поэтому методика, основанная на исчислении затрат по объему деятельности объекта, должна быть дополнена *ресурсной* (энергетической) составляющей.

Первая группа потерь $\Delta P_{сп}$, возникающих из-за препятствий, зависит от времени нахождения поезда на участке (маршруте) и включает дополнительные расходы, связанные с использованием локомотива, вагонов и рабочего времени бригады. Эти потери рассчитываются, исходя из стоимости грузового поезда-часа. Вторая группа $\Delta P_{зад}$ определяется количеством остановок $n_{ост}$ и числом участков $n_{огр}$ ограничения скорости.

Если пропускная способность участка (направления) становится недостаточной из-за отказов, поезда переводят на параллельный ход. При этом дополнительные затраты $\Delta P_{паралл}$ определяются не только отличием расходной ставки поезда-часа при следовании по альтернативному участку, но и разницей ставок поезда-километра $e_{пкм2}^{ГР}$ и $e_{пкм1}^{ГР}$:

$$\Delta P_{паралл} = (e_{пкм2}^{ГР} L_2 - e_{пкм1}^{ГР} L_1) + \left(\frac{L_2}{v_{уч2}} e_{пч2}^{ГР} - \frac{L_1}{v_{уч1}} e_{пч1}^{ГР} \right), \quad (6.23)$$

На уровне затрат по пропуску сказывается квалификация машиниста. В реальном движении имеются резервы, что позволяет гибко использовать эффектив-

ные тяговые режимы. В этом случае более подготовленная локомотивная бригада соблюдает заданное расписание при существенно меньшем расходе топлива.

Затратную компоненту, связанную со штрафами за просрочку доставки груза, целесообразно рассчитывать по методике [50, 69]. Определять оптимальные решения по пропуску поездов с учетом дополнительных расходов, которые необходимо произвести для доставки грузов в срок. Назначать такие регулировки, при которых затраты не превысят заданного предела D :

$$\Delta P_1(\Delta\alpha) + \Delta P_2(\Delta(M\Psi(\xi))) \leq D \quad (6.24)$$

Первая компонента расходов зависит от вероятности возникновения опоздания $\Delta\alpha$, а вторая – от самой величины опоздания ξ . В расчете считается заданной штрафная функция $\Psi(\xi)$ за задержку в доставке груза.

6.9 Влияние скоростного режима движения на экономический результат

А. Целенаправленная корректировка ходовой скорости ведет к изменению величины текущих затрат по пропуску поезда. В группе «энергетических» расходов выделяют часть ($\Delta P^{ээ}$), которая идет на оплату энергии, расходуемой локомотивом. Другая часть ($\Delta P^{рем}$) тратится на ремонт пути и подвижного состава. Такой подход основывается на модели эквивалентного расхода энергии [122, 133]. Анализ показывает, что при сложившихся ставках ЕНР приращение «ремонтной» части расходов значительно (более, чем на порядок) уступает изменению величины затрат на тягу.

При анализе зависимости расходов по пробегу поездов от скорости используем показатель затрат в виде суммы трех компонент – пробегной $P^{п}$, временной $P^{в}$ и энергетической $P^{э}$:

$$P(v) = P^{np} + P^{п}(v) + P^{э}(v) \quad (6.25)$$

Развернутая линейная модель расходов при этом имеет следующий вид:

$$P(v) = P^{np} + T \sum_i e_i^{п} + W^{э} e^{э}, \quad (6.26)$$

где $T = L/v$ – время хода поезда по участку протяженностью L ;

e_i^{ep} - единичная норма расходов по i -му временному показателю;

$e^{э}, W^{экв}$ - тариф на оплату и объем электроэнергии.

Изменение скорости оказывает влияние на временную и энергетическую компоненты расходов. Расчет показывает, что компонента $P^{ep}(v)$ уменьшается при увеличении скорости, компонента $P^{эп}(v)$ - возрастает (рисунок 6.4). При определенном значении v_{opt} , когда влияние изменений компонент уравнивается, наблюдается минимум функции расходов $P(v) = P^{ep}(v) + P^{эп}(v)$.

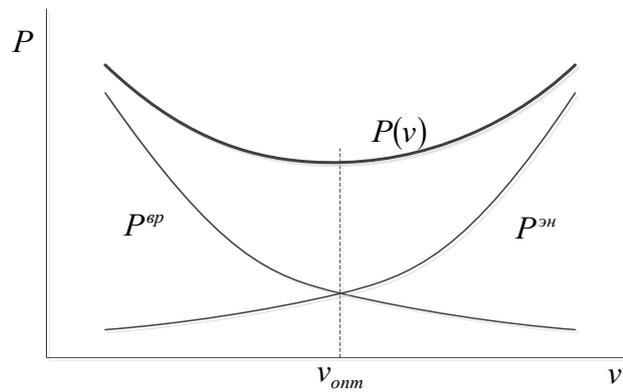


Рисунок 6.4 - Зависимость расходов по пробегу от скорости движения поезда

Нами показано [57], что увеличение энерготарифов ведет к смещению v_{opt} в область более низких значений. В период, когда тарифы были относительно малы (начало 2000-х годов), наименьшие расходы по пробегу грузовых поездов наблюдались в зоне ходовых скоростей около 60 км/ч [86]. 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 на РЖД значительно превышает значение v_{opt} , достигая 50-55 км/ч. Следовательно, снижение расходов по пробегу может быть получено при некотором уменьшении скорости.

Относительное снижение затрат энергии $\delta A = \frac{\Delta A}{A}$ при изменении ходовой скорости представляют посредством использования коэффициента реакции β :

$$\delta A = \beta \Delta V \text{ (проц.)} \quad (6.27)$$

Так, например, рекомендуют в расчете потребления энергии грузовыми поездами брать значение коэффициента β , равное $0,993 \frac{\text{проц}}{(\text{км}/\text{ч})}$ [97].

Анализ показывает, что доминирующей в грузовом движении является компонента, обусловленная потерей энергии при остановках. Поэтому наиболее важной мерой, которая направлена на экономическую оптимизацию графика, является снижение числа неграфиковых задержек поездов.

Б. Одним из способов корректирования движения поездов является целенаправленное изменение времен хода по перегонам. Предложим методику выбора значений времени, которая позволяет снизить экономические потери.

Положим, решение о проведении регулировки принимается диспетчером в некоторый момент времени t^k , когда поезд находится в промежуточной точке X маршрута AB . Основными факторами, которые формируют экономический результат перевозки, являются:

- время прибытия на конечную станцию – без опоздания или с опозданием ΔT ; опоздание влечет за собой штраф $Ш$, ухудшающий результат;
- рациональное использование резерва времени ΔT - снижение расхода электроэнергии при использовании эффективной регулировки;
- увеличение времени работы локомотивной бригады на величину ΔT , что ведет к дополнительным расходам на оплату труда;
- повышение амортизационных расходов по локомотиву и вагонам;
- ущерб, связанный с невозможностью предоставления грузоотправителям порожних вагонов данного типа.

Анализ показывает, что при текущем планировании можно не принимать во внимание расходы последних двух видов – ввиду относительной малости задержек. Действительно, средний дополнительный расход времени при выполнении диспетчерских регулировок не превышает 0,2 часа при времени хода грузового поезда в границах диспетчерского круга, равном 3-5 ч. Потеря амортизационных расходов при этом не превышает 4 проц. от полных затрат.

Экономические потери перевозчика при несоблюдении срока доставки определяются размером штрафов - как за просрочку ($\delta\Pi_{\text{опозд}}$), так и за более раннее завершение перевозки ($\delta\Pi_{\text{онер}}$). Допустим, в правилах перевозок принята линейная модель формирования размера штрафа за опоздание:

$$\Pi' = \delta\Pi_{\text{опозд}} \cdot \Delta T, \quad (6.28)$$

где $\delta\Pi_{\text{опозд}}$ - часовой размер штрафа за опоздание ΔT .

Такую потерю в доходах компании-перевозчика можно ожидать в случае отсутствия реакции диспетчеров на задержку. Если же диспетчерский персонал обеспечит нагон - регулировку, которая приведет к сокращению опоздания на величину $\Delta t_{\text{уск}}$, - размер штрафа уменьшится:

$$\Pi'' = \delta\Pi_{\text{опозд}} (\Delta T - \Delta t_{\text{уск}}) \quad (6.29)$$

Очевидно, величина сокращения опоздания $\Delta t_{\text{уск}}^k$ зависит от времени $\tau_{\text{ост}}^k$, которое остается до планового момента прибытия поезда на конечную станцию маршрута. В первом приближении можно принять, что величина нагона пропорциональна остаточному времени $\tau_{\text{ост}}^k$:

$$\Delta t_{\text{уск}} = K_{\text{уск}} \tau_{\text{ост}}^k, \quad (6.30)$$

что в совокупности с выражением (6.29) дает следующую величину штрафа:

$$\Pi'' = \delta L_{\text{опозд}} (\Delta T - K_{\text{уск}} \tau_{\text{ост}}^k) \quad (6.31)$$

Коэффициент $K_{\text{уск}}$ характеризует наличие резерва, использование которого позволяет реализовать ускоренный пропуск поезда на оставшейся части маршрута. Как правило, этот коэффициент не превышает значения 0,05.

Допустим, на j -м перегоне участка диспетчером целенаправленно вносится добавочное время следования поезда, которое используется для реализации энергосберегающего режима. Экономия расходов на оплату энергии при увеличении времени хода на величину $\Delta \tau_j$ в этом случае составляет:

$$\Delta \Pi_{\text{э}} = K_{\text{э}} \cdot \Delta \tau_j \cdot e_{\text{э}}, \quad (6.32)$$

где $K_{\text{э}}$ - коэффициент чувствительности расхода энергии к изменениям времени.

При следовании тяжеловесных грузовых поездов массой 5-6 тысяч тонн со скоро-

стью 60-80 км/ч среднее значение этого коэффициента составляет 20 кВтч/мин и в некоторых случаях может достигать 100 кВтч/мин (см. п. 4.4).

Экономия расходов на полном маршруте следования – с учетом всех перегонов, где произведена аналогичная регулировка, - составляет:

$$\Delta\Pi_{\text{э}} = e_{\text{э}} \sum_j K_{\text{э}j} \Delta\tau_j \quad (6.33)$$

Компонента дополнительных затрат, связанная с изменением рабочего времени локомотивной бригады из-за задержки поезда на j -м перегоне, определяется размером часовой оплаты труда $e_{\text{зн}}$:

$$\Delta\Pi_{\text{зн}} = e_{\text{зн}} \cdot \Delta\tau_j \quad (6.34)$$

Комплексирование компонент, приведенных выше, дает выражение для величины экономической потери при увеличении времени хода по участку:

$$\Delta\Pi = \delta\Pi_{\text{опозд}} \left(\Delta T - K_{\text{уск}} \tau_{\text{ост}}^k + \sum_j \Delta\tau_j \right) + \left(e_{\text{зн}} \Delta\tau_j - e_{\text{э}} \sum_j K_{\text{э}j} \Delta\tau_j \right) \quad (6.35)$$

При благоприятном стечении условий пропуска, рациональных действиях диспетчера может быть получен экономический выигрыш (вместо потери), благодаря предотвращению штрафа и реализации приемов энергосбережения.

Следует отметить, описанная методика может быть распространена и на случаи управления смешанным потоком грузовых и пассажирских поездов. При этом необходимо использовать экономический показатель, которым оценивается единица времени (например, минута) опоздания пассажирского поезда. В работах, посвященных поиску оптимальных графических решений, иногда используется денежное (ценовое) взвешивание задержек поездов на станциях и перегонах (см., например, статью [173]).

В. В качестве примера использования разработанной методики приведем расчет экономического результата при корректировании движения грузового поезда массой 6,3 тыс. т. (груз - уголь) по маршруту протяженностью 2000 км. В середине маршрута (в точке $x=1000$ км) зафиксировано опоздание на 3 ч. Перед диспетчерским персоналом ставится задача обеспечения первоочередного про-

пуска поезда с тем, чтобы сократить опоздание – вернуться в нештрафуемую временную зону.

Если использовать регулировки, позволяющие сократить неграфиковые задержки и время обработки на технических станциях, на оставшейся части маршрута можно уменьшить ходовое время на 2,5 ч. и время стоянок на технических станциях на 1,0 ч. – всего на 3,5 ч. Диспетчерский персонал в состоянии ликвидировать, по крайней мере, половину задержек (не менее пяти единиц), что приведет к экономии энергии в объеме 1250 Квтч, снижению затрат на 5,6 тыс. руб. Дополнительная экономия возникает за счет уменьшения времени работы локомотивных бригад на 2,5 ч. Полагая, что совокупная часовая заработная плата машиниста и помощника равна 800 руб. (с учетом налогов), получаем оценку экономии по этой составляющей, равную 2,0 тыс. руб.

Таким образом, оперативные корректирующие действия диспетчерского персонала снизят время опоздания поезда на 3,5 ч., исключат штраф (как минимум, 20 тыс. руб.) и обеспечат экономию текущих эксплуатационных расходов в размере 7,6 тыс. руб.

6.10 Влияние интенсивности потока поездов на экономический результат

Исследуем вопрос влияния интенсивности потока поездов на экономический результат. Учтем ту закономерность, что при интенсивном движении нарушается пропорциональность роста прибыли, получаемой перевозчиком, размеру движения. Скорость роста доходной части D при высокой интенсивности n потока падает (рисунок 6.5). Причинами служат два обстоятельства. Первое связано с малым числом высокодоходных поездов (контейнерных, рефрижераторных) на Российских железных дорогах. Усиление потока в некоторые периоды происходит за счет увеличения доли "дешевых" поездов с массовым грузом, что отражается в замедлении темпа роста доходов. Вторым фактором служит уменьшение скорости продвижения потока при высокой его интенсивности; оборот грузового вагона снижается, растет число опозданий доставки грузов и штрафов.

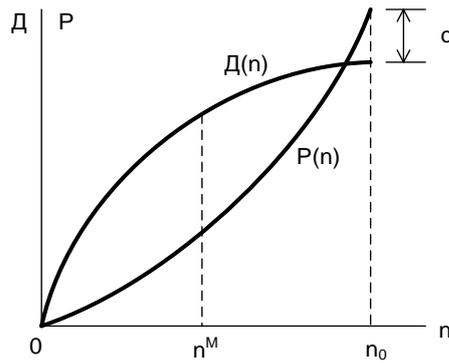


Рисунок 6.5 - Зависимость дохода и расхода от интенсивности потока поездов

Следуя рекомендациям работы [93], примем в качестве модели, на основе которой формируется компонента $D(N)$, линейную зависимость среднего единичного дохода d (в расчете на один поезд) от интенсивности n :

$$d(n) = d_0 - Bn, \quad (6.36)$$

где d_0 — средняя величина дохода по поездам, следующим строго по графику;

B — коэффициент влияния интенсивности потока.

Суммарный доход при пропуске N_i поездов при этом составляет:

$$D(N_i) = (d_0 - Bn)N_i. \quad (6.37)$$

Расходная часть P включает в себя условно-постоянные $P^{пост}$ и переменные $P^{пер}$ расходы. При повышении интенсивности потока издержки растут не пропорционально n (кривая $P(n)$ на рисунке 6.5). Причиной является увеличение числа неграфиковых задержек, что ведет к потерям времени и энергии. Если принять в качестве первого приближения квадратичную модель роста издержек, функция $P^{пер}(N_i)$ приобретет вид:

$$P^{пер}(N_i) = (p_0 + An)N_i, \quad (6.38)$$

где p_0 — величина расхода на пропуск поезда, следующего по графику.

При противоположном характере изменения функций дохода и расхода зависимость прибыли от плотности потока

$$\Pi(n) = [d_0 - p_0 - (A + B)n]n - P^{пост} \quad (6.39)$$

приобретает максимум при определенном значении n^M с дальнейшим спадом (рисунок 6.6). То есть, на конечном участке зависимости $\Pi(n)$ прибыль превращается в убыток.

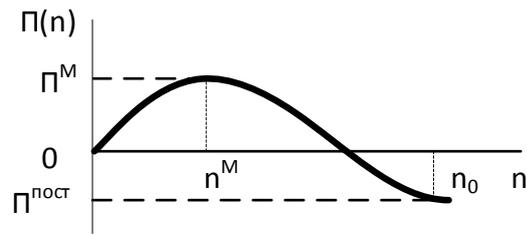


Рисунок 6.6 - Зависимость показателя прибыли от интенсивности потока

Определим, насколько реальна ситуация убыточной работы грузонапряженного направления РЖД, хотя бы в некоторые периоды времени. Нами определено, что при интенсивности потока грузовых поездов любого из направлений двухпутной магистральной линии, превышающей 4–5 ед. в часовом периоде, возникает 0,5–1,0 неграфиковых остановок каждого поезда. Это сопровождается перерасходом электроэнергии за час следования поезда, равным 150–300 кВт·ч. Расчет показывает, что потеря, обусловленная рассматриваемым фактором, составляет более 10% затрат на пропуск. При малом уровне рентабельности (для низкодоходных перевозок указанная величина не превышает 10%) это приводит к обнулению прибыли компании–перевозчика в период пропуска потока грузовых поездов с массовым грузом.

Во внимание при расчете взята одна – главная – компонента зависящих затрат. В действительности же имеются дополнительные расходы, в частности, связанные с увеличением объемов обслуживания и ремонта пути при интенсивном движении. Это дает основание полагать, что реальный экономический результат, в котором учтены ремонтные расходы, еще ниже, и железная дорога в некоторые периоды работает с убытком.

Выводы по разделу 6

1. Предложена эконометрическая модель формирования результата грузовой перевозки, в основу которой положены процессный подход и учет локальных изменений траектории движения поезда. Модель учитывает динамику расходной и доходной частей в процессе продвижения поезда по маршруту

2. Использование расходного критерия при определении рациональной регулировки в ряде случаев дает неэффективные решения. Это объясняется отсутствием учета приоритетности при выборе порядка пропуска, обработки грузовых поездов и дефицитности типа вагонов в их составах.

3. Показано, что критерием принятия оптимальных регулировочных решений является приращение локального экономического результата, представляющего собой прогнозируемый размер прибыли компании-перевозчика.

4. Нерациональная организация пропуска грузовых поездов по участку ("перенасыщение") приводит к малой рентабельности перевозок, а в периоды интенсивного движения мало доходных поездов – к их убыточности. Основной компонентой расходной части, приводящей к низкой рентабельности, является перерасход затрат на оплату энергоресурса, теряемого на преодоление отклонений от графика движения. В плотном потоке эта величина превышает 10 проц. от текущих расходов на пропуск поездов.

5. Разработана методика выбора экономически эффективного плана движения грузовых поездов путем рационального перераспределения временного резерва. Снижение затрат обеспечивается за счет уменьшения расхода энергии и исключения штрафов за позднюю доставку груза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги, приведем рекомендации по использованию полученных результатов, оценим перспективы дальнейшей разработки темы.

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. Развита теоретическая основа 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абраменко, В.С. Математическое обеспечение диалоговых информационных систем / В.С.Абраменко, В.И.Легоньков, В.Р.Хисамутдинов. - М. : Наука, 1990. – 192 с.
2. Абрамов, А.А. Мультиагентные технологии адаптивного построения графика движения поездов / А.А.Абрамов, П.О.Скобелев, А.А.Белоусов, А.С.Еремин // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте: сб. тр. второй науч.-тех. конф. ИСУЖТ-2013. – М., 2013. - С. 27-29.
3. Аветикян, М.А. Система управления движением поездов в условиях структурных преобразований / М.А.Аветикян // Железнодорожный транспорт. – 2010. - №9. - С. 8-16.
4. Автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии в системе тягового электроснабжения железных дорог: технические условия / Утверждены Департаментом электрификации и электроснабжения МПС России 20.04.2001. – 48 с.
5. Александров, В.В. Оптимальное управление движением / В.В.Александров и др. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 376 с.
6. Александров, В.И. Исследование затрат электроэнергии на перемещение поездов в зависимости от типа профиля и массы поезда / В.И.Александров, О.А.Худолей // Управление эксплуатационной работой и оптимизация перевозочных процессов на железнодорожном транспорте: сб. науч. тр. Уральского гос. ун-та путей сообщения. - 2007. - Вып. 52 (135). – С. 84-86.
7. Андрова, Н. Възможности за икономия на електрическа енергия в БЖД / Н.Андрова // Железопътен транспорт. - 1997. - № 6/7. – С. 8-13.
8. Баранов, А.Э. Выбор экономически обоснованных режимов ведения грузового поезда с электрической тягой: дисс...канд. техн. наук: 05.22.07 / Баранов Александр Эдуардович. - Самара, 2002. - 145 с.

9. Баранов, Л.А. Оптимизация управления движением поездов / Л.А.Баранов, Е.В.Ерофеев, И.С.Мелёшин, Л.М.Чинь; под ред. Л.А.Баранова.- М. : МИИТ, 2011. - 164 с.
10. Баранов, Л.А. Энегооптимальное управление движением транспортных средств / Л.А.Баранов, Н.А.Кузнецов, Н.В.Максимов // Электротехника. - 2016. - №9. – С. 12-18.
11. Барткус, А.Г. Решение задачи оптимального регулирования движения поездов методами линейного программирования / А.Г.Барткус // Труды ЛИИЖТ. – 1964. - Вып. 233. – 41 с.
12. Безруков, А.Б. Прикладная теория игр / А.Б.Безруков, С.С.Саитгараев. - Челябинск : Челябинский гос. ун-т., 2001. – 127 с.
13. Белокуров, В.П. Принятие решений для эффективного управления транспортными системами на основе ситуаций выбора / В.П.Белокуров, С.В.Белокуров, С.В.Скрыль // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. - №2. – С. 6-12
14. Быков, В.П. Система поддержки принятия решений по управлению движением на участках железных дорог: конспект лекций / В.П.Быков. – Хабаровск : Изд. ДВГУПС, 2001. – 92 с.
15. Бычин, Б.В. Организация и нормирование труда / Б.В.Бычин, С.В.Малинин, Е.В.Шубенкова; под ред. Одегова Ю.Г. - М.: «Экзамен», 2003. – 464 с.
16. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С.Вентцель, Л.А.Овчаров. - М.: Высшая школа, 2000. - 480 с.
17. Верхогляд, Д.Г. Интеграционное прогнозирующее моделирование электрических процессов в системе железнодорожного транспорта / Д.Г.Верхогляд // Совершенствование схем устройств электроснабжения транспорта: сб. тр. Уральского гос. ун-та путей сообщения. – 2006. - Вып. 48 (131). – С. 51-57.
18. Власов, С.Н. Организация системы управленческого учета транспортной компании / С.Н.Власов, В.А.Гундарев // Экономика железных дорог. – 2013. - №3. – С. 75-85.

19. Гапаненок, В.И. Экономика графика / В.И.Гапаненок, С.С.Жабров, Ю.В.Попов // Железнодорожный транспорт. – 2006. - №5. - С. 24-28.
20. Гапанович, В.А. Основные направления развития интеллектуального железнодорожного транспорта / В.А.Гапанович, И.Н.Розенберг // Железнодорожный транспорт. - 2011. - №5. - С.5-11.
21. Гермейер, Ю.Б. Игры с противоположными интересами / Ю.Б.Гермейер. - М.: «Наука». Гл. ред. физ.-мат. л-ры, 1976. – 327 с.
22. Гершвальд, А.С. Вертикаль внутрисуточного планирования грузовых перевозок / А.С.Гершвальд, Н.С.Савицкий // Железнодорожный транспорт. - 2010. - №3. - С. 25-28.
23. Гершвальд, А.С. Оптимизация оперативного управления процессом грузовых перевозок на железнодорожном транспорте / А.С.Гершвальд // М.: Интекст, 2001. – 240 с.
24. Головичер, Я.М. Оптимальное управление тяговым подвижным составом в системах автоведения магистральных железных дорог: дисс...д-ра тех. наук: 05.22.07 / Головичер Яков Моисеевич. - М., 1994. – 346 с.
25. Герман, Л.А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ / Л.А.Герман, Д.А.Морозов. – М. : Изд-во МИИТ, 2010. – 60 с.
26. Горелик, В.Ю. Модель диспетчерского управления для анализа устойчивости графика движения поездов / В.Ю.Горелик // Наука и техника транспорта. - 2003. - № 1. - С. 35-37.
27. Горелик, А.В. Применение имитационного моделирования при проектировании и оценке качества функционирования систем железнодорожной автоматики / А.В.Горелик, А.С.Веселова, А.А.Маслов // Наука и техника транспорта. – 2016. - №2. – С. 81-89.

28. ГОСТ Р ИСО 14813-1-2011 Интеллектуальные транспортные системы. Схема построения архитектуры интеллектуальных транспортных систем / Ч. 1. Сервисные домены в области интеллектуальных транспортных систем, сервисные группы и сервисы. – М. : Стандартиформ, 2011. – 43 с.

29. Грановская, Г.А. Методические подходы к экономической оценке затрат при эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой 27 тонн на участке Качканар-Смычка / Г.А.Грановская, А.И.Сафонова, О.А.Суслов, Н.С.Охотников // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – т. 77. – 2018. - №6. – С. 347-356.

30. Грановская, Г.А. Определение зависимости себестоимости грузовых перевозок от массы поезда брутто для целей оперативной экономической оценки / Г.А.Грановская, Т.В.Валуева // Экономические исследования железнодорожного комплекса и их практическое значение: сер. «Труды ученых ВНИИЖТ». – М.: АО НИИЖТ, 2018. – С. 94-102.

31. Давыдов, Б.И. Адаптивное диспетчерское управление движением поездов на магистральных железных дорогах: проблемы и перспективы / Б.И.Давыдов, В.Н.Гопкало, Годяев А.И. // Вестник Российского международного конгресса по ИТС. – М., 2013. - С. 12.

32. 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.

33. Давыдов, Б.И. Вероятностная модель распространения задержек по цепи поездов / Б.И.Давыдов, В.И.Чеботарев, К.С.Каблукова // Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматике и инфокоммуникациях: Всеросс. научно-практ. конф. - Хабаровск, 29 сент. 2017. - С. 78-83.

34. 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 конф. «Подвижной состав XXI века». – 2008. - Вып.5. - С. 125-128

35. Давыдов, Б.И. Использование показателя доходности при оптимизации процесса пропуска грузовых поездов / Б.И.Давыдов, В.А.Эсаулов // Интеллектуальные системы управления на железнодорож. транс. Компьют. и матем. моделир.: тр. 7-й науч.-тех. конф. – М., 2018. - С. 91-94.

36. Давыдов, Б.И. Концепция двухэтапности процесса адаптивного управления движением грузовых поездов / Б.И.Давыдов // Интеллектуальные системы управления на железнодорож. транс.: сб. трудов научно-технической конфер. с междуна. участием. – М., 2014. – С. 121-128.

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

38. 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. - С. 81-91.

39. 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.

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

41. Давыдов, Б.И. Нормирование ресурсов транспортной системы / Б.И.Давыдов // Наука и техника транспорта. – 2007. - №4 – С. 81-82.

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

43. 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.

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

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

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

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

48. 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.

49. 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 трансп. – 2002. - №3. - С. 39-40.

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

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

52. Давыдов, Б.И. Стохастическое моделирование потока поездов при решении задач диспетчерского управления / Б.И.Давыдов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютер. и матем. моделирование: тр. 4-й научно-технической конф. с междунар. участием. – М., 2015. - С. 56-60.

53. Давыдов, Б.И. Теоретико-игровое решение задач поездного диспетчерского управления / Б.И.Давыдов, В.И.Чеботарев // Вестник транспорта. – 2007. - №10. - С. 37-39.
54. Давыдов, Б.И. Энергетическая эффективность рационального управления потоком поездов / Б.И.Давыдов, Л.А.Мугинштейн // Железнодорожный транспорт. – 2003. - №10. - С. 60-62.
55. Давыдов, Б.И. Экономически эффективное управление движением поездов / Б.И.Давыдов // Экономика железных дорог. - 2012. - №3. - С. 28-37.
56. 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.
57. Давыдов, Б.И. Экономическое обоснование рациональной скорости движения поездов / Б.И.Давыдов, Е.В.Котлярова // Экономика железных дорог. - 2008. - №4. - С. 14-21.
58. Дел Рио, Б. Построение оптимального однопутного непараллельного графика на ЭЦВМ: часть I. Метод / Б.Дел Рио // Серия "Кибернетика на транспорте". – Киев : Изд. Киевского дома научно-тех. пропаганды, 1962. – 39 с.
59. Дмитриев, Е.О. Тяговое обеспечение поездной работы при изменениях эксплуатационной обстановки / Е.О.Дмитриев, А.А.Сухов, А.С.Петров, Е.А.Алексевнин // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. - №2 (86). – С. 58-66.
60. Добрынин, Е.В. Оперативный контроль и прогнозирование нагрузочной способности системы тягового электроснабжения : автореферат дис. ... канд. технических наук : 05.22.07 / Самарская гос. акад. путей сообщения. - Самара, 2005. - 24 с.
61. Доманский, В.Т. Система информационно-управляющего обеспечения рациональных режимов энергопотребления электрифицированных линий железных дорог: дисс...д-ра тех. наук: 05.22.09 / Доманский Валерий Тимофеевич. – М., 1993. – 285 с.

62. Доенин, В. В. Адаптация транспортных процессов / В.В.Доенин // Ин-т проблем транспорта РАН. - Москва : Компания Спутник+, 2009 (Коломна, Моск. обл.) . - 219 с.
63. Доенин, В. В. Моделирование транспортных процессов и систем / В.В.Доенин // Московский гос. университет путей сообщения (МИИТ), Каф. «Интеллектуальные транспортные системы». - Москва : Компания Спутник+, 2012. - 288 с.
64. Дулуб, П.М. Интеллектуальная система сменно-суточного планирования поездной работы / П.М.Дулуб, А.А.Ерофеев // Железнодорожный транспорт. – 2020. - №10. – С. 19-23.
65. Духин, С.В. Единое геоинформационное пространство железных дорог / С.В.Духин, М.М.Железнов, С.И.Матвеев, Д.С.Манойло / Железнодорожный транспорт. – 2008. - №10. – С. 28-31.
66. Единый технологический процесс железнодорожных перевозок: утвержден ОАО «РЖД» 30.11.2009. – М. : ОАО «РЖД». – 270 с.
67. Елисеев, С.Ю. Комплексная автоматизированная система разработки графика / С.Ю.Елисеев, С.С.Жабров, Ю.В.Попов // Железнодорожный транспорт. – 2005. - №8. – С. 16-21.
68. Жданова, Е.Г. Теория расписаний: учебное пособие [Электронный ресурс] / Е.Г.Жданова. - М., 2000 – 81 с. - Режим доступа: <http://eur.ru/Documents/2004-03-22/29032.asp>.
69. Завьялов, В.С. Учет электроэнергии автоматизирован / В.С.Завьялов и др. // Локомотив. – 1998. - №8. – С. 33-34.
70. Зябиров, Х.Ш. Современные технологии организации и управления эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте: монография / Х.Ш.Зябиров, И.Н.Шапкин. – М. : Транспорт; М. : Финансы и статистика, 2016. - 479, [2] с.
71. Ивницкий, В.А. Нахождение рисков невыполнения ускоренными контейнерными поездами заданной маршрутной скорости из-за отказов технических

средств / В.А.Ивницкий // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 2012. - №1. – С. 33–37.

72. Ивницкий, В.А. Проблема перехода к информационно-управляющему режиму в системе оперативной организации перевозочного процесса / В.А.Ивницкий, А.А.Поплавский // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2007. - №1. - С. 15-21.

73. Измерение расхода электроэнергии на электроподвижном составе / Железные дороги мира. – 2001. - №10. – С. 38-41.

74. Илларионов, М.Н. Применение метода анализа иерархий в принятии управленческих решений / М.Н.Илларионов // Актуальные проблемы экономики и права. - 2009. – №1. - С. 41-45.

75. Имитационные модели – исследовательский инструментарий XXI века / Железные дороги мира. – 1997. - №2. – С. 42-46.

76. Каретников, А.Д. График движения поездов / А.Д.Каретников, Н.А. Воробьев. - М.: Транспорт, 1979. - 301 с.

77. Карчик, В.Г. Моделирование работы участковой станции на базе процессно-функциональной модели добавочных расходов / В.Г.Карчик, И.В.Першин, И.Л.Сакович // Экономика железных дорог. - 2010. - № 9. – С. 57–71.

78. Карчик, В.Г. Процессный подход к работе участковой станции / В.Г.Карчик, И.В.Першин, Е.А.Юркова // Экономика железных дорог. – 2009. - №11. – С. 24-39.

79. Клеванский, Н.Н. Математическое моделирование в задачах формирования расписаний железнодорожного транспорта: в 5 т. / Н.Н.Клеванский, Е.Ф.Кривцов, Е.А.Тихонов // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-21): сб. тр. XXI междуна. науч. конф. – Саратов, 2008. – Т. 5. – С. 284-288.

80. Климанов, В.С. Вопросы оперативного регулирования поездопотоков на направлении: дисс... канд. тех. наук: 05.12.08 / Климанов Владимир Сергеевич. - М., 1982. - 213 с.

81. Климович, А.В. Оптимизация управления движением поезда по минимуму затрат энергоресурсов на тягу: монография / А.В.Климович // М.: Компания Спутник+, 2008. - 263 с.
82. Ковалев, А.П. Оценка надежности графика и скорости движения пассажирских поездов / А.П.Ковалев // Железнодорож. транспорт. – 2006. - №5.- С. 42-45.
83. Козлов, И.Т. Автоматизация составления однопутных графиков движения поездов / И.Т.Козлов, Г.Н.Тихонов // Железнодорожный транспорт. – 1972. - №5. – С. 52-55.
84. Котенко, А.Г. Вопросы повышения стабильности выполнения графика движения поездов / А.Г. Котенко, А.А. Грачев, А.В. Гоголева, Т.М. Шманев // Бюллетень результатов научных исследований. – 2018. – №1. – С. 59-70.
85. Кочетов, Ю.А. Методы локального поиска для дискретных задач размещения: дисс... д-ра физ.-мат. наук: 05.13.18 / Кочетов Юрий Андреевич. – Новосибирск, 2009. - 267 с.
86. Кравчук, В.В. Резервы повышения экономической эффективности работы на Дальневосточной дороге / В.В.Кравчук, Н.П.Дениско // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2002. - №1. - С. 40-42.
87. Кузнецова, А.А. Оптимизация технологии вождения грузовых поездов по перегонам по критерию минимума эксплуатационных расходов : дисс...канд. тех. наук: 05.22.06 / Кузнецова Анна Александровна. - Новосибирск, 2006. - 152 с.
88. Кутыркин, А.В. Модели и методы разработки крупномасштабных предметных областей управления транспортными системами и производством: монография / А.В.Кутыркин. - М.: Изд-во МИИТ, 2004. - 148 с.
89. Лазарев, А.А. Теория расписаний. Задачи железнодорожного планирования / А.А.Лазарев, Е.Г.Мусатова, Е.Р.Гафаров, А.Г.Кварцхелия. - М.: ФГБУ науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. – 287 с.
90. Лазарев, А.А. Теория расписаний. Задачи управления транспортными системами / А.А.Лазарев, Е.Г.Мусатова, А.Г.Кварацхелия, Е.Р.Гафаров. - М.: Физический факультет МГУ, 2012. – 78 с.

91. Лазарев, А.А. Теория расписаний. Исследование задач с отношениями предшествования и ресурсными ограничениями / А.А.Лазарев, Е.Р.Гафаров. - М.: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, 2007. – 210 с.
92. Левин, Д.Ю. Расчет пропускной способности с помощью моделирования / Д.Ю.Левин // «Транспорт России: проблемы и перспективы»: тр. междунар. научно-практ. конференции. – М., 2010. – С. 219-222.
93. Левин, Д.Ю. Теория оперативного управления перевозочным процессом: монография / Д.Ю.Левин.- М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 625 с.
94. Левин, Д.Ю. Управление составообразованием / Д.Ю.Левин // «Транспорт России: проблемы и перспективы»: труды международной научно-практической конференции. - М., 2010. - С. 223-225.
95. Луговой, П.А. Основы технико-экономических расчетов на железнодорожном транспорте / П.А.Луговой, Л.Г.Цыпин, Р.А.Аукционек. - М.: Транспорт, 1973. – 232 с.
96. Мазо, Л.А. Показатели использования перевозочных ресурсов / Л.А.Мазо, А.А.Микульский // Мир транспорта. – 2008. - №2. - С. 66-73.
97. Марквардт, К.Г. Контактная сеть: 4-е изд. перераб. и доп.: учеб. для вузов железнодорож. транспорта / К.Г.Марквардт. - М.: Транспорт, 1994. - 335 с.
98. Математические методы и модели исследования операций / Под ред. В.А. Колемаева. - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2008. – 592 с.
99. Матюхин, В.Г. ИСУЖТ. Концепция и реализация / В.Г.Матюхин, А.Б.Шабунин // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте, ИСУЖТ 2012 : труды 1-й научно-технической конференции. – М., 15-16 ноября 2012 г. - 2012. - С. 15-18.
100. Машталер, Ю.А. Обеспечение графика перевозок локомотивной тягой / Ю.А.Машталер // Железнодорожный транспорт. - 2010. – №7. - С. 18-20.
101. Мережко, В.Г. Основные резервы локомотивного хозяйства / В.Г.Мережко. - М.: Транспорт, 1968. – 168 с.

102. Методика анализа результатов расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов : №ЦТД-26: утв. М-вом путей сообщения 20 июня 1977 г. - М.: Транспорт, 1977. - 95 с

103. Методические рекомендации по определению экономической эффективности мероприятий научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте. - М.: Транспорт, 1991. – 240 с.

104. Мохонько, В.П. Ситуационное управление перевозочным процессом / В.П.Мохонько, В.С.Исаков, П.В.Куренков // Транспорт: наука, техника, управление. - 2004. - №11. - С. 14-16.

105. Мугинштейн, Л.А. Потенциал энергосбережения / Л.А.Мугинштейн, В.И.Панферов // Железнодорожный транспорт. - 2000. - №6. - С.20-24.

106. Мугинштейн, Л.А. Состояние и перспективы снижения удельных расходов электроэнергии на тягу поездов на сети железных дорог / Л.А.Мугинштейн, В.М.Абрамов, Ю.Н.Панков // Железнодорож. транс. Серия: «Локомотивы и локомотивное хозяйство». – ОИ/ЦНИИТЭИ МПС РФ. – 2001. - Вып. 1-2. – С. 1-16.

107. Мугинштейн, Л.А. Сравнительный анализ удельных расходов топлива в теплотяге и пути их приведения к уровню 1988 года / Л.А.Мугинштейн, В.М.Абрамов, Ю.Н.Панков // Железнодорож. транс. Серия: «Локомотивы и локомотивное хозяйство». – ОИ/ЦНИИТЭИ МПС РФ. – 2001. - Вып. 1-2. – С. 17-26.

108. Мыцко, А.С. Моделирование электропотребления железных дорог для оптового рынка электроэнергии / А.С.Мыцко, Д.А.Босый // Совершенствование схем устройств электроснабжения транспорта: сб. тр. Уральского гос. ун-та путей сообщения. – 2006. - Вып. 48 (131). - С. 181-185.

109. Некрашевич, В.И. Проблема адаптации графика движения грузовых поездов к колебаниям вагонопотоков / В.И.Некрашевич // Вестник ВНИИЖТ. - 2006. - №4. - С. 8-15.

110. Никифоров, Б.Д. Управление поездной работой на направлении / Б.Д.Никифоров, Е.М.Тишкин, В.М.Макаров, В.С.Климанов // Железнодорожный транспорт. – 1982. - №2. - С. 17-24.

111. Никифорова, Н.Б. Энергетическая оптимизация графика и автоматизированное его выполнение – взаимоувязанные этапы повышения экономичности движения / Н.Б.Никифорова // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: сб. тр. 2-й Всерос. науч.-практ. конф. - М.: МИИТ, 1999. - С. V21-V22.

112. Негрей, В.Я. Развитие транспортных систем / В.Я.Негрей // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. – 2021. - №1 (3). – С. 173-180.

113. Осипов, С.И. Основы электрической и тепловозной тяги: учебник для техникумов железнодорожного транспорта. / С.И.Осипов // М.: Транспорт, 1985. - 408 с.

114. Основы теории управления / Под ред. Парахиной В.Н., Ушвицкого Л.И. - М.: Финансы и статистика, 2003. – 560 с.

115. Пальчик, Л.В. К вопросу выбора методики оптимизации процесса управления движением поездов / Л.В.Пальчик, С.С.Броневицкий, А.М.Узденов // Труды РГУПС. – 2007. - №4. – С. 30-33.

116. Паршин, С.А. Одновременная многопользовательская обработка векторной графики / С.А.Паршин // «Транспорт России: проблемы и перспективы развития БАМа»: тр. научно-практ. конференции. – М.: МИИТ, 2010. – С. 334-336.

117. Пат. № 2763015 РФ, МПК В61L23/00. Способ и система децентрализованного интервального регулирования движения поездов / Давыдов Б.И., Муляр Н.В., Гопкало В.Н., Давыдов И.Б.: заявитель и патентообладатель: Федеральное гос. бюджетное образоват. учреждение высшего образования «Дальневосточный гос. университет путей сообщения» (ДВГУПС); заявл.19.04.2021, опубл. 24.12.2021, Бюл. № 36.

118. Пейсахзон, Б.Э. Вопросы эксплуатации электрифицированных железных дорог / Б.Э.Пейсахзон // Труды Всесоюзного научно-исследов. ин-та железнодорожного транспорта.– М.: Трансжелдориздат, 1952. – 1952. - Вып. 62. – 123 с.

119. Поплавский, А.А. Развитие системы оперативного управления перевозочным процессом и транспортной логистики / А.А. Поплавский // Труды ОАО «НИИАС». – 2011. - Вып.9. – С. 33-48.

120. Правила тяговых расчетов для поездной работы / П.Т.Гребенюк и др.// М-во путей сообщения СССР. ВНИИЖТ : утв. 15 августа 1985 г. - М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

121. Прокопец, В.Н. Алгоритм оптимизации сложных транспортных процессов по степени осуществимости с применением вычислительной схемы метода ветвей и границ / В.Н.Прокопец, В.Ф.Золотухин, В.В.Лозовский // Труды РГУПС. – 2007. - №4. – С. 34-38.

122. Прошин, Г.Б. Создание Комплексной автоматизированной системы учета, расследования и анализа случаев технологических нарушений / Г.Б.Прошин // Труды ОАО «НИИАС». – 2011. - Вып.9. – С. 141-153.

123. Пузанов, Н.Я. Расчет системы энергоснабжения на ЭЦВМ с учетом влияния напряжения в тяговой сети на работу электрического подвижного состава / Н.Я.Пузанов // Новые исследования в области электрификации железных дорог, Труды ВНИИЖТ. – 1967. - Вып. 338. - С. 38-59.

124. Разыграев, А.П. Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей: учеб. пособие / А.П.Разыграев. - М.: Машиностроение, 1977. - 472 с.

125. Растригин, Л.А. Случайный поиск - специфика, этапы истории и предрассудки / Л.А.Растригин // Вопросы кибернетики. – 1978. - Вып. 33. - С. 3–16.

126. Рациональные режимы вождения поездов и испытания электровозов / Б.В.Горчаков, И.П.Исаев, Л.Г.Козлов и др. : под ред. Осипова С.И. - М.: Транспорт, 1984. – 280 с.

127. Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги / В.Е.Розенфельд, И.П.Исаев, Н.Н.Сидоров. - М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

128. Сапожников, В.В. Концентрация и централизация оперативного управления движением поездов / В.В.Сапожников, Д.В.Гавзов, А.Б.Никитин. - М.: Транспорт, 2002. –102 с.

129. Серегин, С.А. Расчет технологических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения на базе идентификационной модели / С.А.Серегин, А.Н.Митрофанов, Е.В.Добрынин // Энергетическое обследование структурных

подразделений филиалов ОАО «РЖД»: материалы сетевой научно-практ. конфер. - Омск, 2004. – С. 246-252.

130. Сидорова, Н.Н. Энергоемкость перевозочного процесса в электрической тяге поездов и обоснование путей энергосбережения: дисс... д-ра. тех. наук: 05.22.07 / Сидорова Наталья Николаевна. – М., 2001. - 286 с.

131. Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира: международный учебник. - М.: «Интекст», 2010. – 367 с.

132. Скива, Л. Энергетически оптимальное управление транспортными системами / Л.Скива, Я.Яначек, П.Ценек: пер. с чешского - М.: Транспорт, 1992. – 247 стр.

133. Сотников, Е.А. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на пропускную способность участков / Е.А.Сотников, К.П.Шенфельд // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 2001. - №5. - С. 3-9.

134. Сотников, Е.А. Эксплуатационная работа на железных дорогах мира / Е.А.Сотников, И.Н.Шапкин // Железнодорож. транспорт. – 2009. - №2. - С.72-77.

135. Способ выбора наиболее экономичного режима движения поезда на заданном участке пути : пат. 2237589 Рос. Федерация : МПКВ61L 27/00/ Климович А.В., Авилов В.Д.; заявитель и правообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. - №2003121717/11; заявл. 14.07.2003; опубл. 10.10.2004.

136. Танаев, В.С. Теория расписаний. Многостадийные системы / В.С. Танаев, Ю.Н. Сотсков, В.А. Струсевич. - М.: Наука, 1989. - 328 с.

137. Теория систем и системный анализ в управлении организациями / Под ред. В.Н.Волковой и А.А.Емельянова. - М.: Финансы и статистика, 2006. - 848 с.

138. Теория электрической тяги / В.Е.Розенфельд, И.П.Исаев, Н.Н. Сидоров и др.: под ред. И.П. Исаева. - М.: Транспорт, 1995. - 294 с.

139. Тимошек, И.Н. Поиск и реализация практических рекомендаций, обеспечивающих наименьшие энергозатраты на тягу поездов / И.Н.Тимошек, В.Н.Зубков // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1997. - №4. - С. 40-43.

140. Тимухина, Е.Н. Применение метода моделирования при решении задач, направленных на совершенствование транспортной инфраструктуры / Е.Н.Тимухина, Е.Е.Смородинцева, А.А.Кощеев // Транспорт: наука, техника, управление. – 2015. – №1. – С. 53–56.

141. Тишкин Е.М. Автоматизация разработки графика движения поездов / Е.М.Тишкин // Труды ВНИИЖТ. - М.: Транспорт, 1974. - Вып. 517. – 136 с.

142. Траксел, Д. Самонастраивающиеся системы: обзорный доклад / Д.Траксел // «Дискретные и самонастраивающиеся системы»: тр. II-го международного конгресса ИФАК. - М.: Наука, 1965. - С. 240–251.

143. Тулупов, Л.П. Многофакторное оперативное нормирование времени выполнения технологических процессов / Л.П. Тулупов, Юйлиан Ян // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1997. - №5. - С. 20-24.

144. Тюкин, И.Ю. Адаптация в нелинейных динамических системах / И.Ю.Тюкин, В.А.Терехов. - Санкт-Петербург : «Питер», 2006. - 377 с.

145. Улановский, М.Б. Влияние режима движения электроподвижного состава на пропускную способность по мощности устройств электроснабжения / М.Б.Улановский // Труды Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1975. - Вып. 531. - С. 64-77.

146. Уманский, В.И. Автоматизация управления технологическими процессами железнодорожного транспорта на базе интеграции методов высокоточного спутникового позиционирования и инерциальной навигации: дисс... д-ра. техн. наук: 05.13.06 / Уманский Владимир Ильич. - М., 2012. - 332 с.

147. Уманский, В.И. Об организации пропуска поездов в период технологических «окон» / В.И.Уманский // Железнодорож. транспорт. - 2010. - №9. – С.21-24.

148. Феоктистов, В.П. Основы нормирования расхода электроэнергии для электропоездов / В.П.Феоктистов, А.А.Бакланов // «Энергетическое обследование структурных подразделений филиалов ОАО «РЖД»: матер. сетевой научно-практ. конференции. - Омск: Изд. ОмГУПС, 2004. – С. 45-50.

149. Филипченко, С.А. На основе достоверной информации и новых принципов статистического наблюдения / С.А.Филипченко // Железнодорожный транспорт. - 2010. – №7. - С. 21-22.

150. Фролов, А.Н. Экономическая оценка различных систем графиков движения поездов / А.Н.Фролов // Сборник Ленинградского института инженеров путей сообщения, СХП. - Ленинград, 1931. - 51 с.

151. Фрэнк, Г. Сети, связь и потоки / Г.Фрэнк, И.Фриш: под ред. Д.А.Поспелова: пер. с англ. - М: Связь, 1978. - 448 с.

152. Худоногов, А.М. Использование марковских цепей для формирования модели перегона железной дороги с расчетным подъемом / А.М.Худоногов, В.П.Смирнов, Ш.К.Исмаилов // Актуальные аспекты организации работы железн. транс. : сб. науч. статей: под ред. Хоменко А.П. – Иркутск, 2005. – С. 59–68.

153. Чачко, С.А. Когнитивная модель деятельности оператора энергоблока / С.А.Чачко // Электрические станции. - 1992. - №9. - С. 18-24.

154. Черемисин, В.Т. Основные направления работ по снижению «условных» потерь электрической энергии на тягу поездов / В.Т.Черемисин // Железнодорожный транспорт : Серия «Электроснабжение железных дорог». - ЭИ/ЦНИИТЭИ. – 2000. - Вып.4. – С. 2-19.

155. Шабунин, А.Б. Использование мультиагентных систем в диспетчерском регулировании / А.Б.Шабунин, Г.А.Ефремов, А.П.Калуцкая // Железнодорожный транспорт. - 2013. - №3. - С. 23-27.

156. Шапкин, И.Н. Моделирование поездной работы на основе многофакторного нормирования технологических операций / И.Н.Шапкин, Р.А.Юсипов, Е.М.Кожанов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2006. - №4. - С. 30-36.

157. Шапкин, И.Н. Система комплексной оценки работы поездного диспетчера / И.Н.Шапкин, Р.А.Юсипов, Е.М.Кожанов // Железнодорожный транспорт. – 2006. - №9. - С. 27-31.

158. Шаров, В.А. На пути к интеллектуальным системам управления железнодорожным транспортом / В.А.Шаров // Интеллектуальные системы управления

на железнодорож. транспорте, ИСУЖТ 2012.: тр. 1-й научно-технич.конференции. - Москва, 15-16 ноября 2012 г. - С. 7-9.

159. Школьников, Е.Н. Основные направления повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов / Е.Н.Школьников // Опыт организации работы по рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов на тягу / Железнодорож. транспорт : Серия «Локомотивы и локомотивное хозяйство». - ОИ/ЦНИИТЭИ. – 2004. - Вып. 3-4. – С. 1-5.

160. Щепин, Е.В. Теория расписаний [Электронный ресурс] / Е.В.Щепин // Школа Яндекса по анализу данных. – 2007. - 11 с. Режим доступа: <http://www.miras.ru/~scep/1-sched.pdf>.

161. Юсипов, Р.А. Оперативное нормирование технологических операций / Р.А.Юсипов // Железнодорожный транспорт. – 2001. - №8. - С. 61-63.

162. Ярошевич, В.П. Энергосберегающие технологии в поездной работе / В.П.Ярошевич и др. // Ресурсосберегающие технологии на железнод. транспорте: 2-я Всеросс. научно-практ. конф. – М.: МИИТ, 1999. - С. V20-V21.

163. NP-полнота // Алгоритмы: построение и анализ (Introduction to Algorithms) / Т.Х.Кормен и др.- 2-е изд.- М. : «Вильямс», 2006. – Гл. 34. - 1296 с.

164. Abril, M. An assessment of railway capacity / M.Abril et al. // Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review. – 2008. - vol. 44. - № 5. – P. 774-806.

165. Al-Ibrahim, A.A. Dynamic Delay Management at Railways. A Semi-Markovian Decision Approach: PhD thesis / Al-Ibrahim Ali. - Universiteit van Amsterdam, 2010. – 335 p.

166. Arpacı, M. A System for Improving Network Capacity [Электронный ресурс] / M.Arpacı, I.Jungherr // INFORMS Annual Meeting. - Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2006. Режим доступа: <http://www.rasig.net>.

167. Aseltine, J.A. A survey of adaptive control systems / J.A.Aseltine, A.R.Mancini, C.W.Sarture // IRE Trans. on Automatic Control. – 1958. - vol. AC-6. - No. 12. - P. 102–108.

168. Bai Yun. Train Control to Reduce Delays upon Service Disturbances at Railway Junctions / Bai Yun, Ho Tinkin, Mao Baohua // *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. – 2011. - 11(5). - P. 114-122.
169. Bellman, R. Dynamic programming and adaptive control processes: Mathematical foundations / R.Bellman, R.Kalaba // *IRE Transactions on Automatic Control*. – 1960. - vol. AC-5. - P. 5–10.
170. Bent, R. The Value of Consensus in Online Stochastic Scheduling / R.Bent, P.Van Hentenryck // *Proc. of the ICAPS*. – 2004. - P. 219-226.
171. Berger, A. Stochastic Delay Prediction in Large Train Networks / A.Berger et al. // *11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems, ATMOS 2011*. – 2011. - vol. 20. - P. 100–111.
172. Bertsimas, D. The price of robustness / D.Bertsimas, M.Sim // *Operations Research*. - 2004. – vol. 52. – P. 35–53.
173. Bocharnikov, Y.V. / Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways / Y.V.Bocharnikov, A.M.Tobias, C.Roberts, et al. // *IET Electr. Power Appl.* - 2007. - 1(5). - P. 675–682.
174. Büker, T. Stochastic modelling of delay propagation in large networks / T.Büker, B.Seybold // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. - 2012. - №2. - P. 34–50.
175. Cacchiani, V. Overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling / V.Cacchiani et al. // *Transportation Research, Part B*. – 2014. - vol. 63. - P. 15-37.
176. Caimi, G.C. Algorithmic decision support for train scheduling in a large and highly utilized railway network: PhD Thesis / G.C.Caimi. - Institute for Operations Research, ETH Zurich, Zurich, 2009. – 131 p.
177. Caprara, A. Modeling and solving the train timetabling problem / A.Caprara, M.Fischetti, P.Toth // *Operations Research*. – 2002. - vol. 50. - iss. 5. - P. 851-861.
178. Carey, M. Exact heuristic measures of schedule reliability / M.Carey, S.Carville // *Journal of Operational Research Society*. - 2000. - 51. - P. 666–682.

179. Carey, M. Scheduling trains on a network of busy complex stations / M.Carey, I.Crawford // *Transportation Research, Part B*. - 2007. – vol. 41.- P. 159–178.
180. Carey, M. Stochastic approximation to the effects of headways on knock-on delays of trains / M.Carey,A.Kwieceński // *Transportation Research, Part B*. -1994. - 28 (4). - P. 251-267.
181. Chebotarev, V. Probabilistic model of delay propagation along the train flow: book chapter / V.Chebotarev, B.Davydov, K.Kablukova; ed.: dr. A.Kostogryzov // *Probabilistic Modelling in System Engineering*. – [S. I.] : InTechOpen, 2018. – P. 171-193.
182. Chevrier, R. Multi-objective Evolutionary Algorithm for Speed Tuning Optimization with Energy Saving in Railway: Application and Case Study / R.Chevrier // 4th Int. seminar on Railway Operations Modeling and Analysis : Book of abstracts. - Rome, 2011, Feb. 16–18. – P. 40.
183. Chou, Y. H. Dynamic Distributed Control for Real-time Rescheduling of Railway Networks [Электронный ресурс] / Y.H.Chou, P.F.Weston, C.Roberts // *Proc. of the 2nd Internat. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. - Hannover, Germany, 2007.–1 электр. опт. диск (CD-ROM).
184. Cordeau, J.-F. A survey of optimization models for train routing and scheduling / J.-F.Cordeau, P.Toth, D.Vigo // *Transportation Science*. - 1998. - 32(4). - P. 380–404.
185. Corman, F. A tabu search algorithm for rerouting trains during rail operations / F.Corman et al. // *Transportation Research, Part B*. - 2010. - 44 (1). - P. 175–192.
186. Corman, F. Effectiveness of dynamic reordering and rerouting of trains in a complicated and densely occupied station area / F.Corman et al. // *Transportation Planning and Technology*. – 2010. - №10. – P. 81-98.
187. Corman, F. Optimal inter-area coordination of train rescheduling decisions / F.Corman et al. // *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2012. - 48 (1). – P. 71-88.
188. Corman, F. Optimal multi-class rescheduling of railway traffic / F.Corman et al. // *Internat. Seminar on Operational Research (InteriOR 2011)*. – 2011. - P. 49-60.

189. Corman, F. Real-time Railway Traffic Management: dispatching in complex, large and busy railway networks: PhD thesis / F.Corman. - The Netherlands, 2010. – 197 p.
190. Christoforou, Z. Managing Planned Disruptions of Mass Transit Systems / Z.Christoforou, E.Corbillé, N.Farhi, F.Leurent // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. - 2016. - vol. 2541. - P. 46-55.
191. Chaudhury, I.A. A research survey: review of flexible job shop scheduling techniques / I.A.Chaudhury, A.A.Khan // International Transactions in Operational Research. – 2016. – vol. 23. – Iss. 3 – P. 551-591.
192. D’Acierno, L. Defining Robust Recovery Solutions for Preserving Service Quality during Rail/Metro Systems Failure / L.D’Acierno, et al. / Intern. Journal of Supply and Operations Management. – 2016. – vol.3. –Iss. 3. - P. 1351- 1372.
193. Davydov, B. Adaptive Stochastic Model for the Train Rescheduling / B.Davydov, V.Chebotarev, K.Kablucova // Planning, Simulation and Optimisation Approaches : 7th International Confer. on Railway Operations Modelling and Analysis, Lille, France, 4-7 April 2017. - P. 1532-1548.
194. 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.
195. Davydov, B. Basic Framework for Adjusting the Freight Train Schedule / B.Davydov, V.Gopkalo, V.Esaurov, K.Kablukova // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence): Intern. conf. of Computational Science and Its Applications, SPb, 1-3 June 2019. - P. 163-176.
196. Davydov, B. Basic Framework for the Energy-Effective Train Dispatching / B.Davydov, V.Gopkalo, A.Godyaev // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. - vol. 791. - P. 3-12.
197. Davydov, B. Checking and forecasting method for the rail traction energy consumption [Электронный ресурс] / B.Davydov, A.Lokhach, L.Muginstein // Symposium on Formal Methods for Railway Operation and Control Systems, Budapest, 2003. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

198. 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.

199. Davydov, B. Online energy-efficient train traffic adjustments / B.Davydov, V.Gopkalo // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. - vol. 692. - P. 236-244.

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

201. Davydov, B. Optimal rescheduling for the mixed passenger and freight line / B.Davydov, B.Dynkin, V.Chebotarev // WIT Transactions on The Built Environment. - 2014. - vol. 135. - P. 649-661.

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

203. 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.

204. Davydov, B. Prediction of the train traffic when random failures occur / B.Davydov, V.Chebotarev, B.Dynkin, K.Kablucova // The 6th Internat. conference on Railway Operations Modelling and Analysis, RailTokyo 2015. - Tokyo, Japan, 2015.

205. Davydov, B. Random delays forming in the dense train flow / B.Davydov, V.Chebotarev, K.Kablucova // WIT Transact. on the Built Environment: 16th Internat. Conf. on Railway Engineering Design & Operation, Lisbon, 2-4 July 2018.

206. Davydov, B. Real Time Energy Consumption Monitoring as a Tool for the Freight Trains' Dispatching / B.Davydov, V.Hopkalo // The 4th IET Intern. Conference on Railway Condition Monitoring: proc., Derby, UK, June 2008. – P. 18-12.

207. 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.

208. Davydov, B. Some Features of Formatting the Arrival Time Distribution / B.Davydov, V.Chebotarev, K.Kablucova, V.Gopkalo // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence): Intern. Conf. of Computational Science and Its Applications, SPb, 1-3 June 2019. - P. 148-161.

209. Davydov, B. 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.

210. Davydov, B. Stochastic model for the real-time train rescheduling / B.Davydov, V.Chebotarev, K.Kablucova // International Journal of Transport : COMPRAIL 2017 : special iss. – 2017. - vol. 1. - N. 3. - P. 307-317.

211. Davydov, B. Stochastic Traffic Models for the Adaptive Train Dispatching / B.Davydov, V.Chebotarev, A.Godyaev // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. - vol. 451. - P. 323–333.

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

213. Davydov, B. The Model of Arrival Time Distribution Forming in the Dense Vehicle Flow / B.Davydov, V.Chebotarev, K.Kablucova // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. - vol. 1083 AISC. - P. 69–78 - DOI.org/10.1007/978-3-030-34069-8_6.

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

215. D'Ariano, A. A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network / A.D'Ariano, D.Pacciarelli, M.Pranzo // European Journal of Operational Research. - 2007. - 183 (2). - P. 643 – 657.

216. D'Ariano, A. An advanced real-time train dispatching system for minimizing the propagation of delays in a dispatching area under severe disturbances [Электронный ресурс] / A.D'Ariano, M.Pranzo // Proc. of the 2nd Internat. Seminar on

Railway Operations Modelling and Analysis, Hanover, Germany, 2007.–1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

217. D'Ariano, A. Conflict Resolution and Train Speed Coordination for Solving Real-Time Timetable Perturbations / A.D'Ariano, M.Pranzo, I.Hansen // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. - 2007. - 8(2) - P. 208-222.

218. D'Ariano, A. Improving Real-Time Train Dispatching: Models, Algorithms and Applications: PhD thesis / D'Ariano Andrea. – The Netherlands, 2008. – 230 p.

219. De Shutter, B. A Model Predictive Control Approach for Recovery from Delays in Railway Systems / B.De Shutter,T.J.Van Den Boom, A.Hegyí // Transportation Research Record. – 2002. - 1793. - P. 15–20.

220. Dessouky, M. Strategies for effective rail track capacity usage / M.Dessouky et al. // METRANS project: final report. - California, Jan. 2010. – 64 p.

221. Ditmeyer, S.R. Weather Information and Intelligent Railroad Systems / S.R.Ditmeyer // FRA - AAR - NCAR Symposium on Enhanced Weather Information for Improved Railroad Safety and Productivity. - Boulder, Colorado, Oct. 17-18 2001. - P. 91-105.

222. Dongen, L. Einsparung von Zugforderenergie bei NS Reizigers / L.Dongen, W.Feichter // Elektrische Bahnen. – 2000. - vol. 98. - №11-12. – P. 448-452.

223. Dreo, J., Metaheuristics for Hard Optimization / J.Dreo,A.Petrowski, P.Siarry,E.Taillard. - Springer, 2006. – 280 p.

224. Fan, B. A hybrid algorithm for optimal junction traffic control / B.Fan, C.Roberts, P.Weston // 4th Int. seminar on Railway Operations Modeling and Analysis : Book of abstracts, Rome, Feb. 16–18 2011. – P. 65.

225. Fei-jie Wang. A Novel Train Traffic Control Method Based on Time Petri Nets and Immune Quantum Optimization Algorithm / Fei-jie Wang, Zhong-ying Bai // Proc. of the International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. – 2010. - vol. 01. - P. 273-277.

226. Festa, P. GRASP: An annotated bibliography / P.Festa, M.G.C.Resende : eds. Ribeiro,C.C., Hansen,P. // Essays and surveys in metaheuristics. - Kluwer Academic Publishers, 2002. - P. 325–368.

227. Geoffrion, A.M. Lagrangian Relaxation Applied to Facility Location Problems / A.M.Geoffrion, R.McBride // AIIE Transactions. – 1978. - vol. 10. – P. 40-48.
228. Ghoseiri, K. A multiobjective train scheduling model and solution / K.Ghoseiri, F.Szidarobszke, M.Asgharpour // Transportation research, Part B. – 2004. - vol. 38. - №10. - P. 927-952.
229. Ghosh, S. Fundamental issues in intelligent transportation systems / S.Ghosh // Journal of Rail and Rapid Transit: Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. – 1999. - vol. 213. - № 2, March 1. - P. 125-131.
230. Gordon, R. Intelligent Freeway Transportation Systems. Functional Design / R.Gordon. - Springer, 2009. - 215 p.
231. Goverde, R.M.P. Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis : PhD thesis / Goverde R. - Technical University of Delft, 2005. – 165 p.
232. Goverde, R.M.P. Railway timetable stability analysis using max-plus system theory / R.M.P.Goverde // Transportation Research, Part B. – 2007 - 41(2). - P. 179-201
233. Hallowell, S.F. Optimal dispatching under uncertainty: with application to railroad scheduling : PhD thesis / S.F.Hallowell. - University of Pennsylvania, 1993. - 193 p.
234. Hebrard, E. Robust solutions for constraint satisfaction and optimization / E.Hebrard, B.Nich, T.Walsh // Proc. of the 16th European Conference on AI (ECAI 2004). – 2004. – P. 186–190.
235. Higgins, A. Optimal scheduling of trains on a single line track / A.Higgins, E.Kozan, L.Ferreira // Transportation Research, Part B. -1996, vol. 30. - № 2. - P. 147-161.
236. Higgins, A. Scheduling of railway track maintenance activities and crews / A.Higgins // The Journal of the Operational Research Society. - 1998. - vol. 49. - iss. 10. - P. 1026-1033.
237. High speed, energy consumption and emissions : UIC Report. - Paris, 2010. – 51 p.
238. Ho, T.K. Evaluation on service quality of railway timetable [Электронный pecып] / T.K.Ho, Y.O.He // Traffic and Transportation Studies: 6th Intern.Conference

on Traffic and Transportation Studies Congress, Nanning, China, 5-7 Aug. 2008.
Режим доступа: [https://doi.org/10.1061/40995\(322\)64](https://doi.org/10.1061/40995(322)64).

239. Hong, Sungwook. Incentive-compatible capacity pricing for congested transportation facilities: A game-theoretic approach: PhD thesis / Hong, Sungwook. - University of Pennsylvania, 1991. - 258 p.

240. Huisman, D. Operations research in passenger railway transportation : research paper / D.Huisman, L.Kroon, R.Lentink, M.Vromans // Erasmus Research Institute of Management (ERIM), 2005. - № ERS-2005-023-LIS. - 46 p.

241. Huisman, T. Running times on railway sections with heterogeneous train traffic / T.Huisman, R.J.Boucherie // Transportation Research, Part B. – 2001. - vol.35. - P. 271–292.

242. Jacobs, J. Rescheduling / J.Jacobs: eds. Hansen, I., Pachl, J. // Railway Timetable & Traffic. Analysis, Modelling, Simulation. - Hamburg: Eurailpress, 2008. – P. 182-190.

243. Jamili, A. Solving a periodic single-track train timetabling problem by an efficient hybrid algorithm / A.Jamili et al. // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2012. - №25. - P. 793-800.

244. Jovanovic, D.N. Improving railroad on-time performance: Models, algorithms and applications: PhD Thesis / D.N.Jovanovic. - University of Pennsylvania, 1989. - 162 p.

245. Kawakami, T. Dynamic Power Saving Strategy and Data System for Future Shinkansen Traffic Control / T.Kawakami // Proc. of the Fourth Intern. Symposium on Autonomous Decentralized Systems. - USA, 1999. –P. 18-29.

246. Kawakami, T. Future Framework for Maglev Train Traffic Control System Utilizing Autonomous Decentralized Architecture / T.Kawakami // Proc. of the 3rd Intern. Symposium on Autonomous Decentralized Systems. – 1997. - P. 327–334.

247. Kecman, P. A Model-Predictive Control Framework for Railway Traffic Management / P.Kecman, R.Goverde, A.Van den Boom // Proc. of the 3th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. – 2011. - P. 57-72.

248. Khan, M.B. Stochastic Optimization Model and Solution Algorithm for Robust Double-Track Train Timetabling Problem / M.B.Khan, Xuesong, Zhou // *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*. – 2010. - vol.11. - iss. 1. – P. 81-89.

249. Kraay, D. Optimal Pacing of Trains in Freight Railroads: Model Formulation and Solution / D.Kraay, P.T.Harker, B. Chen, B // *Operations Research*. - 1991. - vol.39. - iss. 1, Jan/Feb. - P. 82-100.

250. Kraft, E.R. A reservation-based railway network operations management system: PhD thesis / E.R.Kraft. - University of Pennsylvania, Phil., 1998. – 164 p.

251. Lamorgese, L. An exact decomposition approach for the real-time train dispatching problem [Электронный ресурс] / L.Lamorgese, C.Mannino // *SINTEF: Technical report, A24355*. – 2013. – 46 p. Режим доступа: <https://doi.org/10.15302/J-FEM-2017042>.

252. Local Search in Combinatorial Optimization / Eds: Aarts,E., Lenstra,J.K. – Chichester : John Wiley and Sons, 1997. – 362 p.

253. Longo, G. Considerations on the Application of AHP/ANP Methodologies to Decisions Concerning a Railway Infrastructure / G.Longo et al. // *Proc. of the Intern. Symposium on the Analytic Hierarchy Process*. - Jan. 2009. - P. 91-105.

254. Mascis, A. Job shop scheduling with blocking and no-wait constraints / A.Mascis, D.Pacciarelli // *European Journal of Operational Research*. – 2002. - vol. 143. – P. 498–517.

255. Mascis, A. Scheduling Models for Short-term Railway Traffic Optimisation / A.Mascis, D.Pacciarelli, M.Pranzo // *Proc. of the 9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport*. - SanDiego, U.S.A, 2004. – P. 91-99.

256. Mazzarello, M. A traffic management system for real-time traffic optimization in railways / M.Mazzarello, E.Ottaviani // *Transportation Research, Part B*. - 2007. - 41 (2). - P. 246–274.

257. Mes, M. Comparison of agent-based scheduling to look-ahead heuristics for real-time transportation problems / M.Mes,A.van der Heijden,N.van Harten // *European Journal of Operational Research*. - 2007. - 181(1). - P. 59-75.

258. Middelkoop, A.D. Exploring the effects of Dynamic Traffic Management [Электронный ресурс] / A.D.Middelkoop, R.Hemelrijk // Dagstuhl Seminar on Algorithmic Methods for Railway Optimization. - Schloss Dagstuhl, Wadern, Germany: 2004. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

259. Miyatake, M. A simple adjustment of runtimes between stations for saving traction energy by means of mathematical programming / M.Miyatake, R.Kuwahara, S.Nakasa // WIT Transactions on The Built Environment: Computers in Railways XIII. – 2012. - vol. 127. – P. 451-459.

260. Montigel, M. Rescheduling in the ETCS Level 2 environment [Электронный ресурс] / M.Montigel, C.Kleiner, E.Achermann // Proc. of the 2nd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. - Hannover, Germany, 2007. – 1 электр. опт. диск (CD-ROM).

261. Mu, Shi, Efficient dispatching rules on double tracks with heterogeneous train traffic / Mu, Shi, M.Dessouky // Transportation Research Part B: Methodological. – 2013. - vol. 51. – P. 181-197.

262. Muhlhans, E. Berechnung der Verspätungsentwicklung bei Zugfahrten / E.Muhlhans // Eisenbahntechn. Rundschau ETR. – 1990. - vol. 39. - (7/8). - P. 465–468.

263. Murali, P. A Delay Estimation Technique for Single and Double-track Railroads / P.Murali et al. // Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review. – 2010. - vol. 46. - iss. 4 (July) – P. 483-495.

264. Narendra, K.S. Adaptive control using multiple models / K.S.Narendra, J.Balakrishnan // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1997. - vol. 42. - №2. - P. 171–187.

265. Nishizawa, K. A Method to Speedily Pairwise Compare in AHP and ANP / K.Nishizawa // Proc. of the Intern. Symposium on the Analytic Hierarchy Process. – 2005. - P. 121-129.

266. Pacciarelli, D. Introduction and classification of existing rescheduling literature / D.Pacciarelli // 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Copenhagen, 13-15 May, 2013. - P. 125-138.

267. Pacciarelli, D. Reordering and Local Rerouting Strategies to Manage Train Traffic in Real Time / D.Pacciarelli et al. // *Transportation Science*. – 2008. - vol. 42. - No. 4, Nov. 2008. - P. 405-419.
268. Pearl, J. Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving / J.Pearl. – Boston : Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1984. – 186 p.
269. Policella, N. Generating robust schedules through temporal flexibility / N.Policella et al. // *Proc. of the 14th International Conference on Automated Planning and Scheduling, ICAPS'04*. – 2004. - P. 209–218.
270. Quan Lu. Modeling Train Movements through Complex Rail Networks / Quan Lu, M.Dessouky, R.C.Leachman // *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. – 2004. - vol.14. - P. 32-76.
271. Richter, T. Systematic Analysis of Transit Freight Train Performance / T.Richter // 4th Int. seminar on Railway Operations Modeling and Analysis: Book of abstracts, Rome, Feb. 16-18 2011. - P. 35.
272. Rodriguez, J. A constraint programming model for real-time train scheduling at junctions / J.Rodriguez // *Transportation Research, Part B*. – 2007. - 41 (2). – P. 231–245.
273. Saaty, T. Decision Making with thy Analytic Network Process / T.Saaty. - Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2006. - 278 p.
274. Saaty, T. Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process / T.Saaty, L.Vargas. - Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. - 333 p.
275. Sahin, H. New combinatorial approaches for solving railroad planning and scheduling problems: PhD thesis / Sahin Huvench. - Florida, 2006. - 145 p.
276. Sakovitz, C. Optimizing train priorities to support the regulation of train services with the assistance of active and deductive databases / C.Sakovitz, E.Wendler // *WIT Trans. on The Built Environment: Computers in Railways X*. –2006. - P. 489–499
277. Salido, M.A. Robustness in Railway Transportation Scheduling / M.A.Salido, F.Barber, L.Ingolotti // 7th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA '08), Chongqing, China, June 2008. - P. 2833-2837.

278. Schaafsma, A. Dynamisch rail verkeersmanagement, besturings-concept voor rail verkeer op basis van het Lagenmodel Verkeer en Vervoer : PhD thesis / A.Schaafsma. - Delft, The Netherlands, 2001. – 165 p.
279. Schaefer, H. Computer-aided train dispatching with expert systems / H.Schaefer // Proc. of the International Conference on Electric Railways in a United Europe. - 1995. - P. 28–32.
280. Schittenhelm, B. Identification of Timetable Attractiveness Parameters by an International Literature Review / B.Schittenhelm // 4th Int. seminar on Railway Operations Modeling and Analysis: Book of abstracts, Rome, Feb. 16-18 2011. – P. 27.
281. Search Methodologies : Introductory Tutorials / Burke, E., Kendall, G. (eds.) // Optimization and Decision Support Techniq. - Berlin: Springer, 2005. – 289 p.
282. Shah, N. Price and Frequency Competition in Freight Transportation / N.Shah,J.K.Brueckner // Transportation Center. - Irvine: University of California, 2011. - UCTC-FR-2011-15. - 38 p.
283. Sharples, S. The Impact of Automation in Rail Signalling Operations / S.Sharples,L.Millen,D.Golightly,N.Balfe // Pros. of the Inst. of Mechanical Engineer. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2011. - vol. 225. - № 2. – P. 179-191.
284. Shoji, S. New Trends of Train Control and Management Systems with Real-Time and Non-Real-Time Properties / S.Shoji,A.Igarashi // Proc. of the 3rd Intern. Symposium on Autonomous Decentralized Systems. – 1997. - P. 319–326.
285. Smith, M.E. Train Dispatching Effectiveness with Respect to Communication-based Train Control: Quantification of the Relationships / M.E.Smith,R.R.Resor, P.Patel // Journal of the Transp. Research Board. – 1997. - vol. 1584. - № 4. - P. 22-30.
286. Suharko, A. Tactical Network Flow and Discrete Optimization Models and Algorithms for the Empty Railcar Transportation Problem : PhD thesis / A.Suharko. - Blackburg, Virginia, 1997. - 106 p.
287. Suteewong, W. Algorithms for solving the train dispatching problem for general networks: PhD thesis / W.Suteewong. - University of Southern California, 2006. - 128 p.

288. Törnquist, J. Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms / J.Törnquist // 5th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2005), Palma de Mallorca, Spain, 2005. – P. 218-237.

289. Törnquist Krasemann, J. Design of an effective algorithm for fast response to the rescheduling of railway traffic during disturbances / J.Törnquist Krasemann // Transportation Research, Part C. – 2012. – 20(1). - P. 62-78.

290. Tompson, L. A vision for railways in 2050: background document / L.Tompson // Transport and Innovation, Unleashing the Potential : International Transport Forum, Leipzig, Germany, 2010. – 33 p.

291. Tou, J.T. Modern Control Theory / J.T.Tou // N.-Y. : McGraw-Hill Book Co., Inc., 1964. - 343 p.

292. Valencia, F. Congestion Management in Motorways and Urban Networks Through a Bargaining Game Based Coordination Mechanism / F.Valencia et al. // Game Theoretic Analysis of Congestion, Safety and Security, Traffic and Transportation Theory. – 2015. - vol. 1. - P. 1-40.

293. Van Den Boom, T.J.J. On a model predictive control algorithm for dynamic railway network management [Электронный ресурс] / N.J.J.Van Den Boom, B.De Schutter // Proc. of the 2nd Internat. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Hannover, Germany, 2007. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

294. Van Den Boom, T.J.J. Permutation-based algorithm to optimally reschedule trains in a railway traffic network / T.J.J.Van den Boom et al. // Proc. of the 18th IFAC World Congress. - Milano, Italy, 2011. - P. 9537–9542.

295. Van Thielen, S. Considering a dynamic impact zone for real-time railway traffic management / S.Van Thielen,F.Corman,P.Vansteenwegen // Transportation Research, Part B. – 2018. – vol. 111. - P. 39–59.

296. Vromans, M. Reliability and heterogeneity of railway services / M.Vromans, R.Dekker, L.G.Kroon // European Journal of Operational Research. – 2006. - 172. – P. 647–665.

297. Vromans, M. Reliability of Railway Systems: PhD thesis / Vromans, M. - The Netherlands, 2005. – 244 p.
298. Wang Zhuo. The Theory and Method of Design and Optimization for Railway Intelligent Transportation System (RITS) / Wang Zhuo, Jia Li-min. - Bentham eBooks, 2011. – 148 p.
299. Wegele, S., Dispatching of train operations using genetic algorithms [Электронный ресурс] / S.Wegele, E.Schnieder // Proc. of the 1st Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Delft, the Netherlands, 2005. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
300. Wegele, S. Real-time decision support for optimal dispatching of train operation [Электронный ресурс] / S.Wegele, R.Slovak, E.Schnieder // Proc. of the 2nd Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Hannover, Germany, 2007.– 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
301. Wong, K.K. Coast Control for Mass Rapid Transit Railways with Searching Methods / K.K.Wong, T.K. Ho // IET Electric Power Applications. - 2004. - 151(3). - P. 365-376.
302. Wüst, R. A Multi-Component Closed-Loop Control Framework for Railway Networks / R.Wüst et al. // 12th Swiss Transport Research Conference. - Monte-Verita, May 2-4, 2012. - P. 1-34.
303. Yuan, Jianxin. Stochastic Modelling of Train Delays and Delay Propagation in Stations: PhD Thesis / Yuan, Jianxin. - The Netherlands, 2006. - 142 p.
304. Zhou, L.J. On-line monitoring system for capacitive traction power equipment of high-speed railway / L.J.Zhou, G.N.Wu, J.Liu // Electrical Insulation and Dielectric Phenomena: Annual Report Confer. - West Lafayette, 17-20 Oct.2010.– P.1-3

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСДК	автоматизированная система диспетчерского контроля
АСКУЭ	автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии
АСУЭ	автоматизированная система учета электроэнергии
АСОУП	автоматизированная система оперативного управления перевозками
АСУ	автоматизированная система управления
ВНИИЖТ	Всероссийский НИИ железнодорожного транспорта
ГДПР	график движения поездов
ГИД	график исполненного движения
ДГП	диспетчер направления
ДНЦ	поездной диспетчер
ДСП	дежурный по станции
ДЦ	диспетчерская централизация
ДЦУП	центр диспетчерского управления
ЕНР	единые нормы расходов
ЕТП ЖДП	единый технологический процесс железнодорожных перевозок
ИСУЖТ	интеллектуальная система управления железнодорожным транспортом
ИТС	интеллектуальная транспортная система
КАСАТ	автоматизированная система анализа технологических нарушений
ЛП	линейное программирование
ЛПР	лицо, принимающее решение
МАИ	метод анализа иерархий
МИИТ	Московский институт инженеров транспорта
МПС	Министерство путей сообщения
МСУД	мобильная система
НИИАС	НИПКИ информатизации, автоматизации и связи на транспорте
НТС	научно-технический совет
ОАО	открытое акционерное общество
ПТР	правила тяговых расчетов

РЖД	Российские железные дороги
РФФИ	Российский фонд фундаментальных исследований
СКО	среднеквадратическое отклонение
СЭМН	ситуационно-эвристический метод нормирования
ТС	транспортное средство
ТЭР	топливно-энергетический ресурс
ЦЛП	целочисленное линейное программирование
CDR	Conflict Detection and Resolution
FCFS	First-Come, First-Served
LIFO	Last-In, First-Out
TSC	Train Speed Coordination
RDTM	Railway Dynamic Traffic Management

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты внедрения результатов исследований и разработок

АКТ

внедрения результатов научных исследований и разработок
Давыдова Бориса Израильевича

Настоящим актом подтверждается, что доцент ДВГУПС, к.т.н. Давыдов Борис Израильевич в 1999-2005 годах руководил и принимал непосредственное участие в выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по заданиям Дальневосточной железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

Под руководством Б. И. Давыдова выполнены следующие работы:

- цикл исследований и разработок по созданию Автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии, расходуемой на тягу поездов (АСКУЭ) (работы 1999-2002 г.г.);
- работы, направленные на снижение уровня «условных» потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения и обеспечение объективного учета расхода энергии в условиях заездов локомотивных бригад Дальневосточной и Забайкальской железных дорог на участки соседних дорог (работы 2002-2003 г.г.);
- работы по совершенствованию оперативного управления движением поездов с использованием критерия энергетической эффективности (работы 2002-2005 г.г.).

Давыдов Б. И. принимал непосредственное участие в проектировании системы, монтажно-наладочных работах на 23 объектах энергоснабжения – тяговых и трансформаторных подстанциях, оборудованных измерительными комплексами АСКУЭ первого поколения. Значительный вклад внес он в доработку и внедрение программного обеспечения для пунктов контроля расхода электроэнергии. Результатом работ явилась сдача в 2001 году в опытную эксплуатацию АСКУЭ тягового электроснабжения в границах поставки энергии Дальневосточной дороге от системы «Амурэнерго» и на участке Владивосток-Находка (система «Дальэнерго»).

В дальнейшем после завершения работ по созданию системы автоматизированного учета Давыдов Б. И. занимался исследованиями, связанными с определением динамики расходования электрической энергии на тягу поездов на участках главного хода Дальневосточной железной дороги. Результаты этой работы неоднократно докладывались на заседаниях технического совета дороги, использовались при разработке мероприятий по совершенствованию управления движением поездов, рациональному построению системы взаиморасчетов с энергосистемами и с Забайкальской железной дорогой.

Результатом работ, направленных на снижение уровня «условных» потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения, явились разработанные Давыдовым Б. И. рекомендации по корректировке режимов работы тяговых подстанций с целью уменьшения перетоков энергии по контактной сети. Анализ динамики расходования электроэнергии по тяговым подстанциям на границе между Дальневосточной, Забайкальской дорогами и данных о расходе энергии локомотивами, проведенный Давыдовым Б. И. в 2002 году, позволил выявить причину повышенного уровня «условных» потерь – ошибки учета энергии. Выполненная работа явилась вкладом в совершенствование системы учета, улучшение взаимодействия с Забайкальской железной дорогой в вопросах рационального использования электроэнергии.

В процессе выполнения НИОКР (договор № 7315, руководитель Давыдов Б. И.) определена возможность снижения затрат энергетического ресурса путем рационализации управления потоком поездов со стороны диспетчерского персонала. В основе совершенствования технологии лежат более тщательное планирование пропуска поездов с учетом энергетического критерия, тесное взаимодействие поездного диспетчера с локомотивными бригадами. С целью обеспечения персонала ДЦУП и локомотивных депо

оперативной информацией об электропотреблении, в рамках НИОКР разработана и внедрена АИС «Ресурс-Э», позволяющая получать данные о расходе электроэнергии на тягу в реальном масштабе времени с привязкой к объемам перевозочной работы по участкам дороги. Аналога разработанной системы в ОАО «РЖД» нет. Полученные с помощью АИС «Ресурс-Э» данные позволили практически проверить и доработать рекомендации персоналу диспетчерского центра и персоналу локомотивных депо, направленные на снижение потребления энергии.

В рамках НИОКР № 073173 (руководитель и основной исполнитель Давыдов Б. И.) впервые на сети дорог разработана методика оценки вклада диспетчерского персонала в процесс расходования энергии на тягу. При выполнении НИОКР разработано и внедрено дополнение к «Положению о премировании аппарата ЕЦДУ», учитывающее показатели экономии энергии.

Результатом работ явилась сдача в опытную эксплуатацию комплекса организационно-технических мероприятий по экономии энергии на тягу на участке Бира – Ружино. В период опытной эксплуатации в 2003 году сэкономлено электроэнергии в объеме более 3 млн. кВтч (составляющая, обусловленная улучшением управления движением поездов).

В результате внедрения результатов работ, указанных выше, Дальневосточной железной дорогой получен значительный экономический эффект. Часть этого эффекта (не менее 50 процентов) является результатом усилий Давыдова Б. И. Его личный вклад может быть оценен суммой 8,5 млн. рублей. Следует также отметить значительную полезность работ, выполненных Давыдовым Б. И., для углубления знаний практических работников хозяйств тяги, управления движением, энергоснабжения по вопросам эффективного использования электроэнергии в поездной работе и взаимоотношений с поставщиками электроэнергии.

Главный инженер Дальневосточной
железной дороги – филиала ОАО «РЖД», к.т.н.

В. А. Крапивный

04.12.2009



АКТ
внедрения результатов научных исследований и разработок
Давыдова Бориса Израильевича

19 ноября 2009 года

Настоящим актом подтверждается, что Давыдов Борис Израильевич, доцент Дальневосточного государственного университета путей сообщения в 2004-2007 г. г. принял участие в следующих работах, выполненных по заказу ОАО «Российские железные дороги»:

1. Разработка Энергетической стратегии железнодорожного транспорта на период до 2020 года.

2. Разработка нормативного документа: «Методика определения расхода энергии на тягу поездов в условиях взаимозаездов локомотивных бригад».

Результаты указанных работ внедрены на Российских железных дорогах, что позволило организовать процесс целенаправленного повышения энергетической эффективности основных технологических процессов, улучшить качество отчетной информации в области топливозэнергопотребления.

Лично Давыдовым Б. И. разработаны следующие разделы:

- вопросы, касающиеся перспектив развития энергетики России в свете обеспечения энергетической безопасности Российских железных дорог, рационального взаимодействия ОАО «РЖД» с поставщиками топливно-энергетических ресурсов;

- ряд основных положений указанной «Методики определения расхода энергии», позволяющих учесть особенности распределения энергии между единицами подвижного состава на участке взаимозаездов.

Следует также отметить, что под руководством Давыдова Б. И. проведены работы, целями которых явились определение путей уменьшения расхода электроэнергии на тягу поездов, снижение небаланса энергии в системе электроснабжения ряда железных дорог: Дальневосточной, Забайкальской, Юго-Восточной, Южно-Уральской.

Доля экономического эффекта от внедрения результатов научных исследований и разработок по указанной тематике, которой может быть оценен вклад Давыдова Б. И., составляет 2,0 миллиона рублей в расчете на год.

Заместитель начальника Управления
планирования и нормирования материально-
технических ресурсов ОАО «Российские
железные дороги»



Школьников
Е. И. Школьников