

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»



На правах рукописи

Бадажков Михаил Александрович

Повышение эффективности использования графика движения
грузовых поездов

Специальность 05.22.08 – Управление процессами перевозок
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель (консультант)
доктор технических наук, доцент
С. А. Бессоненко

Новосибирск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЗОРНЫЙ АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПО ГРАФИКУ	10
1.1 Основные этапы развития способов организации движения поездов на основе нормативного графика	10
1.2 Анализ отечественного опыта совершенствования методов построения и использования графиков движения поездов	15
1.3 Анализ зарубежного опыта в создании системы организации перевозочного процесса.....	25
1.4 Направление исследования	34
Выводы по главе 1.....	39
2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ И ПОРЯДКА ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ.....	41
2.1 Исследование взаимосвязи уровня выполнения графика и эксплуатационными показателями	41
2.2 Исследование влияния степени заполняемости графика на время простоя вагона на технической станции	51
2.3 Вероятность возникновения сверхнормативного простоя поездов на технических станциях.....	66
2.4 Расчет эффективности использования действующего графика движения поездов на железной дороге.....	71
2.5 Влияние человеческого фактора на процесс планирования отправления поездов	81
Выводы по главе 2.....	83
3 ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИТОК НОРМАТИВНОГО ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В СИСТЕМЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ПОЕЗДНОЙ РАБОТЫ.....	85
3.1 Разработка алгоритма планирования отправления поездов на нитки графика	85
3.2 Оптимизация использования ниток графика движения поездов	94

3.2.1 Разработка способа планирования отправления поездов, повышающего эффективность использования ниток графика	94
3.2.2 Валидация разработанной программы расчета рационального распределения поездов	109
3.2.3 Практическое применение способа рационального планирования отправления грузовых поездов без использования автоматизации планирования.....	111
3.2.4 Влияние применения способа рационального планирования отправления поездов на перевозочный процесс в рамках полигона	118
3.3 Действия оперативного персонала при возникновении сбоя в движении поездов на участке или станции	123
Выводы по главе 3.....	134
4 ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА ПЛАНИРОВАНИЯ ОТПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ НА НИТКИ ГРАФИКА.....	136
4.1 Расчет изменения эксплуатационных показателей в результате применения предложенного рационального способа планирования	136
4.2 Оценка эффективности перевозочного процесса при рациональном распределении поездов	141
Выводы по главе 4.....	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	153
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Изменение приема и сдачи поездов по стыкам Западно-Сибирской железной дороги.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Статистические данные о погрузке Западно-Сибирской железной дороги.....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Расчет сокращения эксплуатационных расходов при рациональном распределении поездов между нитками графика за счет применения рационального способа планирования	172
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Справка о внедрении результатов диссертационного исследования	182

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. График движения поездов формирует единую технологию работы железнодорожного транспорта: обеспечивает функционирование станций, узлов, участков, локомотивного комплекса; увязывает работу различных дирекций и служб [24]; способствует уменьшению эксплуатационных расходов железных дорог [4].

В условиях роста экономики России наблюдается увеличение размеров движения грузовых поездов (на 15–20 % за последние 10 лет). Данный фактор приводит к необходимости увеличения количества используемых ниток графика в пределах участков и повышения пропускной и перерабатывающей способности технических станций. ОАО «РЖД» стремится сократить эксплуатационные расходы и повысить качество услуг на всех этапах перевозочного процесса. Одной из мер по оптимизации перевозочного процесса является разработка и использование наиболее рациональных вариантов графиков движения поездов. Анализ выполнения нормативного графика движения поездов показывает, что существуют возможности более эффективного использования пропускной способности участков железных дорог и ниток графика движения поездов, в том числе за счет применения различных вариантов пропуска поездов.

На современном этапе развития железнодорожного транспорта актуальным направлением является разработка научных принципов рационального использования ниток графиков движения поездов. Существует потребность усовершенствовать алгоритм выбора ниток графика для отправления поездов на этапе планирования с целью сокращения эксплуатационных расходов. Алгоритм использования графика движения поездов – это практический инструмент для обеспечения пропуска поездов в необходимом количестве при рациональном использовании ниток графика. Следовательно, исследование способов рационализации использования графика движения грузовых поездов является актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Научные положения диссертации основаны на работах ведущих отечественных и зарубежных исследователей и ученых в области железнодорожного транспорта. Вопросам построения, исследования графика движения поездов и разработки методов его улучшения посвятили свои работы: А. Э. Александров, А. Ф. Бородин, С. А. Виноградов, А. С. Гершвальд, П. А. Козлов, Г. А. Кузнецов, В. Н. Морозов, В. И. Некрашевич, О. В. Осокин, А. Т. Осьминин, Л. А. Осьминин, Н. В. Парамонова, Е. Н. Розенберг, И. Н. Розенберг, В. Н. Толмачев, В. И. Уманский, И. Н. Шапкин, А. В. Шипулин, W. D. Burgel, P. Foran, J. Heator, G. Rothwell и др.

Многие авторы и исследователи пытаются решить задачу по рациональному пропуску поездов путем построения «идеального» нормативного графика. Вопросам рационального использования нормативных ниток действующего графика придается второстепенное значение, однако в этой области сосредоточен большой потенциал для технологических улучшений.

Объект исследования – система управления на железнодорожном транспорте.

Предмет исследования – организация движения грузовых поездов на основе графика и планирование их отправления с технических станций.

Цель исследования – повышение эффективности использования ниток графика на основе совершенствования системы организации планирования отправления грузовых поездов.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- проанализировать и обобщить опыт ведущих отечественных и зарубежных исследователей в области разработки и использования графика движения поездов;
- выявить зависимость между параметрами графика движения поездов и выполнением качественных показателей (участковой скорости, времени простоя поездов на технических станциях, эксплуатационных расходов) железнодорожного транспорта при пропуске поездов по участкам сети железных дорог;

- усовершенствовать существующую технологию планирования отправления грузовых поездов с технических станций, ограничивающих двухпутные участки, по ниткам графика движения;

- разработать алгоритм выбора оптимальной последовательности отправления грузовых поездов на нитки графика для его использования в автоматизированных системах управления движением поездов;

- оценить эффективность применения предлагаемого способа планирования отправления поездов на примере изменения показателей работы железной дороги и эксплуатационных расходов.

Область исследования. Диссертационная работа выполнена в соответствии с п. 1 «Планирование, организация и управление транспортными потоками» паспорта научных специальностей ВАК 05.22.08 «Управление процессами перевозок» (технические науки).

Научная гипотеза. Научная гипотеза диссертационного исследования состоит в том, что повышение эффективности перевозочного процесса возможно за счет рационального использования ниток нормативного графика движения поездов. Данная мера ведет к снижению эксплуатационных расходов, связанных с пропуском поездов по участкам.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1 На основе анализа графика движения поездов и математического (имитационного) моделирования алгоритмической формы установлена аналитическая зависимость между параметрами графика и качественными показателями работы железнодорожного транспорта.

2 Усовершенствована существующая технология планирования отправления грузовых поездов с технических станций, ограничивающих двухпутные участки, по ниткам графика движения с помощью авторского способа, заключающегося в распределении поездов между нитками на основе критерия минимизации эксплуатационных расходов и обеспечивающего их эффективное использование.

3 На основе авторского способа планирования разработан точный алгоритм действий оперативного персонала при планировании отправления поездов. Разработанный алгоритм адаптирован для использования в автоматизированных системах управления движением поездов.

4 В качестве нормативно-справочной информации для планирования предложена дифференциация ниток графика, совмещенная со стоимостными оценками следования поезда по каждой из них.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты исследования применимы для прогнозирования изменения показателей эксплуатационной работы в зависимости от степени заполняемости графика и его выполнения.

Разработанный способ эффективного планирования отправления поездов применим для определения порядка отправления поездов с технических станций, ограничивающих двухпутные участки, где производится смена локомотивов и/или локомотивных бригад. Использование предлагаемого порядка планирования позволит снизить на 20 % эксплуатационные расходы, связанные со стоянками поездов на промежуточных станциях участка.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой работы послужила совокупность эмпирических и теоретических методов: методы прогнозного анализа; элементы теории вероятностей, математической статистики; методы синтеза, моделирования, наблюдения, прогнозирования, аппроксимации, экстраполяции, корреляции.

Основные положения, выносимые на защиту:

- способ планирования отправления грузовых поездов, повышающий эффективность использования ниток графика и снижающий эксплуатационные расходы при пропуске поездов по участку;
- алгоритм использования способа планирования отправления поездов, автоматизированный и ручной варианты его применения;
- методика прогнозирования простоя грузовых поездов со сменой локомотива и/или локомотивной бригады на технических станциях, основанная на его зависимости от параметров графика движения.

Личный вклад автора заключается:

- в получении описательной аналитики, необходимой для исследования, на основе которой предложено теоретическое обоснование полученных эмпирических и статистических наблюдений;

- разработке способа рационального планирования отправления грузовых поездов, определении границ и порядка его применения;

- разработке алгоритма действий по принятию решений для использования автоматизированными системами управления движением поездов.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность результатов исследования обеспечивается корректным применением математического аппарата, анализом исполненного и нормативного графиков движения поездов, комплексным использованием теоретических и эмпирических положений транспортной науки. Сформулированные в диссертации научные положения обоснованы расчетами и базируются на доказанных выводах.

Основные положения диссертации докладывались: на Международной научно-технической конференции студентов и молодых ученых «Молодежь. Наука. Технологии» – МНТК-2017 (18–20 апреля 2017 г., г. Новосибирск); VIII Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (28 марта – 1 апреля 2017 г., г. Иркутск); XLI Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика» (3–4 апреля 2017 г., г. Алматы); IV Международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта» (22–25 мая 2018 г., г. Донецк); Международной научно-практической конференции «Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика» (19–20 октября 2017 г., г. Новосибирск); X Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (15–16 ноября 2018 г., г. Новосибирск); на заседаниях кафедры «Управление эксплуатационной работой», научно-технического совета факультета «Управление процессами перевозок» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Личный вклад автора в опубликованных в соавторстве работах составляет не менее 80 %. Он заключается в постановке задач, проведении исследований и расчетов, обобщении полученных результатов и разработке моделей и алгоритмов. Автором выдвинуты опубликованные идеи, получено их экспериментальное подтверждение, разработан способ планирования отправления грузовых поездов, сформулированы научные положения.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 12 работ, в том числе пять в ведущих научных рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки России, и одна в издании, индексируемом международной базой данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 156 наименований и четырех приложений. Работа содержит 182 страницы машинописного текста, включает 16 таблиц и 50 рисунков.

1 ОБЗОРНЫЙ АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПО ГРАФИКУ

1.1 Основные этапы развития способов организации движения поездов на основе нормативного графика

Организация процесса перевозки на железнодорожном транспорте осуществляется на основе движения поездов по графику, который обеспечивает единую технологию работы различных дирекций и служб железнодорожного транспорта [24]. График движения поездов (ГДП) согласовывает работу предприятий и обеспечивает уменьшение эксплуатационных расходов железных дорог [102].

Для организации движения поездов разрабатывается нормативный график. Однако на практике оказывается, что подвод поездов к тому или иному участку не соответствует графику. Поэтому возникают сбои при пропуске поездов на участке в соответствии с разработанным графиком. В этом случае порядок пропуска поездов зависит от профессионализма поездного диспетчера.

В диссертации В. Н. Толмачева [121] приведены результаты анализа работы диспетчеров. Процент принятия оптимальных решений при пропуске поездов по временно однопутному участку составляет от 7 % до 12 %. Такие показатели обусловлены прежде всего дефицитом времени на принятие решения. Человеческие возможности по обработке поступающей информации и принятию на ее основе верных решений ограничены, а поездная обстановка складывается напряженная и выходит за рамки существующих шаблонов работы. Количество возможных вариантов пропуска поездов исчисляется десятками.

В. Н. Толмачев приводит следующие выводы:

1 «График движения поездов должен охватывать не только ограничивающий участок, но и прилегающие к нему участки. Уровень выполнения графика будет повышаться при увеличении количества участков его использования, на которых будет синхронизироваться работа в условиях текущей поездной обстановки. Изменения в движении поездов на участке спровоцируют цепную реакцию появления

несоответствий графику на непосредственно прилегающих к нему участках. Особенно это касается грузонапряженных направлений» [120].

2 «Необходимо обеспечить периодическое обновление графика с учетом складывающейся обстановки либо изменение порядка его использования. Данная мера требуется ввиду наличия отклонений от графика по ряду причин (возникающие неисправности тягового подвижного состава, отказы технических средств в инфраструктурном комплексе и др.). Система, занимающаяся построением графика, должна отслеживать все возникающие в течение времени отклонения и через определенные периоды времени создавать для работников новые, приведенные в соответствие с текущим поездным положением, варианты графика, либо варианты пропуска поездов по существующему графику с учетом выявленных изменений» [121].

А. Ф. Бородин в диссертационной работе [24, 25] пишет о необходимости адаптации базовых технологических документов (плана формирования и ГДП) к возникающим изменениям обстановки в период их действия. В связи с этим такие документы должны иметь вариантные решения.

На современном этапе развития транспорта ГДП не до конца соответствует определяемой Правилами технической эксплуатации (ПТЭ) роли, т. е. не является полноценной основой организации движения. Основная причина этого – различие между детерминированной природой графика и неравномерной природой станционных процессов, вагоно- и поездопотоков. Хотя уже сегодня от доставки грузов по расписанию зависит не только слаженность работы, но и получение компанией ОАО «РЖД» дополнительного дохода от данной услуги [79].

Для решения этой проблемы А. Ф. Бородин [24, 25] предлагает:

- повысить уровень согласованности технологических процессов, являющихся составными частями системы организации эксплуатационной работы. Для этого, по его мнению, необходимо расширить сферу применения твердого графика в грузовом движении;

- увязать график движения поездов с работой станций;

- организовать работу поездных локомотивов по графику и локомотивных бригад по именованным расписаниям.

В исследованиях [92, 129, 130] для преодоления данных противоречий было рекомендовано использовать совмещенный график движения поездов (СВГД). К его особенностям относятся:

- наличие вариантного числа расписаний, которые позволяют учитывать колебания поездопотоков и выделять категории ниток графика, соответствующие размерам грузового движения;

- наличие вариантной специализации ниток, которая позволяет использовать группы ниток для пропуска поездов нескольких назначений плана формирования.

В основе построения СВГД заложена трехуровневая система. Нитки, входящие в график, делятся на три группы:

- 1) ядро ниток, обеспеченное локомотивами и бригадами (закладывается нормативным круглогодичным графиком);
- 2) нитки, добавляемые в соответствии с ежемесячной корректировкой ГДП;
- 3) добавляемые или исключаемые нитки при сменно-суточном планировании.

По результатам исследований [25, 26] А. Ф. Бородин приходит к выводу, что такая система обеспечит достаточную гибкость формирования графика и его актуальность.

Решить проблему организации движения поездов можно только комплексно. Движение по твердым ниткам графика иногда требует уменьшения норм массы, соответственно, нужно разработать гибкие, экономически обоснованные нормы массы для каждой категории поездов. При этом необходимо учитывать, что потери от уменьшения массы поезда зачастую компенсируются выполнением графика движения поездов [25].

На современном этапе развития экономики РФ наблюдается рост поездопотока (приложения А, Б), что приводит к ряду проблем в работе транспорта. Одной из мер по оптимизации технологии перевозочного процесса является разработка и

использование наиболее рациональных вариантов графиков движения поездов [46].

Одним из критериев эффективности перевозок является размер пени, которую выплачивает ОАО «РЖД» за опоздание доставки грузов и передислокации порожних вагонов [32, 58]. Для повышения эффективности перевозочного процесса А. С. Гершвальдом предложен алгоритм управления поездопотоками по критерию минимума затрат вагоно-часов [33]. В настоящее время разработаны методы обеспечения сроков доставки при железнодорожных перевозках [49].

В докторской диссертации [43] Ю. В. Дьяков доказал, что число поездов, пропускаемое в условиях ограничения пропускной способности, например, по временно однопутному перегону, прямо влияет на устойчивость линии в целом. В его работе показано, что станции менее чувствительны к ограничивающим размерам движения факторам при условии наибольшего числа пропускаемых поездов. Автор указывает, что более интенсивное движение поездов приведет к увеличению темпа работы станций. На них уменьшатся задержки поездов по причине ожидания локомотива, возрастет участковая скорость на участке. Однако позитивное влияние на работу станции от увеличения числа поездов произойдет лишь при условии, что их количество будет находиться в пределах пропускной способности участка.

При недостатке пропускной способности, например, при возросших размерах движения или переходе на временно однопутное движение при производстве путевых работ, возникают дополнительные задержки поездов. На примере вариантных графиков в диссертации Е. Н. Светлаковой [104] проведен анализ факторов, влияющих на задержки поездов. Одним из определяющих факторов является интенсивность движения по участку.

На основе опыта максимального ограничения пропускной способности (в условиях предоставления «окон») на грузонапряженном Барабинском участке Западно-Сибирской железной дороги М. Ф. Климов рассмотрел эффективность различных методов пропуска поездов [59].

А. И. Богачев в своих работах [22, 23] обосновал необходимость применения безобгонного пропуска поездов для повышения пропускной способности.

На пропускную способность влияет величина межпоездного интервала. Сократить межпоездной интервал возможно с применением радиолокационных устройств [72, 89]. В работе Т. В. Костромы [72] показана возможность сокращения интервалов для пропуска всех поездов, прибывающих во время «окна» по временно однопутному перегону, т. е. при условии максимальной степени заполняемости графика.

Вопросам повышения пропускной способности посвящены труды Е. Н. Розенберга [99, 100, 102]. В них исследуются возможности и эффективность применения инновационных систем интервального регулирования, основывающихся на автоблокировке с подвижными блок-участками. В проекте «Цифровая железная дорога» им предложены решения по автоматизации работы станций. В настоящее время проходят испытания системы интервального регулирования, использующие в работе стандарт связи DMR. Е. Н. Розенбергом предлагается использовать технологию виртуального сцепления поездов, сокращающую интервал между ними в обычных условиях до 6 мин. Интервальное регулирование при помощи подвижного блок-центра обеспечивает двухминутный интервал между поездами [99, 100, 102, 123]. В основе указанных систем лежат такие современные технологии, как ГЛОНАСС/GPS (навигация), DMR и LTE (связь), BigData (анализ данных) [99, 100, 102].

В условиях повышения интенсивности движения поездов необходимо иметь высокий уровень автоматизации принятия решений диспетчерским аппаратом. В. Н. Толмачев в своей работе [120] создал методику оптимизации оперативного управления, повышающую уровень автоматизации данного процесса. В ней показано применение вариантных графиков для реализации резервов пропускной способности.

Одной из отечественных разработок, направленных на совершенствование формирования графика движения поездов, является Автоматизированная система разработки и контроля оперативного графика движения поездов в период предоставления «окон» (АС ОГДПО). Данная система решает ряд проблем, возникающих при формировании графика движения поездов в условиях проведения «окон».

Появление ряда практических решений для автоматизированной разработки графика стало возможным после публикации работ [52, 110]. В работах [7, 77] предлагается методика автоматизированного построения максимальных графиков.

Н. В. Парамоновой было предложено при разработке графика движения стремиться к тому, чтобы интервалы между пассажирскими поездами были кратны межпоездному интервалу, т. е. была возможность без дополнительных потерь пропустить один или несколько грузовых поездов [89].

В современных условиях к графику предъявляются более жесткие требования. Недостаточно выполнить вышеобозначенные условия [89]. График призван обеспечить минимизацию эксплуатационных расходов, связанных с движением поездов. Зачастую расходы зависят от следующих параметров графика движения поездов:

- последовательности отправления поездов, относящихся к различным категориям;
- интервалов между поездами;
- взаимного расположения на двухпутных участках поездов как одного направления, так и противоположных.

Рекомендации по регулированию этих параметров частично представлены в ряде работ [51, 136, 144, 149, 156]. Кроме того, уже предпринимались попытки осветить вопрос оптимизации использования графика исходя из критериев эффективности [53, 76], однако возникали проблемы с практическим применением ввиду необходимости выполнять большое количество расчетов, что недопустимо при оперативном планировании.

1.2 Анализ отечественного опыта совершенствования методов построения и использования графиков движения поездов

В настоящее время перед железнодорожным транспортом стоят задачи по оптимизации использования подвижного состава, увеличению скорости движения поездов и их массы, оборота вагона [86, 127]. От указанных параметров напрямую

зависит скорость перевозки и расходы на ее осуществление [121]. Данные задачи возможно реализовать лишь с применением современных вычислительных технологий и имитационного моделирования.

В 50-х гг. XX в. стало понятно, что наличие ЭВМ позволит переложить функции построения графика движения поездов от человека к машине. Этому вопросу посвятили исследования такие ученые, как А. П. Петров, В. М. Акулиничев, В. В. Повороженко, Е. М. Тишкин, Н. А. Самарина, С. С. Жабров, Г. И. Державец, Д. Ю. Левин. Ими разработаны алгоритмы рациональной увязки ниток графика движения, обеспечивающие оптимальный оборот локомотивов и использование пропускной способности [84]. Указанными авторами решена задача построения графика для различных размеров движения в зависимости от требований конкретной ситуации, в том числе для максимального уровня использования пропускной способности участка.

В это же время появились идеи автоматизированного управления движением поездов по разработанному графику. Б. А. Завьялов одним из первых предложил для системы «Автодиспетчер» алгоритм выбора варианта продвижения поездов на участке, основываясь на критерии их приоритетности, а также текущей поездной обстановки [84].

Б. дел Рио в Институте кибернетики АН УССР сделал шаг к оптимизации графика движения поездов. Им разработан алгоритм построения графика, обеспечивающий максимальное сокращение числа стоянок на участке следования поезда в зависимости от его приоритетности [97]. В данной методике применялся принцип разделения графика на небольшие временные отрезки и анализ вариантов распределения ниток на каждом из них. На каждом временном интервале выбирался вариант распределения, после чего рассматривался следующий интервал [97]. Недостаток методики заключался в невозможности повторной переоценки принятых решений.

При определении рационального варианта распределения поездов сотрудником ЛИИЖТ А. Г. Барткусом предложено выбрать в качестве критерия оптималь-

ности графика эксплуатационные расходы, связанные с простоем поездов. Проблемой на тот момент времени (60-е гг. XX в.) явилась недостаточная мощность вычислительной техники для оперативного проведения требуемых расчетов. Между учеными существовала неопределенность в выборе принципа построения алгоритма планирования отправления поездов. Ряд исследователей склонялся к чисто эвристическому способу построения, другие признавали только математический аппарат. На стыке этих двух идей были приверженцы объединения обоих направлений и использования их совокупности [84].

В настоящее время также предпринимаются попытки при построении графика движения поездов учесть экономическую эффективность, возникающую при его использовании и зависящую от массы поездов. Для решения данной задачи используются такие системы, как ИСКРА-ПТР и ТЭКВес. С их помощью исследователи перешли от рассмотрения отдельных небольших отрезков графика к работе над концепцией выбора оптимальных годовых норм массы поезда [84].

Современными специалистами в области организации движения поездов признается, что планирование работы участка начинается с технических станций (сортировочных, участковых), на которых зарождается большая часть маршрутов. Соответственно, развитие способов использования графика движения возможно за счет совершенствования системы планирования отправления поездов с технических станций. Было доказано, что от качества планирования зависит ритмичность работы транспортного конвейера, уровень транспортных услуг и в конечном итоге конкурентоспособность всей транспортной системы страны [87].

Один из вариантов развития методов планирования – использование твердых ниток графика, которое облегчает формирование поездов и функционирование системы управления перевозками. Однако, как показала практика применения такой системы на сети дорог США [73, 130, 131], возникает проблема неполного использования грузоподъемности подвижного состава и массы поезда, что приводит к необходимости содержания излишне большого вагонного парка и неэффективному

использованию энергии на тягу поездов. При этом выделение твердых ниток графика для тяжеловесных поездов при наличии ограничений в пропускной способности, наоборот, будет целесообразным решением [122].

Действующая в настоящее время на сети ОАО «РЖД» система жесткого нормирования длины и массы поезда сложилась в результате дефицита пропускной и провозной способности, парка локомотивов и вагонов. Однако на фоне усиливающейся конкуренции с другими видами транспорта для сокращения сроков доставки груза появляются предпосылки для перехода ОАО «РЖД» на регулирование движения поездов на основе твердых ниток графика. Соответственно, формирование поездов должно осуществляться по более гибким нормам массы и длины [129].

При реализации движения поездов по твердым ниткам графика также возникает ряд проблем, одной из которых являются непредвиденные сбои и, как следствие, отклонения от разработанного плана. Для нормализации графика при возникновении сбоя, а также для ритмичности работы станций еще в конце 30-х гг. XX в. в нормативных графиках предусматривались резервы. Они представляли собой стоянки грузовых поездов на промежуточных станциях продолжительностью от 10 до 15 мин. Так как подобный опыт положительных результатов не имел [27], с 1940 г. резерв начал создаваться путем увеличения норм стоянок транзитных поездов на участковых станциях.

Кроме того, в 70-х гг. XX в. применялась система, которая учитывала выделение резервов времени хода поездов по диспетчерским участкам. Но и эта система не давала требуемого эффекта. Причиной была недостаточная научная проработка системы, из-за чего величины резервов распределялись по перегонам участка произвольно, что приводило к нерациональному использованию резервов по всему направлению следования [74].

В настоящее время на отечественных железных дорогах создаются автоматизированные диспетчерские системы управления. Разработка методики моделирования графика движения поездов при помощи системы ИСТРА является одним из перспективных направлений [8, 40, 54, 75, 116, 117, 132]. Как правило, процесс

планирования пропуска поездов состоит из решения двух задач: моделирование работы железнодорожных станций узла и моделирование движения поездов по внутриузловым ходам и примыкающим участкам. Система ИСТРА предназначена для решения первой задачи [68]. С помощью нее созданы имитационные модели Демского железнодорожного узла в Уфе и станции Карымская [9, 69].

На современном этапе развития железнодорожного транспорта существуют различные автоматизированные системы управления (АСУ), однако в большинстве они имеют лишь информационный характер [64]. Существуют разные подходы к решению задачи автоматизации планирования. Одним из способов является создание имитационной модели, которая прогнозирует ситуацию, вырабатывает возможные варианты решения и выдает их на рассмотрение диспетчеру [85]. Имитационные модели работы станций и узлов имеют недостаток: они не учитывают структурно-функциональных особенностей станций [64, 65]. Под каждую станцию система планирования оптимизируется в индивидуальном порядке. После применения моделирования на конкретной станции видны улучшения в оптимизации перевозочного процесса. Так, система ИСТРА, в которой используется имитационная модель динамического согласования, может стать основой для реализации современных информационных технологий в транспортных узлах [64, 65, 67].

Одной из современных разработок в области оптимизации графика движения является аппаратно-программный комплекс (АПК) «Эльбрус», который осуществляет построение энергоэффективных ниток для заданных объемов движения, при этом учитывает задаваемое изменение характеристик участка, инфраструктуры, плановые «окна». АПК «Эльбрус» применяется на всей сети российских железных дорог и обеспечивает существенное сокращение расхода электроэнергии на тягу поездов. Однако все указанные операции АПК «Эльбрус» осуществляет в плановом режиме и не учитывает возникающих сбоев и непредвиденных ситуаций [30]. В АПК «Эльбрус» заложена система противодействия лишь небольшим по продолжительности сбоям, возникающим при ведении поезда, путем реализации дополнительных резервов времени хода для каждой нитки графика [80].

Разработчики АПК «Эльбрус» указывают на прямую зависимость между разницей технических скоростей поездов, обращающихся на участке, и эксплуатационными расходами, связанными с простоем поездов. Разница в технических скоростях влияет на число остановок на участке, влекущих увеличение расходов на трогание поезда и простой, связанный с занятием путей отдельных пунктов [80]. Кроме того, существенно влияет на тяговые расходы доля использования пропускной способности участка – степень заполняемости графика движения поездов, при увеличении которой уменьшается участковая скорость и увеличиваются расходы, связанные с простоем поездов.

Одна из тенденций развития современного рынка железнодорожных услуг заключается в подходе к ниткам графика как к ресурсу, который можно продавать потребителю. Стоимость ниток графика при этом в большей части будет зависеть от энергоэффективности их использования [30]. Именно за построение энергоэффективного графика отвечает АПК «Эльбрус».

Система, осуществляющая построение прогнозных энергосберегающих графиков движения поездов, состоит из взаимосвязанных блоков: получения данных из нормативного графика движения поездов; получения информации текущего поезда и условий пропуска; формирования энергосберегающего графика движения поездов; моделирования режимов ведения поезда в процессе его движения по участку пути; ручного ввода данных; передачи в систему управления движением поездов прогнозного графика; получения данных о планируемых «окнах»; получения исполненного графика движения поездов; сопоставления исполненного и прогнозного графиков, – а также средства для прокладки ниток поездов [90].

АПК «Эльбрус» предназначен для непрерывного во времени автоматического ведения и анализа оптимального графика движения поездов на электрифицированных железных дорогах. Оптимальным графиком движения поездов считается такой график, которому соответствуют минимальные эксплуатационные расходы, но в то же время электроэнергетические параметры системы электроснабжения

удовлетворяют требованиям, установленным Правилами технической эксплуатации железных дорог [93]. Формирование оптимального графика осуществляется исходя из расчета пропускной способности участка железной дороги. При построении графика не учитываются данные, касающиеся обстановки на участке, которая может сложиться к времени начала его действия. Кроме того, некоторые начальные данные автоматически не могут быть учтены и должны вводиться вручную. В данном вычислительном комплексе существует ограниченное количество категорий поездов, что делает невозможным автоматическое построение графика движения одновременно для всех железнодорожных составов, обращающихся на участке [90].

Данная система направлена на построение энергооптимального графика движения на электрифицированных железных дорогах. Недостатком АПК «Эльбрус» является отсутствие учета возможных потерь на участке, зависящих от массы поезда, при выборе для него нитки отправления. Такие ситуации возникают, если ниткой заложены стоянки на промежуточных станциях и имеется набор поездов с различными массами. Поезда отправляются в порядке «живой очереди», решения в вопросах планирования принимаются дежурно-диспетчерским персоналом. Исключение – соединенные и тяжеловесные поезда массой более 8000 т, для которых предусмотрены специализированные нитки.

Расходы от энергетических и иных потерь в случае стоянок поездов на промежуточных станциях зависят от порядка отправления поездов, который устанавливается в зависимости от их действительных масс. В работе [53] рассмотрен выбор порядка отправления поездов. Однако выдвинутое предложение базировалось на оптимизации энергозатрат во время движения поездов, а не расходов, связанных с остановками на промежуточных станциях.

В современных условиях, когда пропускная способность отдельных участков используется в среднем на 75–80 % [20], способ отправления поездов на основе принципа очередности приводит к существенным эксплуатационным расходам. Система планирования должна не только осуществлять построение ниток с опти-

мально выбранным временем хода поезда, но и определять целесообразность использования каждой конкретной нитки. Как следствие, в планировании необходимо перейти от принципа очередности к принципу эффективного использования ниток.

Для расширения функциональных возможностей АПК «Эльбрус» может использоваться блок хранения информации по полигону, включающий данные о профиле и плане пути, данные об остановочных пунктах (координаты приемо-отправочных путей, их количество, длина и специализация), данные о допустимых и разрешенных скоростях движения поездов на участках между остановочными пунктами и т. д. [90].

На основании данных о поездном положении, об условиях пропуска местных поездов, поездообразовании в узлах и прогнозе подходов поездов на рассматриваемый участок осуществляется построение прогнозного графика движения поездов.

АПК «Эльбрус» широко используется на полигоне Российских железных дорог и успешно ведет построение прогнозного суточного энергосберегающего графика движения поездов.

Порядок планирования и управления перевозками во многом определяется качеством сменно-суточного планирования в виде графика движения поездов. В настоящее время в диспетчерских аппаратах на железных дорогах обеспечена автоматизация информационных потоков о текущем состоянии перевозочного процесса, работе причастных служб, объемах работ и условиях эксплуатации. Однако при этом отсутствует четкий автоматизированный механизм по интеллектуальному планированию перевозочного процесса (прогнозного графика) с учетом сложившейся обстановки и планируемых условий пропуска [90].

Для анализа структуры поездопотока выполняется расчет количества поездов по категориям их массы (6000, 7000, 9000 т), а также соединенных поездов.

В результате использования АПК «Эльбрус» достигаются следующие цели: ускорение продвижения поездопотока; экономия топливно-энергетических ресурсов за счет сокращения не предусмотренных графиком остановок грузовых поездов

и следования их «по удалению» на желтый огонь светофора; снижение эксплуатационных расходов на перевозки [90].

На современном этапе развития железнодорожного транспорта тема организации движения поездов по графику исследована многими учеными. Ключевые этапы совершенствования методов построения и использования графиков движения поездов отечественными учеными, изученные в настоящей диссертационной работе, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Ключевые этапы совершенствования методов построения и использования графиков движения поездов

Авторы	Год публикации	Положения
1	2	3
Барткус А. Г., Богачев А. И., дел Рио Б., Кузнецов Г. А.	1961–1991	Предложено: <ul style="list-style-type: none"> - применять безобгонный пропуск поездов для повышения пропускной способности; - выбирать в качестве критерия оптимальности графика эксплуатационные расходы, связанные с простоем поездов; - использовать алгоритм построения графика, обеспечивающий максимальное сокращение числа стоянок на участке следования поезда в зависимости от его приоритетности; - учитывать выделение резервов времени хода поездов по диспетчерским участкам
Бородин А. Ф., Козлов В. Е., Кострома Т. В., Некрашевич В. И., Парамонова Н. В., Шапкин И. Н.	1991–2000	Предложено: <ul style="list-style-type: none"> - сокращать интервалы для пропуска поездов при условии максимальной степени заполняемости графика; - применять СВГД; - адаптировать график движения поездов к возникающим изменениям обстановки в период его действия

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
<p>Ададуров С. Е., Коугия В. А., Кудрявцев В. А., Матвеев С. И., Парамонова Н. В., Розенберг Е. Н., Розенберг И. Н., Толмачев В. Н., Шапкин И. Н.</p>	<p>2000–2010</p>	<p>Предложено:</p> <ul style="list-style-type: none"> - использовать методику оптимизации оперативного управления, повышающую уровень автоматизации работы; - обеспечить периодическое обновление графика с учетом складывающейся обстановки либо изменение порядка его использования; - внедрить методику автоматизированного построения максимальных графиков; - использовать интервалы между пассажирскими поездами, кратные межпоездному интервалу; - использовать неполную грузоподъемность подвижного состава при использовании твердых ниток графика; - формировать поезда по более гибким нормам массы и длины
<p>Анисимов В. А., Анисимов В. В., Анфиногенов А. Ю., Виноградов С. А., Гершвальд А. С., Зябиров Х. Ш., Калашников К. А., Кирякин В. Ю., Клюев Н. А., Марквардт К. Г., Мугинштейн Л. А., Осьминин А. Т., Осьминин Л. А., Розенберг Е. Н., Шапкин И. Н.,</p>	<p>2010–2021</p>	<p>Предложено:</p> <ul style="list-style-type: none"> - рассматривать вопрос оптимизации использования графика исходя из критериев эффективности; - внедрить инновационные системы интервального регулирования на основе автоблокировки с подвижными блок-участками; - использовать решение по автоматизации работы станций; - оптимизировать алгоритм управления поездопотоками на направлении по критерию минимума затрат вагоно-часов; - при росте поездопотока разрабатывать и использовать рациональные варианты графиков движения поездов;

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
Ябко И. А.		<ul style="list-style-type: none"> - использовать АПК «Эльбрус», который осуществляет построение энергоэффективных ниток для заданных объемов движения; - использовать разработанные алгоритмы рациональной увязки ниток графика движения, обеспечивающие оптимальный оборот локомотивов и использование пропускной способности; - использовать разработанный алгоритм выбора варианта продвижения поездов на участке, основываясь на критерии их приоритетности; - выбирать порядок отправления поездов на основе оптимизации энергозатрат во время движения поездов

1.3 Анализ зарубежного опыта в создании системы организации перевозочного процесса

Существует немало как отечественных, так и иностранных железнодорожных систем планирования [148]. За рубежом имеется большой опыт использования систем планирования отправления поездов. В большинстве случаев на зарубежных железных дорогах график является основой организации движения поездов [46, 96, 108, 145, 152]. Такая роль графика объясняется:

- наличием больших резервов пропускной способности;
- использованием АСУ;
- постоянной конкуренцией с другими видами транспорта.

На железных дорогах Северной Америки и Европейского союза получила распространение технология отправления грузовых поездов по расписанию [46, 96]. Такая система способствует сокращению эксплуатационных расходов [145, 152]. В европейских и других развитых странах к перевозочному процессу уже давно предъявляются жесткие требования [46, 108]. Особенно выделяются:

- организация перевозки по принципу «точно в срок», соблюдение договорных сроков доставки;
- действие принципа «от двери до двери»;
- переход на безбумажную технологию оформления перевозок;
- выделение небольшого числа станций с последующим их техническим оснащением для концентрации на них маневровой работы;
- возможность получения информации в любой момент времени о местонахождении груза.

В системе перевозок Канады и США основой технологического процесса является график движения поездов [73, 130, 131]. Нитки графика являются твердыми, т. е. состав формируется из вагонов, имеющих в наличии, или без них, под которые подбирается необходимое число единиц тягового подвижного состава. Нет жесткой привязки к минимальной норме массы и длины поезда [130].

Однако в действующем нормативном (твердом) графике движения поездов заложены нитки, которые могут сниматься при отсутствии груза или необходимости проведения «окон». Решение об отмене таких ниток принимается заранее в плановом порядке с использованием АСУ. В США 80 % вагонопотока охвачено регулярными поездами, имеющими свое расписание. Около половины поездов – одногруппные, четверть – двух-, трехгруппные [73, 130, 131].

Особенностью системы расписаний в существующем графике является наличие специализации для всех регулярных поездов. Расписания предусматривают, вагоны какого назначения будут включаться в определенные поезда [51, 114]. Поезда с массовыми грузами (угольные, рудные, зерновые) следуют вне основного расписания кольцевыми маршрутами.

Многие развитые страны уже ввели автоматизированные системы диспетчерского управления (АСДУ) на своей сети железных дорог. Так, американская компания Union Pacific Railways ввела в эксплуатацию АСДУ на базе ЭВМ (ATCS), позволяющую регулировать на полигоне в 32 тыс. км американских и канадских железных дорог движение 200–250 поездов [1, 41, 71, 140]. Система отвечает следующим требованиям:

- повышение скорости и безопасности движения поездов;
- рациональное использование энергоресурсов локомотивами;
- повышение производительности труда персонала.

Американский опыт работы используется и в некоторых европейских странах.

В Великобритании расписания движения составляются на полгода и подвержены частой корректировке. За счет того, что расписания постоянно приводят в соответствие с реальной ситуацией поездобразования, большинство грузовых поездов следует согласно расписанию. Диспетчерское руководство осуществляется при высоком уровне автоматизации и использования ЭВМ. Например, широко используется система автоматической установки маршрута. Она позволяет пропускать поезда в автоматическом режиме и сокращает объем работы диспетчеров. На ЭВМ передаются данные о поезде и его местонахождении. После чего на основе действующей системы очередности пропуска поездов прокладывается маршрут продвижения данного поезда [112].

На французских дорогах придерживаются строгого выполнения графика. Также как и в Великобритании, график разрабатывается каждые полгода [134]. Особенностью французского графика является движение большинства регулярных поездов в ночное время суток. Сборные поезда отправляются утром с тем расчетом, чтобы к середине дня груз был доставлен до грузополучателя. Такая система в чистом виде может существовать в странах с малой протяженностью железных дорог. В ее рамках существует ядро грузовых поездов, следующих точно по расписанию. Нормы массы для таких поездов не фиксированы. При увеличении вагонопотока назначаются дополнительные (факультативные) поезда [51, 134].

Во Франции с 1990 г. функционирует АСДУ ASTREE. В ее основу заложен принцип автоматизированного слежения за местонахождением поездов и принятия управленческих решений на основе имеющейся поездной обстановки. Для этого в ASTREE реализованы следующие функции:

- на получение информации о местоположении тяговой единицы подвижного состава с помощью устанавливаемого на ней автономного устройства;

- актуализация полученных сведений с помощью базы данных, которая содержит достоверную постоянную и оперативно обновляемую информацию;
- осуществление связи с поездами и путевым оборудованием по кабельным линиям с помощью нескольких автоматизированных центров управления;
- формирование системы по модульному принципу [42, 124].

В странах Западной Европы еще в первой половине 80-х гг. XX в. выработали предложения, направленные на повышение качества перевозок [126], особенно в части роста скорости продвижения грузеных вагонопотоков. Было выявлено, что действующие принципы организации вагонопотока в поездах с их периодическим реформированием на попутных станциях имеет низкую эффективность [130]. В настоящее время европейскими железнодорожными ассоциациями RailNetEurope (RNE) и Forum Train Europe (FTE) при поддержке Европейской грузовой железнодорожной ассоциации (ERFA) реализуется программа оптимизации графиков движения поездов. Цели данной программы направлены на повышение конкурентоспособности европейского железнодорожного транспорта. Задачи проекта – повышение маневренности и стабильности перевозок, сокращение пиковых нагрузок и составление качественного расписания движения поездов [135].

Таким образом, для адаптации к условиям рыночной экономики и привлечения новых клиентов железные дороги должны постоянно совершенствовать систему организации перевозочного процесса, повышать мобильность транспорта.

В Европе действует модель, согласно которой внутригосударственные и международные перевозки интегрированы [130]. Кроме того, для грузовых перевозок заложено определенное количество прямых поездов, стабильно курсирующих по континенту. Следование таких поездов организовано на основе единой системы организации движения.

В ФРГ была создана компания Trassenportal Netz, основной задачей которой является рассмотрение заявок на выделение ниток графика под конкретные перевозки и разработка мероприятий по их осуществлению [136]. Существует опыт использования твердых ниток графика движения пассажирских поездов в региональ-

ном и дальнем сообщениях, проложенных на основе математических методов оптимизации. Разработаны модели (Periodic Event Scheduling Problem (PESP), Train Timetabling Problem (ТТР)) и методы их использования [147].

В Германии в сфере пассажирских перевозок внедрен интегрированный тактовый график движения Deutschlandtakt (D-Takt). Он предусматривает синхронизацию движения поездов по всей стране и организацию его в соответствии с интегральным жестким графиком движения (ITF) с коротким временем в пути и максимально подходящим временем прибытия и отправления на пересадочных станциях [138, 142]. Одной из программ, обеспечивающих автоматизированное создание графика движения поездов, является OptKon, используемая на железных дорогах Германии [138].

Наибольшее распространение получило движение групповых поездов малой массы. Скорости движения таких поездов находятся в широком диапазоне. График движения в Германии используется как метод для максимального использования пропускной способности. Как и в других странах, основу графика составляют ежедневные поезда. Однако отличительной особенностью является наличие запасных ускоренных ниток, которые позволяют при необходимости ускорить доставку груза. Поезда, идущие по таким ниткам, занимаются сбором и развозом вагонов от транзитных поездов [51, 134].

В ФРГ к графику относятся как к карте предоставления услуг по пользованию инфраструктурой. Deutsche Bahn Netz AG (DB) предоставляет трассы железнодорожным компаниям-операторам. Деятельность данной компании направлена на повышение пропускной способности железнодорожной инфраструктуры и развитие перспектив снижения тарифов при оплате за пользование трассами [151]. Внимание уделяется также разработке процессов и инструментов, которые задействованы при составлении графиков движения поездов, учитывающих планирование и выполнение работ по техническому содержанию, строительству инфраструктуры и обеспечению безопасности на железных дорогах DB [141]. DB Netz AG имеет опыт применения совместного использования нерегулярного графика движения поездов и основанного на использовании твердых ниток [142].

Система организация движения поездов в Германии нацелена на снижение эксплуатационных расходов при вождении поезда. На сети дорог ФРГ реализуется программа экономии топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, позволяющая достичь 5%-й годовой экономии от общих тяговых затрат [80].

С целью повышения уровня выполнения графика в соответствии с установленными скоростями на немецких железных дорогах предусмотрены резервы в перерывных временах хода [55]. Кроме того, резервы предусматриваются при установлении нормативов на выполнение отдельных технических операций [128].

На железных дорогах ФРГ выделяют следующие факторы, оказывающие негативное влияние на точность выполнения графика движения поездов:

- технические неисправности устройств и железнодорожного подвижного состава;
- несчастные случаи и аварии;
- влияние со стороны сторонних организаций;
- ошибки работников (человеческий фактор);
- влияние погодных условий;
- действия клиентов;
- допущенные на соседних дорогах опоздания поездов;
- ремонтные и строительные работы.

Графиковое время хода в ФРГ состоит из времени движения поезда и компенсационных прибавок. Прибавки разделяются на постоянные и целевые. Постоянные прибавки выражаются в процентах к чистому времени хода. Для пассажирских поездов величина прибавок определяется исходя из вида тяги, массы поезда и скоростей движения. Для грузовых поездов они равны 5 %.

Целевые прибавки компенсируют отклонения от графика из-за производства строительных и ремонтных работ. Величина таких прибавок определяется исходя из объема работ.

Применяется метод контроля и анализа следования поезда в пути с целью выявления опаздывающих поездов. После проведения анализа разрабатываются и принимаются необходимые меры для устранения причин опозданий.

В поддержанном Германским исследовательским обществом (Deutsche Forschungsgemeinschaft – DFG) проекте ATRANS (Anforderungsgerechte Trassenstrukturen und deren Belegung im Netz von Schienenbahnen – «Соответствующие требованиям структуры маршрутов и их документирование на сети железных дорог») разрабатываются алгоритмы для создания оптимизированного графика движения поездов и эффективного использования инфраструктуры при соблюдении эксплуатационного качества. Разработка проекта ATRANS ведется в трех направлениях: ATRANS 1 – создание методики оптимального распределения резервов времени для разработки пакетного графика движения (Университет Штутгарта); ATRANS 2.1 – анализ и оценка алгоритмов для высокоэффективной загрузки предложенных маршрутов (Технический университет Дрездена); ATRANS 2.2 – развитие и оценка синхронных эвристических подходов к загрузке маршрутов (Технический университет Дармштадта) [154].

Представление графиков движения в цифровом формате улучшает организацию перевозок в соответствии с изменившимися запросами клиентов и оптимизирует пропускную способность железнодорожной сети. Запросы рынка и возрастающее количество строительных мероприятий на железных дорогах повышают требования к надежности и клиентоориентированности графиков движения поездов [137].

С помощью перевода данных в цифровой формат и автоматизации графиков движения DB может квалифицированно выполнять требования клиентов и одновременно оптимально обеспечивать запрашиваемый доступ к инфраструктуре [137].

Итальянской исследовательской лабораторией по планированию железнодорожных перевозок (HIFT) при Университете Триеста разработан новый подход к составлению графиков движения поездов. Этот инновационный метод учитывает переменные величины, такие как режим вождения и продолжительность остановки поезда. Находящийся в его основе алгоритм позволяет оценить вероятность конфликтов и задержки поездов с точностью до нескольких секунд и таким образом определить надежность того или иного графика движения [149].

В Израиле с начала 2015 г. применяется программное обеспечение Train Planning System (TPS) от HaCon Ingenieurgesellschaft mbH по составлению графиков движения поездов. Система TPS позволит составлять графики движения и решать вопросы о предоставлении трасс для пассажирских и грузовых перевозок [155].

В Японии проходит испытания система, которая при возникновении чрезвычайной ситуации пересматривает график движения поездов с учетом базовых принципов эксплуатационной деятельности и конкретных условий эксплуатации. Данная технология автоматического пересмотра графиков основывается на информационно-телекоммуникационных технологиях, математической оптимизации и методах машинного обучения на базе правил оперативно-диспетчерского управления (ODR) [149].

В Японии до 1995 г. действовали системы SMIS (информационно-управляющая система) и COMTRAC (система автоматизированного управления движением), которые были заменены системой COSMOS, так как они не справлялись с нагрузкой при нарушении графика движения поездов [2, 3, 56].

При сравнении уровня выполнения графика в иностранных государствах нужно учитывать, что в каждой стране предъявляются различные критерии при анализе выполнения графика. Например, в Германии предельно допустимое опоздание грузового графического поезда составляет 30 мин, в Дании – 10 мин [151]. В некоторых странах, например в Украине, отсутствуют нормативы точности выполнения времени отправления и прибытия поездов на соответствующих станциях [63]. Существуют случаи, например в Нидерландах [142], где максимально допустимая скорость грузовых поездов при разработке графика движения принимается меньшей на 5 км/ч от возможной, а расчетное время хода поездов закладывается с 5%-м увеличением. В Швейцарии добавка ко времени хода соответствует 11 %. Наличие таких резервов времени находит обоснование в работах отечественных исследователей [115].

Одним из предлагаемых вариантов решения задачи выбора оптимальных параметров резервов времени, которые закладываются в график движения, является

использование методов статистического анализа работы сети и имитационного моделирования [84].

Результаты анализа зарубежного опыта в создании системы организации перевозочного процесса представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. – Зарубежный опыт в создании системы организации перевозочного процесса

Регион применения	Используемые методы и положения
1	2
США, Канада, Европа	Технология отправления грузовых поездов по расписанию
США, Канада	Нитки графика являются твердыми, нет жесткой привязки к минимальной норме массы и длины поезда
	Заложены нитки, которые могут сниматься при отсутствии груза или необходимости проведения окон
США	АСДУ на базе ЭВМ (ATCS), позволяющая регулировать движение поездов на полигоне в 32 тыс. км
Великобритания, Франция	Расписания движения составляются на полгода и подвержены частой корректировке
Великобритания	Система автоматической установки маршрута
Франция	Движение большинства регулярных поездов в ночное время суток
	Сборные поезда отправляются утром с тем расчетом, чтобы к середине дня груз был доставлен до грузополучателя
	При увеличении вагонопотока назначаются дополнительные (факультативные) поезда
	Функционирует АСДУ ASTREE
Европа	Внутригосударственные и международные перевозки интегрированы
ФРГ	Выделение ниток графика под конкретные перевозки
	Использование твердых ниток графика движения пассажирских поездов в региональном и дальнем сообщениях, проложенных на основе математических методов оптимизации
	Интегрированный тактовый график движения D-Takt
	Автоматизированное создание графика движения поездов с помощью OptKon
	Наличие запасных ускоренных ниток

Продолжение таблицы 1.2

1	2
	Алгоритмы для создания оптимизированного графика движения поездов и эффективного использования инфраструктуры
Италия	Метод построения графика, учитывающий переменные величины, такие как режим вождения и продолжительность остановки поезда
Израиль	Программное обеспечение TPS по составлению графиков движения поездов
Япония	Система, которая при возникновении чрезвычайной ситуации пересматривает график движения поездов с учетом конкретных условий эксплуатации
Нидерланды, Швейцария	Максимально допустимая скорость грузовых поездов при разработке графика движения принимается с учетом резерва

1.4 Направление исследования

В ходе анализа исследований в области организации движения поездов установлено, что, несмотря на изучение многими учеными вопроса повышения эффективности планирования отправления поездов, существует потенциал по совершенствованию разработанных систем планирования.

Из проведенного анализа научных работ следует, что в настоящее время существует необходимость в технологическом решении, позволяющем, оптимизировать расходы, связанные со стоянками поездов на промежуточных станциях участка.

Место исследования в существующей системе управления движением грузовых поездов показано (выделено цветом) на рисунке 1.1 на примере модульной структуры «Комплексной интегрированной технологии управления движением грузовых поездов по расписанию» (далее – Интегрированная технология) [70].

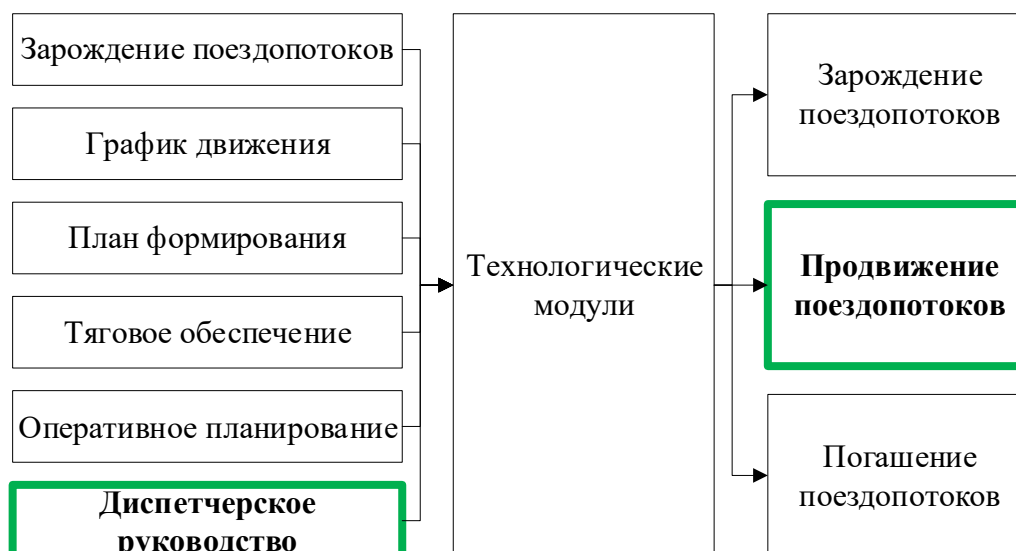


Рисунок 1.1 – Модульная структура интегрированной технологии управления движением грузовых поездов по графику

Интегрированная технология устанавливает порядок организации движения с использованием графика движения с выделением твердых расписаний грузовых поездов [70]. Интегрированная технология охватывает цикл от зарождения до погашения поездопотоков и включает в себя все этапы планирования при использовании графика движения поездов. В диссертационном исследовании рассматривается вопрос продвижения поездов с использованием диспетчерского руководства. Функции, выполняемые диспетчерами различных уровней для продвижения поездов в рамках оперативного регулирования, описаны в Интегрированной технологии, однако их описание не является объемлющим и не решает задач по сокращению эксплуатационных расходов при пропуске поездов по участку на уровне диспетчерского регулирования. Предложенная в разд. 15 Интегрированной технологии ресурсосберегающая технология управления направлена на использование только на малодеятельных линиях [70]. Меры, направленные на снижение эксплуатационных расходов при продвижении поездопотоков, предусмотрены при годовом, месячном, суточном и оперативном планировании. На уровне оперативного назначения поездов, однако, существуют возможности для дополнительного уменьшения эксплуатационных расходов за счет усовершенствования порядка планирования поездов на нитки графика.

Примеры использования графика движения поездов для однопутных и двухпутных участков железных дорог поездным диспетчером с целью уменьшения эксплуатационных расходов (топливно-энергетических ресурсов) были приведены в работах А. Ф. Бородин [25, 26]. Автором предлагалось корректировать отдельные линии хода для сокращения остановок поезда на участке.

В настоящее время существует эффективный инструмент АПК «Эльбрус», рассмотренный в п. 1.2, направленный на снижение эксплуатационных расходов при движении поездов. Однако он решает задачи, относящиеся к определенному этапу планирования (суточному), и, соответственно, не может закрыть весь спектр вопросов планирования отправления поездов. На рисунке 1.2 представлены этапы планирования и приведены примеры предусмотренных мер по сокращению эксплуатационных расходов.

Проведенный в пп. 1.1–1.3 анализ научных работ позволил определить основные направления исследований, проводимых различными учеными. Авторы рассмотренных работ (см. таблицы 1.1, 1.2) были структурированы в зависимости от освещаемого ими этапа планирования в перевозочном процессе и разделены на три группы (см. рисунок 1.2):

1) Анисимов В. А., Анисимов В. В., Богачев А. И., Бородин А. Ф., Бухтеев В. Ф., Ключев Н. А., Козлов В. Е., Кудрявцев В. А., Кузнецов Г. А., Некрашевич В. И., Осьминин А. Т., Осьминин Л. А., Шапкин И. Н., Gang Z., Gonzalez D., Miyatake M., White R.;

2) Ададулов С. Е., Анисимов В. А., Анисимов В. В., Анфиногенов А. Ю., Бородин А. Ф., Виноградов С. А., Зябиров Х. Ш., Кирякин В. Ю., Ключев Н. А., Козлов В. Е., Кострома Т. В., Коугия В. А., Матвеев С. И., Мугинштейн Л. А., Некрашевич В. И., Осьминин А. Т., Осьминин Л. А., Парамонова Н. В., Розенберг Е. Н., Шапкин И. Н., Ябко И. А.;

3) Анисимов В. А., Анисимов В. В., Барткус А. Г., Бородин А. Ф., Б. дел Рио, Калашников К. А., Ключев Н. А., Марквардт К. Г., Осьминин А. Т., Осьминин Л. А., Толмачев В. Н.

Большинством из указанных исследователей рассматривались вопросы, соответствующие этапам составления ГДП и суточного планирования (см. рисунок 1.2).

В Интегрированной технологии представлены различные функции по текущему диспетчерскому планированию поездной работы и регулированию поездов на участке (см. рисунок 1.2). При этом пономерное назначение поездов по ниткам графика заключается в назначении контейнерных, рефрижераторных и других ускоренных поездов на установленные для них специализированные нитки графика движения поездов. Остальные маршруты назначаются на любые нитки графика движения поездов, позволяющие пропуск поездов соответствующего направления, веса и длины [70].

Время отправления поездов при текущем планировании поездной работы устанавливается в соответствии с действующим вариантом графика движения поездов применительно к предусмотренной нумерации поездов по направлениям [70].

В исключительных случаях, когда назначение поезда на нитку графика движения поездов соответствующего направления вызывает его непроизводительный простой в ожидании отправления, разрешается отправлять такой поезд по более ранней свободной нитке графика движения поездов другого попутного направления (с одинаковыми временами хода по перегонам и нормами времени технических стоянок), если разветвление направлений находится не ближе следующей участковой или сортировочной станции [70].

Порядок отправления поездов, установленный Интегрированной технологией, – это планирование поездов по мере их готовности на предусмотренные для них нитки графика в зависимости от установленной нумерации. Диссертационное исследование направлено на изучение и совершенствование способов распределения ниток графика движения для отправления поездов между станциями (см. рисунок 1.2).

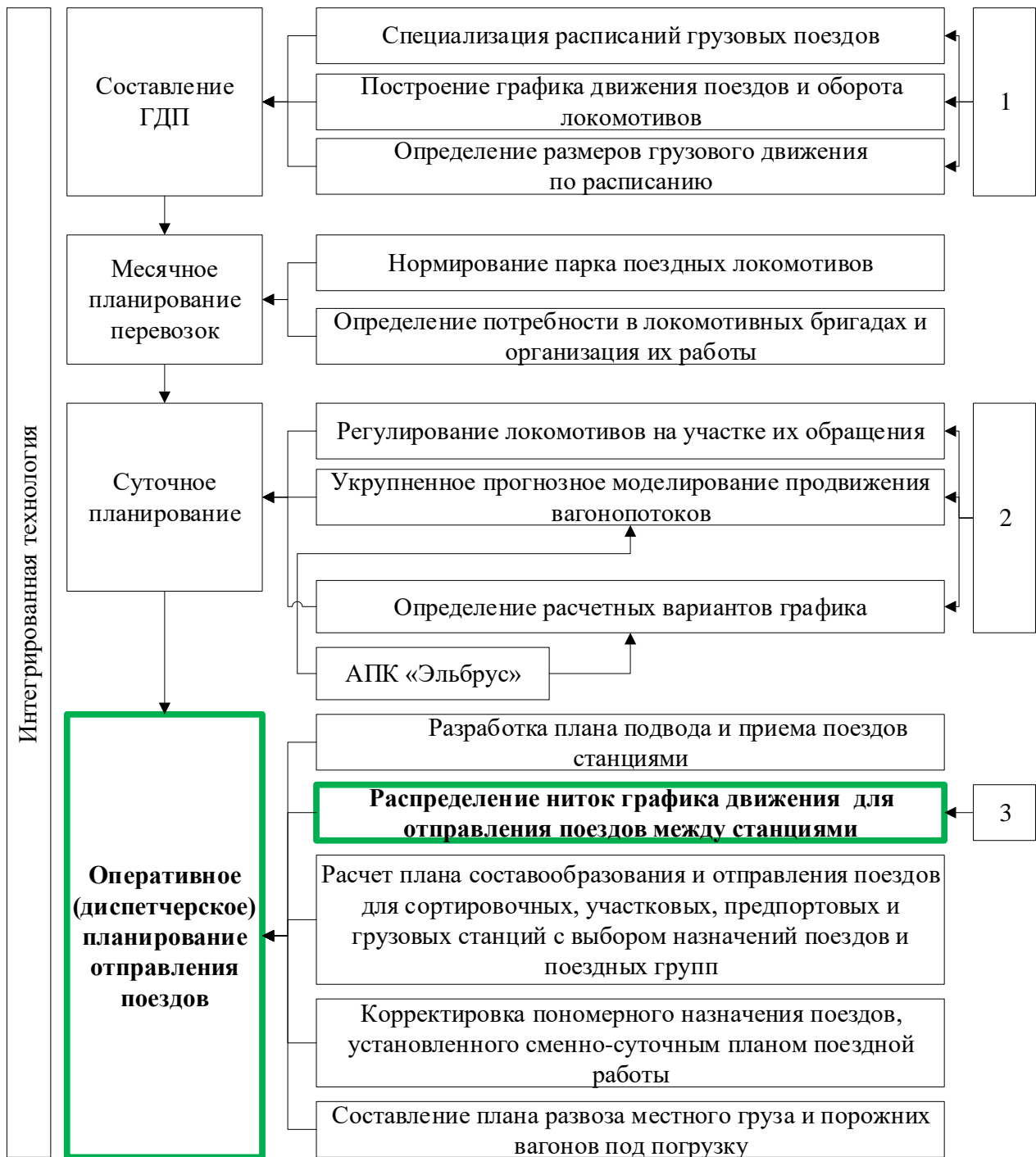


Рисунок 1.2 – Этапы планирования и примеры предусмотренных мер по сокращению эксплуатационных расходов

Соответственно, в работе ставится задача разработать способ определения оптимального порядка отправления поездов и использования ниток графика движения, позволяющий усовершенствовать существующую технологию планирования и снизить эксплуатационные расходы.

Такой способ должен быть представлен в виде алгоритма, пригодного для использования в автоматизированных системах, а также дежурно-диспетчерским персоналом железнодорожного транспорта в оперативных условиях работы.

Кроме этого, необходимо определить степень влияния отказов технических средств и иных сбоев в работе транспорта на организацию движения поездов.

Выводы по главе 1

В результате проведенного в главе 1 исследования установлено следующее:

1 Анализ существующих научных работ [22–25, 27, 59, 92, 104, 120, 121, 129, 130], касающихся применения графика движения поездов и принципов его построения, показал недостаточный уровень исследования вопроса повышения эффективности использования ниток графика за счет рационального планирования отправления поездов с технических станций. Большая часть исследователей пытается решить задачу построения «идеального» графика. Вопросам рационального использования нормативных ниток графика придается второстепенное значение [51, 53, 76, 136, 137, 152, 156].

2 Использование АСДУ носит широкий характер и является ключом к переходу на более качественный уровень организации движения. Теоретически АСДУ решает множество задач: от снижения роли человеческого фактора в процессе организации и контроля за процессом перевозки до возможной оптимизации процесса за счет передачи той или иной части функций прогнозирования и управления от человека к машине. Однако существующие АСДУ не в полной мере могут реализовать возлагаемые на них функции и используются, скорее, как помощники человеку, а не как полноценные управляющие системы.

3 В настоящее время существует необходимость в технологическом решении, которое позволит при использовании нормативных ниток графика уменьшить расходы, заложенные стоянками на промежуточных станциях участка.

4 Требуется разработать способ определения оптимального порядка отправления поездов и использования ниток графика движения, позволяющий усовершенствовать существующую технологию планирования и снизить эксплуатационные расходы.

2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ И ПОРЯДКА ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

2.1 Исследование взаимосвязи уровня выполнения графика и эксплуатационными показателями

Уровень выполнения графика меняется со временем на различных полигонах. Для исследования качественных показателей выполнения графика движения поездов используют методы математической статистики [29].

Проанализированы данные за 2018 и 2019 гг. по изменению времени простоя поездов на технических станциях и участковой скорости, а также уровня выполнения графика «Эльбрус» на технических станциях по отправлению и прибытию поездов. Для анализа использовались данные по станциям (Инская, Барабинск, Московка, Входная); диспетчерским участкам (Барабинск – Московка, Исилькуль – Московка, Называевская – Карбышево I – Комбинатская). Исходные данные приведены в таблицах 2.1–2.4. На основе указанных значений построены графики ежемесячного изменения перечисленных выше показателей в течение года (рисунки 2.1–2.4). На основе имеющихся данных о простое поездов на технических станциях произведен расчет эксплуатационных расходов, учитывающих выполнение графика по отправлению и проследованию поездов.

На рисунке 2.1 видно, что в течение года происходит ухудшение уровня выполнения графика «Эльбрус» по прибытию. Сравнительный анализ изменения участковой скорости (см. рисунок 2.2) и выполнения графика по прибытию (см. рисунок 2.1) показал, что данные показатели изменяются одинаково в течение года. При нарушении графика происходит уменьшение участковой скорости. Нормативным графиком движения поездов разработчики стараются заложить оптимальные параметры пропуска поездопотока. Соответственно, при нарушении норматива заложенные показатели будут ухудшаться. Видно наличие корреляции между графиками изменения участковой скорости (см. рисунок 2.2) и изменения выполнения

графика по прибытию (см. рисунок 2.1). Изменение участковой скорости в весенний и осенний периоды имеет одинаковый характер. Первопричина такого поведения данного показателя – снижение пропускной способности дороги в период летней путевой компании, что привело в том числе к увеличению степени заполняемости графика. Степень заполняемости графика – это отношение числа фактически проследовавших грузовых поездов за рассматриваемый период к числу ниток расписания грузовых поездов в действующем графике движения за аналогичное время [51]. Максимальные потери участковой скорости в апреле, мае, июне, сентябре и октябре соответствуют объемам путевых работ в размере от 10 % до 15 % от годового объема. Увеличение степени заполняемости привело к росту числа используемых ниток графика с остановками на участках и снижению участковой скорости.

Таблица 2.1 – Уровень выполнения графика по отправлению и прибытию поездов в течение 2018 и 2019 гг. на Западно-Сибирской железной дороге

Период	Прибытие			Отправление		
	Всего поездов, поезд	По графику поездов, поезд	Уровень выполнения, %	Всего поездов, поезд	По графику поездов, поезд	Уровень выполнения, %
1	2	3	4	5	6	7
2018						
Январь	3680	1477	40,1	3687	3039	82,4
Февраль	3318	1235	37,2	3336	2580	77,3
Март	3867	1417	36,6	3871	3027	78,2
Апрель	3496	1167	33,4	3499	2580	73,7
Май	3013	984	32,7	3034	2203	72,6
Июнь	3079	974	31,6	3087	2182	70,7
Июль	3920	1281	32,7	3918	2990	76,3
Август	3900	1178	30,2	3909	2914	74,5
Сентябрь	3133	1042	33,3	3141	2243	71,4
Октябрь	4079	1597	39,2	4088	3104	75,9
Ноябрь	4099	1228	30	4105	3078	75

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7
Декабрь	4051	1389	34,3	4075	3162	77,6
<i>Итого</i>	43635	14969	34,3	43750	33102	75,5
2019						
Январь	3855	1624	42,1	3873	2983	77
Февраль	3608	1185	32,8	3614	2646	73,2
Март	4078	1391	34,1	4095	3044	74,3
Апрель	3481	1263	36,3	3490	2497	71,5
Май	3487	1223	35,1	3495	2518	72
Июнь	3223	1350	41,9	3209	2374	74
Июль	3983	1603	40,2	3969	3007	75,8
Август	3800	1113	29,3	3954	3066	77,5
Сентябрь	3781	886	23,4	3783	2922	77,2
Октябрь	4228	960	22,7	4250	3329	78,3
ноябрь	4149	849	20,5	4165	3295	79,1
декабрь	4000	1362	34,1	3999	3019	75,5
<i>Итого</i>	45673	14809	32,71	45896	34700	75,45

Таблица 2.2 – Выполнение участковой скорости в 2019 гг.

Период	Участковая скорость (среднее значение), км/ч		
	Московка – Барабинск	Исилькуль – Московка	Называевская – Карбышево I – Комбинатская
1	2	3	4
Январь	72,0	66,2	68,1
Февраль	71,4	66,3	68,1
Март	72,2	66,4	67,6
Апрель	68,7	61,6	65,4
Май	69,1	61,4	65,2
Июнь	70,6	65,3	67,0
Июль	71,2	66,3	66,2
Август	69,3	61,7	63,3
Сентябрь	69,3	58,4	64,2

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4
Октябрь	71,7	61,8	65,7
Ноябрь	71,6	63,2	64,8
Декабрь	73,0	65,8	67,7

Таблица 2.3 – Выполнение простоя транзитного вагона без переработки на технических станциях в течение 2019 г.

Период	Простой транзитного вагона без переработки, ч			
	Инская	Московка	Барабинк	Входная
Январь	2,08	1,75	1,35	1,41
Февраль	2,61	1,97	1,51	1,48
Март	2,11	2,04	1,43	1,53
Апрель	2,73	2,34	1,71	1,54
Май	3,12	2,43	1,76	1,63
Июнь	3,13	2,30	1,71	1,45
Июль	2,79	2,26	1,55	1,70
Август	2,42	2,18	1,55	1,70
Сентябрь	2,84	2,55	1,63	1,69
Октябрь	2,66	2,06	1,63	1,57
Ноябрь	2,77	2,02	1,54	1,54
Декабрь	2,57	1,90	1,50	1,53

Таблица 2.4 – Среднесуточные расходы от простоя поездов на технических станциях в течение 2019 г.

Период	Количество отправленных транзитных поездов в среднем в сутки, поезд/сут				Эксплуатационные расходы на использование инфраструктуры простаивающими на технической станции поездами, руб./сут			
	Инская	Москов- вка	Бара- бинк	Вход- ная	Инская	Москов- ка	Бара- бинк	Вход- ная
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Январь	84	86	112	56	2400	3050	3060	1600

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Февраль	85	89	117	61	2550	3550	3580	1830
Март	86	91	120	66	2660	3760	3470	2040
Апрель	82	82	107	68	2560	3880	3700	2120
Май	82	80	105	64	2710	3930	3740	2110
Июнь	78	75	101	65	2290	3490	3500	1910
Июль	89	81	118	58	3060	3710	3700	2000
Август	87	78	118	62	2990	3440	3700	2130
Сентябрь	83	81	117	71	2840	4180	3860	2430
Октябрь	91	87	129	68	2890	3630	4260	2160
Ноябрь	98	89	126	68	3050	3640	3930	2120
Декабрь	89	88	116	64	2760	3380	3520	1980

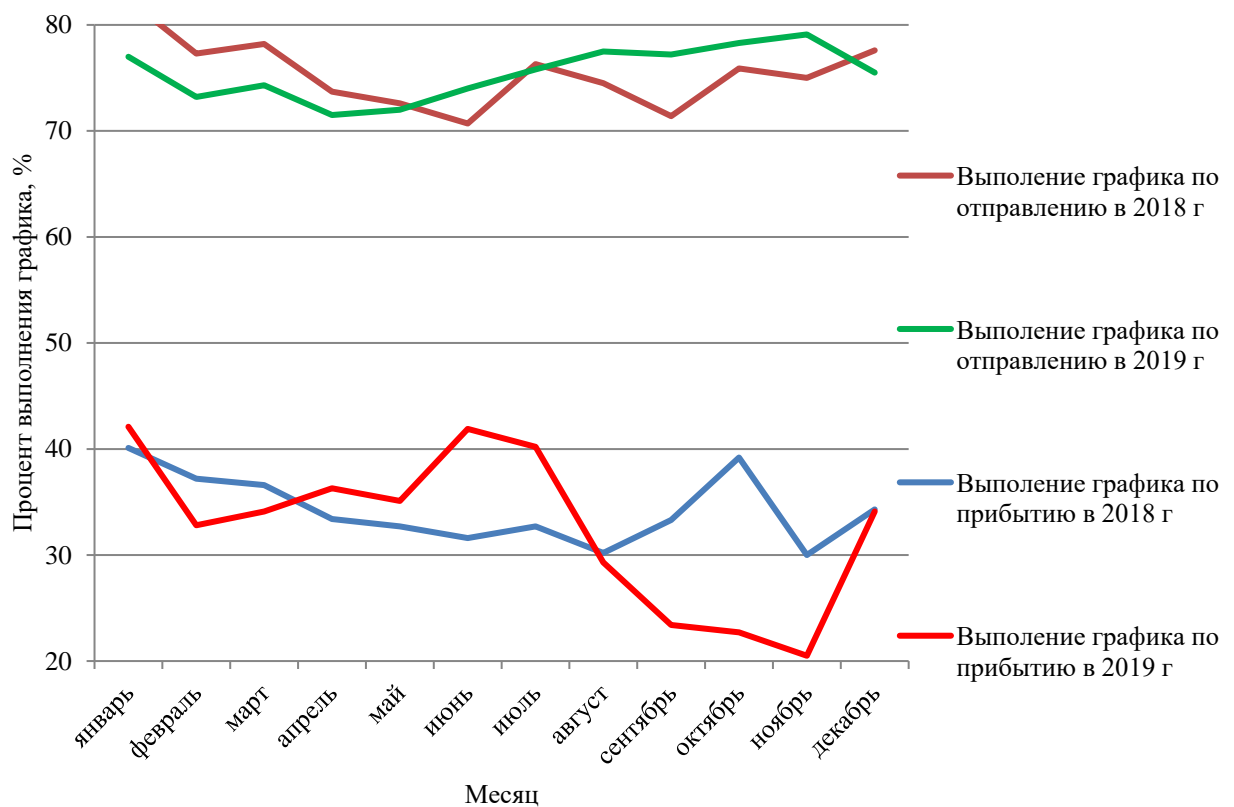


Рисунок 2.1 – Изменение уровня выполнения графика по отправлению и прибытию поездов

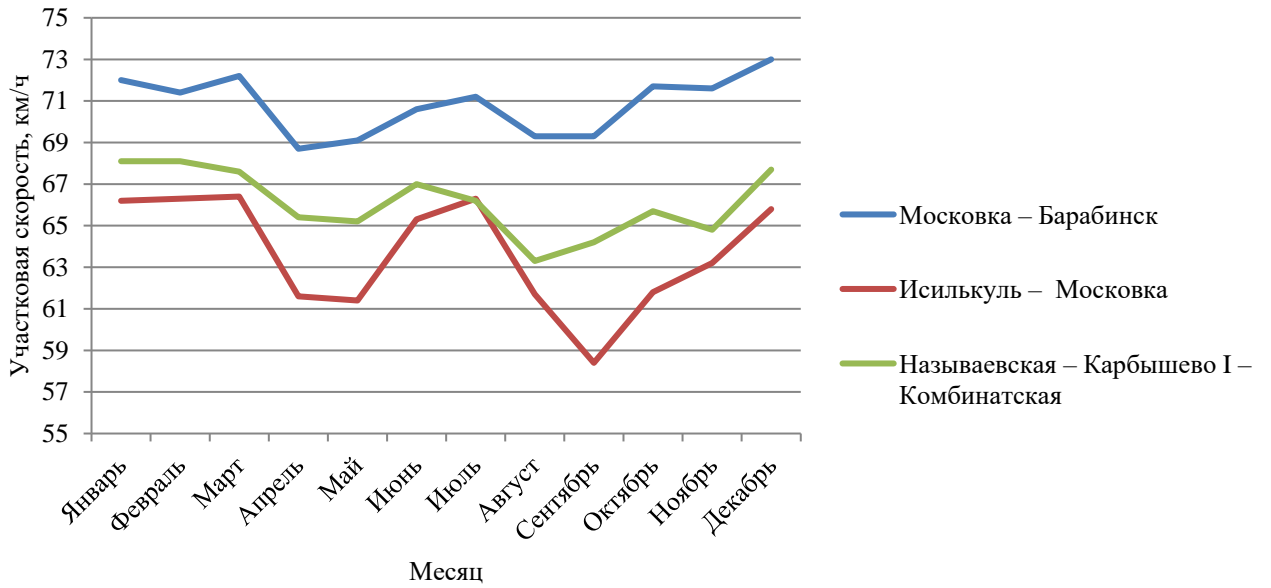


Рисунок 2.2 – Изменение участковой скорости по диспетчерским участкам в 2019 г.

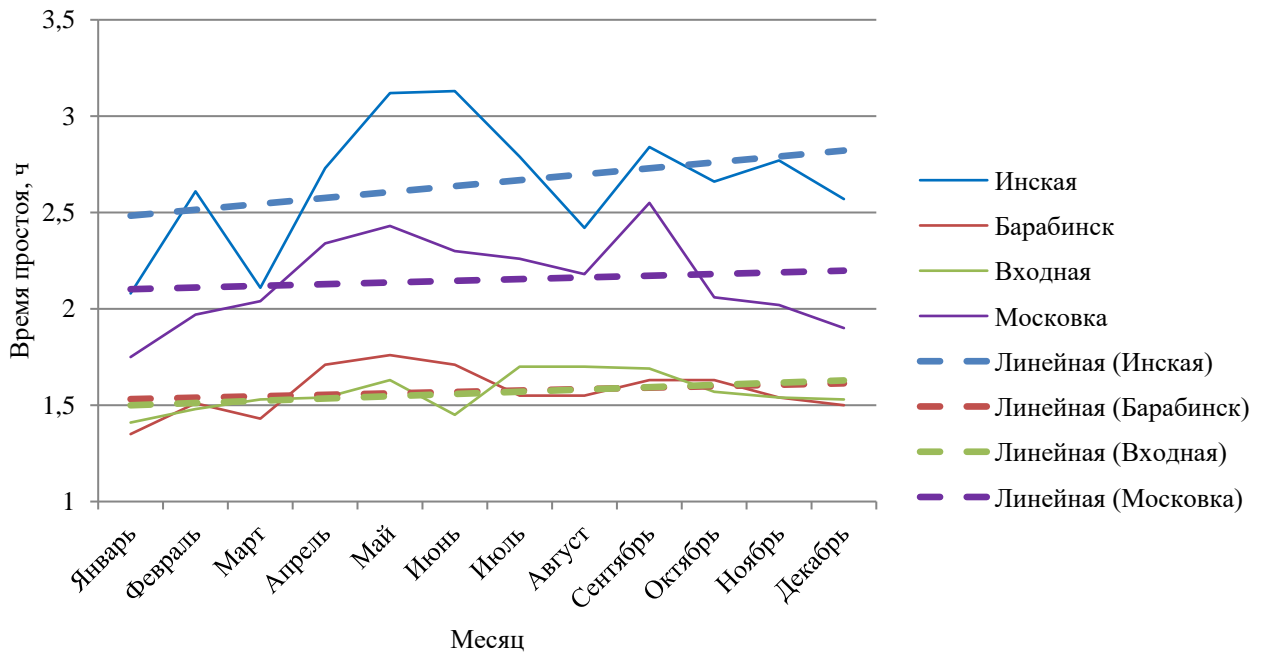


Рисунок 2.3 – Изменение выполнения времени простоя транзитного вагона без переработки на технических станциях в течение 2019 г.

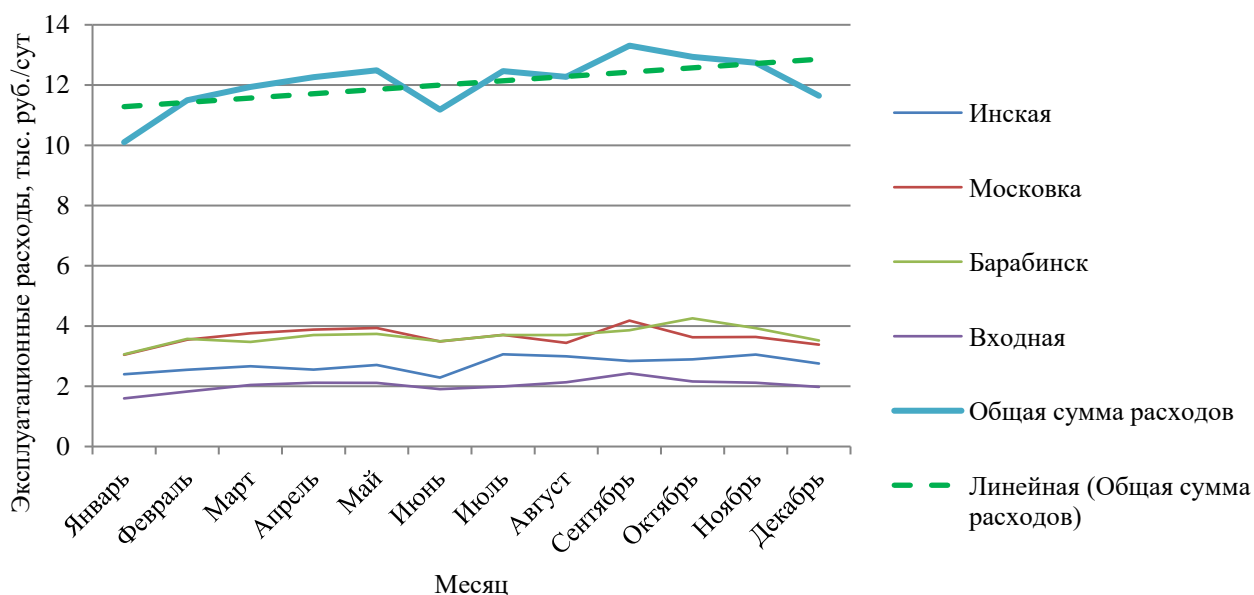


Рисунок 2.4 – Изменение среднесуточных расходов от простоя всех отправленных за сутки поездов на технических станциях в течение 2019 г.

На рисунках 2.3. и 2.4 видно, что в течение года происходит уменьшение участковой скорости и увеличение времени простоя транзитного вагона без переработки и увеличение эксплуатационных расходов. С целью поиска зависимостей между эксплуатационными расходами и другими указанными показателями на рисунках 2.5, 2.6 построены соответствующие графики.

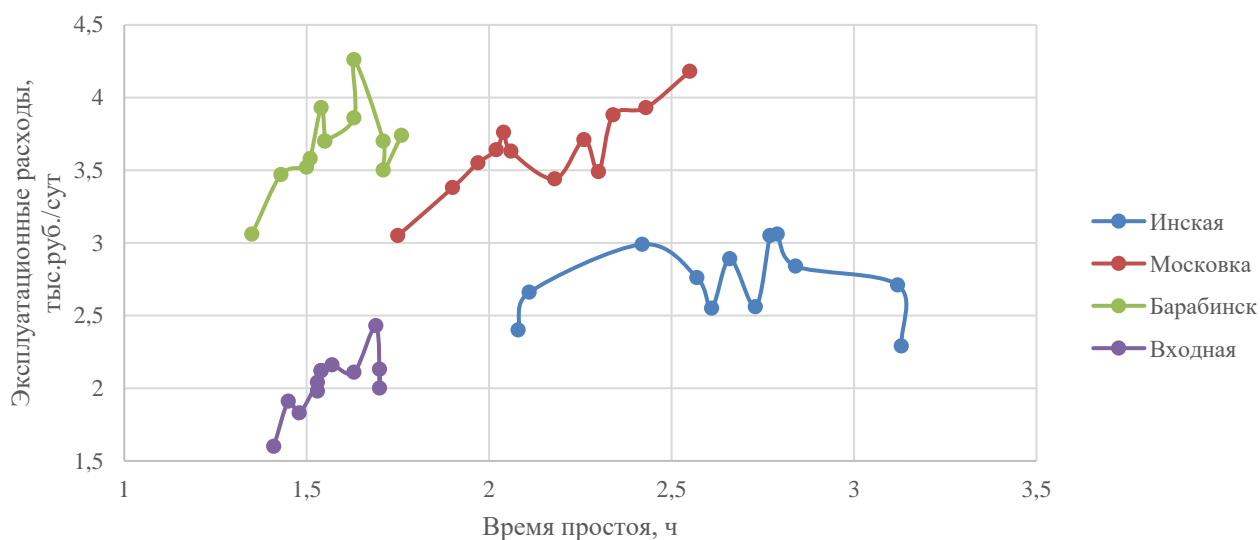


Рисунок 2.5 – График зависимости эксплуатационных расходов, связанных с простоем поездов, от времени простоя на технических станциях

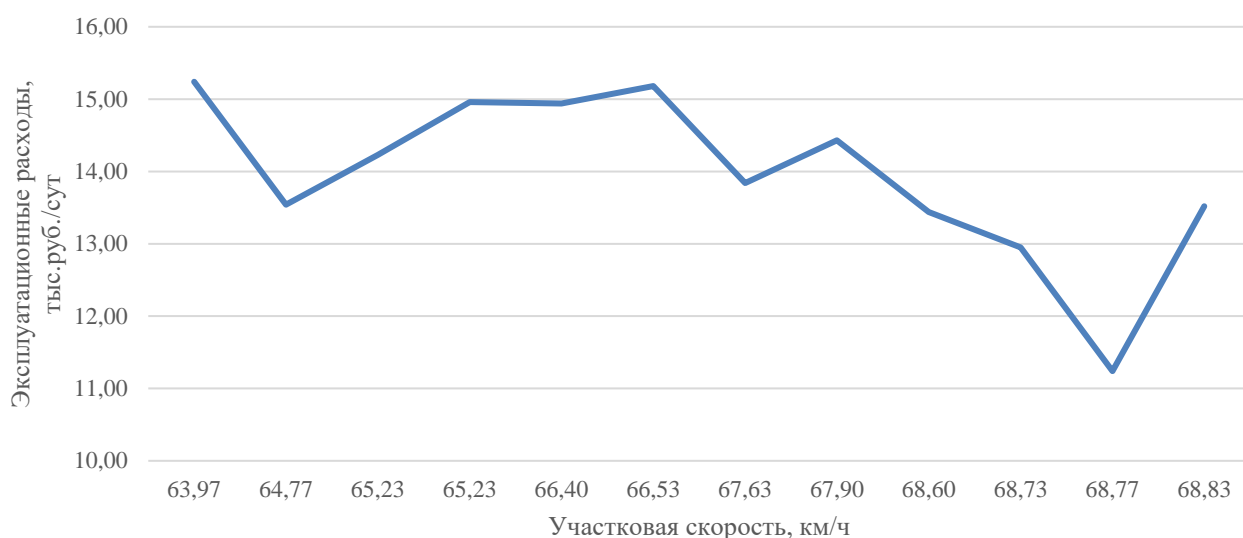


Рисунок 2.6 – График зависимости эксплуатационных расходов, связанных с простоем поездов, от участковой скорости

Из рисунка 2.5 следует, что при увеличении времени простоя поездов происходит рост эксплуатационных расходов. Зависимости, изображенные на рисунке 2.5, не являются линейными, так как эксплуатационные расходы зависят также и от количества пропущенных поездов. При увеличении участковой скорости (см. рисунок 2.6) эксплуатационные расходы, наоборот, уменьшаются. При уменьшении пропускной способности участка или увеличении размеров движения происходит увеличения степени заполняемости графика. При росте данного показателя процесс пропуска поездов более чувствителен к возникающим сбоям в работе, и ликвидация их последствий связана с большими потерями. В такой ситуации технические станции периодически исполняют роль «буферов», ограничивающих лимитирующие направления. Соответственно, простой поездов на станции увеличивается, а участковая скорость уменьшается. Невыполнение графика по прибытию на станцию является нарушением нормальной работы, а точнее, следствием произошедших нестандартных ситуаций на участке. Для работы станции невыполнение графика по прибытию в большинстве случаев означает нарушение планирования поездной работы, и как следствие, ведет к задержкам поездов по отправлению. По-

езда, не прибывшие вовремя, «срываются» с планируемых ниток отправления. Следовательно, существует зависимость участковой скорости и эксплуатационных расходов от выполнения графика по прибытию поездов на техническую станцию.

Установлена степень влияния уровня выполнения графика на участковую скорость. Фактическая величина участковой скорости составляет около 90 % от заложенной графиком «Эльбрус». При этом уровень выполнения графика «Эльбрус» по прибытию составляет в среднем 33 %.

Такое расхождение между нормативным значением участковой скорости и уровнем выполнения графика движения объясняется тем, что на величину участковой скорости график оказывает как положительное, так и отрицательное влияние. Так, при принятии управленческих решений со стороны поездного диспетчера о нарушении графика в целях повышения участковой скорости добиваются ее роста по отношению к нормативному значению. В качестве концепции по уменьшению эксплуатационных расходов такой подход является приемлемым в ряде случаев. В существующей системе планирования, однако, при принятии решения о повышении уровня выполнения участковой скорости не учитываются возможные потери и соблюдение баланса между двумя видами эксплуатационных расходов (связанных с простоем поездов на технических станциях и со стоянками на промежуточных).

В результате проведенного анализа графика изменения эксплуатационных расходов, рассчитанных на основе статистических данных о простое поездов на технических станциях, и участковой скорости (см. рисунок 2.6) сделан вывод об их нелинейной зависимости. С увеличением участковой скорости уменьшаются эксплуатационные расходы. Зависимость не является линейной, так как влияние на эксплуатационные расходы оказывают и другие факторы, например, количество отправленных поездов. Так, при увеличении участковой скорости с 68,77 до 68,83 км/ч (см. рисунок 2.6) произошло увеличение эксплуатационных расходов. Такое изменение показателя должно было привести к уменьшению эксплуатационных расходов на технической станции, однако этого не произошло по причине увеличения количества отправленных поездов на 6 %.

Из приведенного анализа следует, что для уменьшения расходов необходимо увеличивать участковую скорость и, соответственно, повышать уровень выполнения графика движения поездов.

На эксплуатационные расходы, связанные с пропуском поездов, оказывают влияние следующие показатели:

- участковая скорость;
- время стоянок на технических станциях.

Участковая скорость (кроме перечисленных ранее факторов) зависит от технической скорости, а также числа и продолжительности стоянок на промежуточных станциях участка под обгон поездов, обладающих преимуществом (как правило пассажирских). Стремление к максимальной участковой скорости как к целевому показателю не гарантирует минимизации эксплуатационных расходов [27, 118, 119].

От качества составления графика движения поездов напрямую зависят два параметра:

- время стоянок на технических станциях;
- участковая скорость (т. е. число и продолжительность стоянок на промежуточных станциях).

Иногда (как правило при малых размерах движения) нерационально использовать нитки графика, имеющие стоянки на промежуточных станциях участка под обгон пассажирских поездов, ввиду возникающих дополнительных расходов.

В связи с этим в работе поставлена задача разработать алгоритм выбора наиболее рационального варианта использования ниток графика для отправления поездов на двухпутных участках. При определении порядка использования ниток графика в зависимости от объемов движения должен быть достигнут оптимальный баланс следующих параметров:

- время стоянок на технических станциях;
- количество стоянок на промежуточных станциях;
- число ниток графика;
- техническая скорость.

Для решения данной задачи выполнен анализ зависимости простоя поездов на технических станциях от степени заполняемости графика.

2.2 Исследование влияния степени заполняемости графика на время простоя вагона на технической станции

В течение анализируемого месяца (декабрь 2020 г.) посуточно рассмотрен график движения поездов по параметрам «степень заполняемости графика» и «время простоя транзитных поездов». Данный анализ проведен для выявления взаимосвязи между степенью заполняемости графика и простоем поездов на станциях проведения технических операций. Исходные данные сведены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Степень заполняемости графика и время простоя поездов в декабре 2020 г. по станции Барабинск

Дата	Нечетное направление				Четное направление			
	Степень заполняемости графика x , %	Время простоя y , ч	x^2	$x \cdot y$	Степень заполняемости графика x , %	Время простоя y , ч	x^2	$x \cdot y$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
01.12.20	68	1,05	4624	71	61	1,01	3721	62
02.12.20	84	1,45	7056	122	70	2,45	4900	172
03.12.20	76	1,22	5776	93	62	2,47	3844	153
04.12.20	79	0,8	6241	63	66	2,12	4356	140
05.12.20	89	1,63	7921	145	70	2,84	4900	199
06.12.20	84	1,34	7056	113	71	3,69	5041	262
07.12.20	69	1,15	4761	79	72	2,77	5184	199
08.12.20	83	1,43	6889	119	66	1,32	4356	87
09.12.20	75	1,29	5625	97	64	1,27	4096	81
10.12.20	77	0,99	5929	76	70	1,09	4900	76
11.12.20	89	1,41	7921	125	58	1,24	3364	72
12.12.20	86	1,56	7396	134	67	1,31	4489	88
13.12.20	77	1,99	5929	153	63	1,65	3969	104

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
14.12.20	79	1,22	6241	96	69	2,12	4761	146
15.12.20	92	1,79	8464	165	49	1,61	2401	79
16.12.20	85	1,18	7225	100	70	1,63	4900	114
17.12.20	86	0,89	7396	77	61	1,18	3721	72
18.12.20	73	1,07	5329	78	58	1,18	3364	68
19.12.20	84	1,61	7056	135	55	1,42	3025	78
20.12.20	86	1,53	7396	132	70	1,14	4900	80
21.12.20	71	0,9	5041	64	65	1,23	4225	80
22.12.20	77	1,35	5929	104	45	0,88	2025	40
23.12.20	60	0,84	3600	50	61	1,06	3721	65
24.12.20	78	1,54	6084	120	71	1,1	5041	78
25.12.20	75	0,98	5625	74	60	1,62	3600	97
26.12.20	78	1,42	6084	111	78	1,61	6084	126
27.12.20	81	1,67	6561	135	76	2,22	5776	169
28.12.20	78	1,12	6084	87	72	2,38	5184	171
29.12.20	74	0,96	5476	71	70	2,08	4900	146
30.12.20	84	0,94	7056	79	70	2,56	4900	179
31.12.20	75	1,09	5625	82	70	2,99	4900	209
Σ	2452	39,41	195396	3150	2030	55,24	134548	3691

С целью выявления зависимости рассчитана аппроксимация анализируемых значений. В качестве аппроксимирующей принята показательная функция $f(x) = \beta \cdot e^{ax}$.

После логарифмирования аппроксимирующая функция примет вид: $\ln f(x) = a \cdot x + \ln \beta$. Полученная функция представлена в виде линейного уравнения $y = a \cdot x + b$ [106], где $y = \ln f(x)$, $b = \ln \beta$.

Для нахождения коэффициентов a и b использован метод наименьших квадратов, который заключается в том, что сумма квадратов отклонений значения точки от аппроксимирующей точки принимает минимальное значение [106].

$$F(a, b) = \sum_{i=1}^n (y^2 - (a \cdot x_i + b))^2 \rightarrow \min. \quad (2.1)$$

Найден экстремум указанной функции двух переменных. С этой целью определены частные производные функции по коэффициентам a и b и приравнены к нулю.

$$\begin{cases} \frac{\partial F(a, b)}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i (a \cdot x_i + b)) \cdot x_i = 0, \\ \frac{\partial F(a, b)}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i (a \cdot x_i + b)) = 0. \end{cases} \quad (2.2)$$

Решение системы двух уравнений записано в виде формулы (2.3), по которой определены значения коэффициентов a и b :

$$\begin{cases} a = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n}. \end{cases} \quad (2.3)$$

Расчет по формуле (2.3) произведен в таблице 2.5. Получены значения коэффициентов: для нечетных поездов $a = 18 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 0,29$; для четных поездов $a = 26 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 0,30$. Аппроксимирующие функции для нечетного ($f(x)_н$) и четного направлений ($f(x)_ч$) получили следующий вид:

$$f(x)_н = 0,29 \cdot e^{18 \cdot 10^{-3} \cdot x}, \quad (2.4)$$

$$f(x)_ч = 0,30 \cdot e^{26 \cdot 10^{-3} \cdot x}. \quad (2.5)$$

На основе данных из таблицы 2.5 и формул (2.4), (2.5) построены диаграммы зависимости времени простоя нечетных и четных поездов на технической станции Барабинск от степени заполняемости графика (рисунки 2.7, 2.8). Из рисунков 2.7, 2.8 видно, что по мере возрастания степени заполняемости графика время простоя поездов увеличивается. При этом разброс значений от аппроксимирующей функ-

ции иногда очень велик и может достигать 0,7 ч, что соответствует 54 % от среднего значения. Проанализированы причины такого отклонения значений времени простоя.

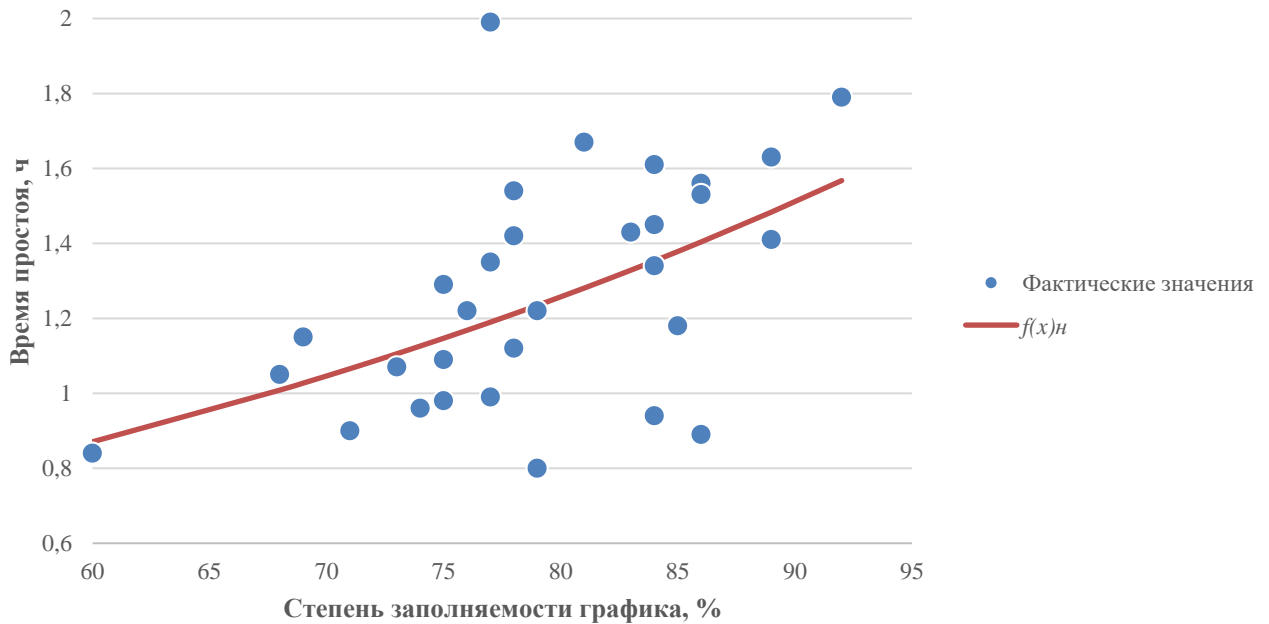


Рисунок 2.7 – Диаграмма зависимости времени простоя от степени заполняемости графика для нечетных поездов по станции Барабинск

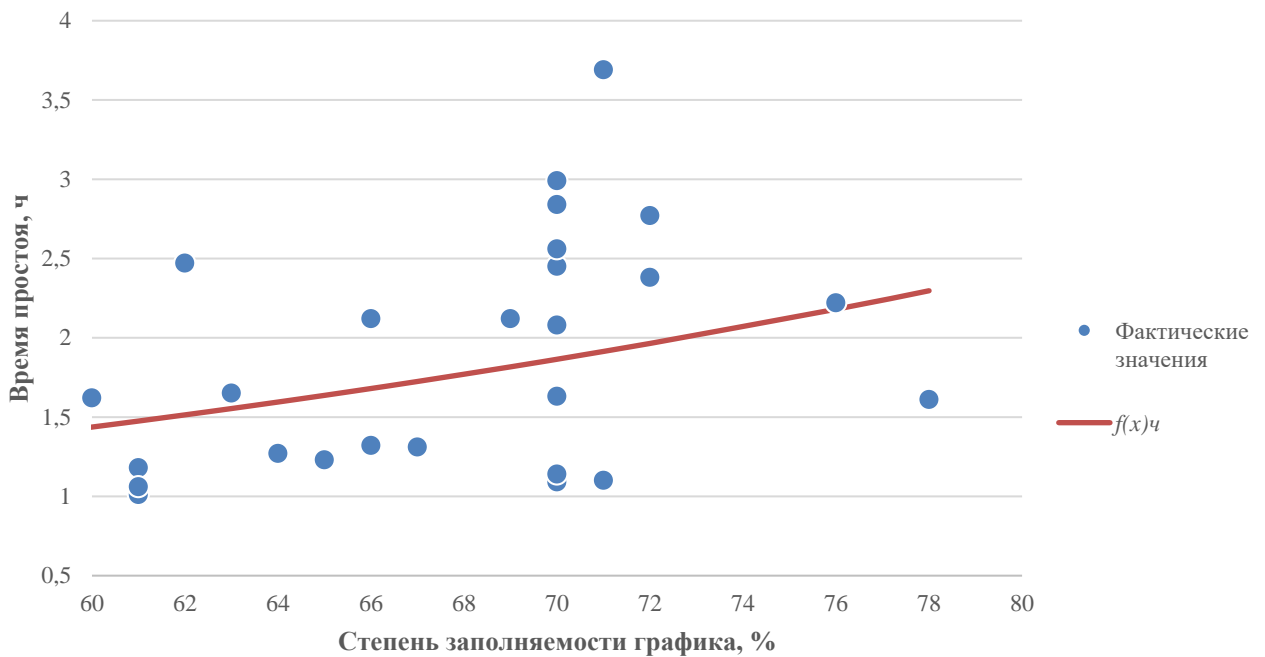


Рисунок 2.8 – Диаграмма зависимости времени простоя от степени заполняемости графика для четных поездов по станции Барабинск

На время простоя поездов, кроме степени заполняемости графика, влияют отцепки неисправных вагонов, отсутствие локомотивов, технологические «окна» и другие причины. Выявлено, что в течение рассматриваемого периода перечисленные выше факторы существенно повлияли на увеличение простоя. Время простоя увеличилось в диапазоне от 35 % до 140 % от заложенного графиком движения. При этом при изменении степени заполняемости графика в рассматриваемом диапазоне значений (см. рисунки 2.7, 2.8) время простоя поездов изменяется от 65 % до 100 %. На основании графика исполненного движения поездов выявлены случаи сверхнормативного простоя поездов по причинам, не зависящим от качества построения графика (ожидание локомотивов, бригад и т. д.). Произведена корректировка времени простоя на величину выявленных потерь. В таблице 2.6 представлены значения фактического и скорректированного времени простоя поездов по станции Барабинск.

Таблица 2.6 – Фактический и скорректированный посуточный простой в декабре 2020 г.

Дата	Нечетное направление			Четное направление		
	Степень заполняемости графика, %	Простой фактический, ч	Простой скорректированный, ч	Степень заполняемости графика, %	Простой фактический, ч	Простой скорректированный, ч
1	2	3	4	5	6	7
01.12.20	68	1,05	0,91	61	1,01	0,93
02.12.20	84	1,45	0,90	70	2,45	0,90
03.12.20	76	1,22	0,89	62	2,47	0,83
04.12.20	79	0,8	0,76	66	2,12	0,81
05.12.20	89	1,63	0,83	70	2,84	0,76
06.12.20	84	1,34	0,72	71	3,69	0,98
07.12.20	69	1,15	0,74	72	2,77	0,80
08.12.20	83	1,43	0,90	66	1,32	1,28
09.12.20	75	1,29	0,71	64	1,27	0,85
10.12.20	77	0,99	0,82	70	1,09	0,93
11.12.20	89	1,41	0,99	58	1,24	0,74
12.12.20	86	1,56	0,99	67	1,31	0,88
13.12.20	77	1,99	0,86	63	1,65	0,96
14.12.20	79	1,22	1,13	69	2,12	0,99

Продолжение таблицы 2.6

1	2	3	4	5	6	7
15.12.20	92	1,79	1,00	49	1,61	0,80
16.12.20	85	1,18	0,92	70	1,63	0,97
17.12.20	86	0,89	0,80	61	1,18	0,75
18.12.20	73	1,07	0,85	58	1,18	0,64
19.12.20	84	1,61	1,07	55	1,42	0,68
20.12.20	86	1,53	1,20	70	1,14	0,71
21.12.20	71	0,9	0,87	65	1,23	0,80
22.12.20	77	1,35	0,65	45	0,88	0,66
23.12.20	60	0,84	0,72	61	1,06	0,68
24.12.20	78	1,54	0,87	71	1,1	0,67
25.12.20	75	0,98	0,81	60	1,62	0,77
26.12.20	78	1,42	0,92	78	1,61	0,94
27.12.20	81	1,67	0,93	76	2,22	0,94
28.12.20	78	1,12	0,69	72	2,38	1,23
29.12.20	74	0,96	0,76	70	2,08	1,11
30.12.20	84	0,94	0,79	70	2,56	1,53
31.12.20	75	1,09	0,68	70	2,99	0,92
Среднее значение степени заполняемости для нечетного и четного направлений, %					79	65

Аппроксимирующие функции для нечетного ($f(x)_н$) и четного направлений ($f(x)_ч$) определены с помощью формулы 2.3 и имеют следующий вид:

$$f(x)_н = 0,39 \cdot e^{10 \cdot 10^{-3} \cdot x}, \quad (2.6)$$

$$f(x)_ч = 0,36 \cdot e^{14 \cdot 10^{-3} \cdot x}. \quad (2.7)$$

С учетом корректировки простоев (см. таблицу 2.6) и формул (2.6), (2.7) повторно построены диаграммы зависимости простоя поездов от степени заполняемости графика (рисунки 2.9, 2.10).

За 31 день декабря 2020 г. процент использования ниток графика составил: для нечетных поездов – от 60 % до 92 %; для четных поездов – от 45 % до 78 %. Из рисунков 2.9, 2.10 видно, что степень заполняемости графика варьируется в широком диапазоне значений. Линия тренда на графиках указывает на увеличение времени простоя по мере увеличения степени заполняемости. Таким образом, наглядно показана зависимость между временем простоя поездов на технических станциях от степени заполняемости графика.

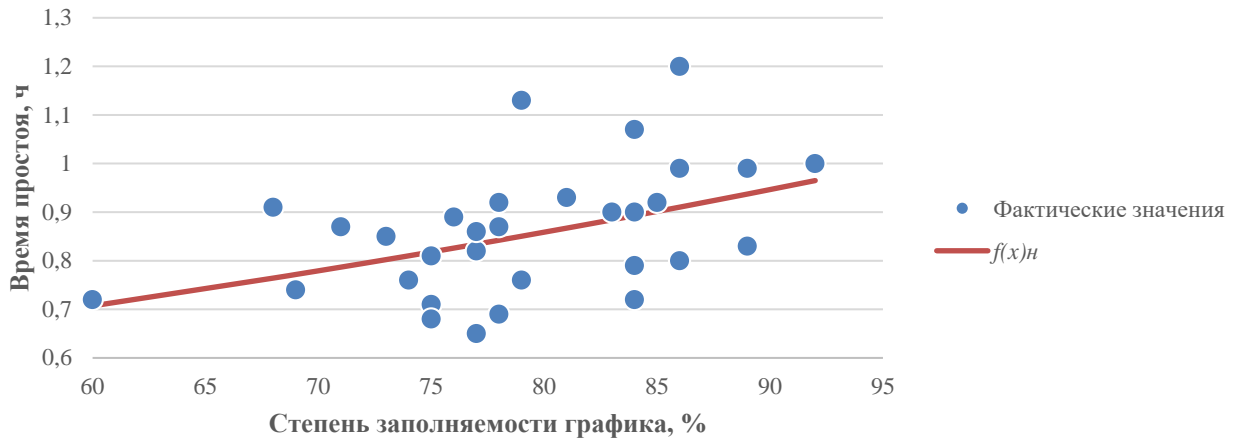


Рисунок 2.9 – Диаграмма зависимости времени простоя от степени заполняемости графика для нечетных поездов

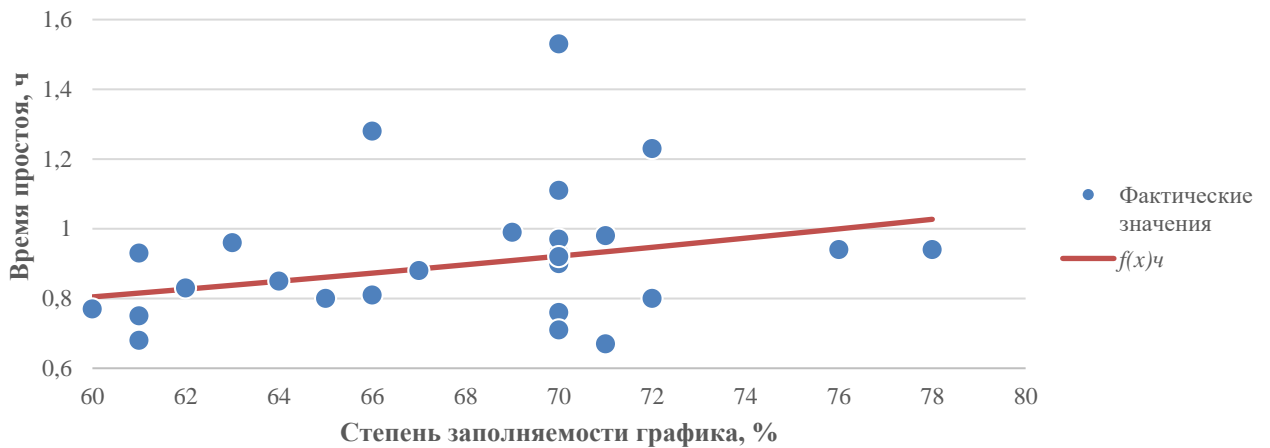


Рисунок 2.10 – Диаграмма зависимости времени простоя от степени заполняемости графика для четных поездов

Из графиков следует (см. рисунки 2.9, 2.10), что степень заполняемости графика для четного направления в среднем на 15 % меньше аналогичного показателя для нечетного направления. При этом если рассмотреть изменение простоя по линии тренда на отрезке от 60 % до 80 % и сравнить по обоим направлениям, то получим следующие значения: для нечетного направления на указанном отрезке простоя изменяется от 0,74 до 0,88 ч, для четного направления – от 0,74 до 1,00 ч. Требуется определить причины такого расхождения простоя при одинаковой степени заполняемости графика.

Время простоя зависит от особенностей нормативного графика по каждому из рассматриваемых направлений (четному и нечетному). Установлено, что, кроме

степени заполняемости, на простой влияет такая особенность, как взаимоувязка нормативного времени обработки поезда и соответствующее ему расположение ниток. То есть для минимизации простоя необходимо, чтобы нитки отправления располагались относительно ниток прибытия поездов через временной промежуток, равный времени обработки поезда. Наиболее важно при этом соблюдать соответствие числа ниток прибытия и отправления на отрезках времени, равным времени обработки поезда. В случае, когда число ниток отправления меньше числа ниток прибытия, поезда, которым не хватило ниток, будут простаивать в их ожидании. В основном такие ситуации возникают при «снятии» ниток пассажирскими поездами, когда за непродолжительное время происходит пропуск двух и более пассажирских поездов. И если в среднем за сутки число ниток прибытия соответствует числу ниток отправления, то в пределах одного-, двух- и трехчасовых интервалов ситуация другая.

Для определения зависимости суточный нормативный график был разбит на временные отрезки, равные времени обработки поезда (в качестве примера для расчета время обработки принято равным 33 мин на основании технологического процесса станции Барабинск). Произведен расчет количества ниток прибытия и отправления на данных отрезках времени. Числу ниток прибытия на первом временном отрезке соотнесено число ниток прибытия на втором временном отрезке и т. д. Рассчитано время, превышающее технологическую норму простоя поездов на станции $\sum t_{\text{перепр}}$, на основании следующего правила: данное время является произведением числа поездов, простоявших на станции сверх технологической нормы времени и времени нормативного простоя. Количество поездов соответствовало разнице между числом ниток прибытия и отправления при условии преобладания первых, в том числе с нарастающим итогом. Данные зависимости описаны ниже в виде формулы [36]:

$$\sum t_{\text{перепр}} = \sum_{i=1}^j \left(\frac{N_i \cdot t_{\text{норм}}}{60} \right), \quad (2.8)$$

при условии $N_i \geq 0$,

где j – количество временных отрезков в течение суток, равных времени обработки поезда;

i – порядковый номер временного отрезка, равного $t_{\text{норм}}$;

N_i – число простоявших на станции сверх технологической нормы времени поездов на временном промежутке i ;

$t_{\text{норм}}$ – нормативное время обработки поезда со сменой локомотивной бригады на станции, мин;

60 – коэффициент, используемый для перевода часов в минуты.

Формула (2.8) является математическим выражением суммы поездо-часов поездов, простоявших на станции более установленного норматива времени, и характеризует динамику возникновения сверхнормативного простоя.

Число простаивающих на станции сверх технологической нормы времени поездов определяется по формуле (2.9) [36]:

$$N_i = N_{\text{пр } i} \cdot Z \cdot 10^{-2} - N_{\text{от } i+1}, \quad (2.9)$$

где $N_{\text{пр } i}$ – количество ниток прибытия одного направления на отрезке i ;

Z – степень заполняемости графика, %;

$N_{\text{от } i+1}$ – количество ниток отправления на отрезке $i+1$;

$N_i < 0 \rightarrow N_i = 0$.

Для расчета числа поездов, простаивающих на станции сверх технологической нормы времени, при разработке формулы (2.9) принято, что искомое значение является разностью между прибывшими за определенный временной отрезок поездами и теми, у которых имеется потенциальная возможность отправиться, не превышая установленной нормы простоя. Поезда не превысят установленный простой на станции в случае их отправления на следующем временном отрезке, соответствующем нормативному времени простоя поездов. Например, на временном промежутке с 11:00 до 11:33 существует три нитки прибытия грузовых поездов. На следующем отрезке времени (с 11:33 до 12:06) имеется только две нитки для отправления грузовых поездов. Соответственно, один поезд не будет иметь возмож-

ности отправиться со станции до 12:06, а значит, его простой превысит нормативный минимум на 33 мин. Количество прибывших поездов определяется как произведение количества ниток прибытия на степень заполняемости графика, разделенную на 100 %. Потенциальное количество отправленных по графику поездов имеет максимально возможное значение и соответствует числу ниток отправления, заложенных в графике.

Определено превышение нормы простоя поездов для степени заполняемости графика от 50 % до 100 % с шагом 5 %. После чего произведен расчет итогового простоя поездов, заложенного нормативным графиком движения. Общий простой состоит из суммы нормативного времени на обработку поезда, времени, его превышающего $t_{\text{перепр}}$ в ожидании нитки графика, и поправочного коэффициента t_k , учитывающего допустимое отклонение от графика в пределах 5 мин (принимается равным 0,08 ч), и определяется по следующей формуле [36]:

$$t_{\text{пр}} = \frac{t_{\text{норм}} + t_k}{60} + \frac{\sum t_{\text{перепр}}}{N_{\text{от}} \cdot Z \cdot 10^{-2}}. \quad (2.10)$$

Полученные значения представлены на графике (рисунок 2.11). На нем видна экспоненциальная зависимость простоя от степени заполняемости. Графику на рисунке 2.11, полученному с помощью расчета, соответствует аппроксимирующая функция $f(x) = 0,33 \cdot 10^{-4} e^{x \cdot 10^{-1}} + 0,7$, где x – степень заполняемости графика. Приведенная функция для различных участков железных дорог будет отличаться. На рисунке 2.11 функция $f(x)$ приведена для наглядности и в качестве графического доказательства нелинейной зависимости времени простоя поездов от степени заполняемости графика.

Сравнение графиков, полученных эмпирическим путем для нечетного и четного направлений (см. рисунок 2.11), и графика, сформированного из расчетных значений (рисунок 2.12), показывает наличие между ними общей зависимости влияния степени заполняемости графика на простой поездов. Линия простоя по четному направлению расположена параллельно линии расчетного простоя и отличается от нее на одинаковую величину на всей своей протяженности. Это отличие

обусловлено различными действующими внешними (не зависящими от качества графика) факторами, например, такими как простой в ожидании бригад или электропоездов. Различие между расчетным простоем и линией тренда по нечетному направлению также невелико и не превышает 0,2 ч на всем протяжении. Отсутствие на первых графиках строгой экспоненциальной зависимости объясняется наличием погрешностей, имеющих место в исполненном графике.

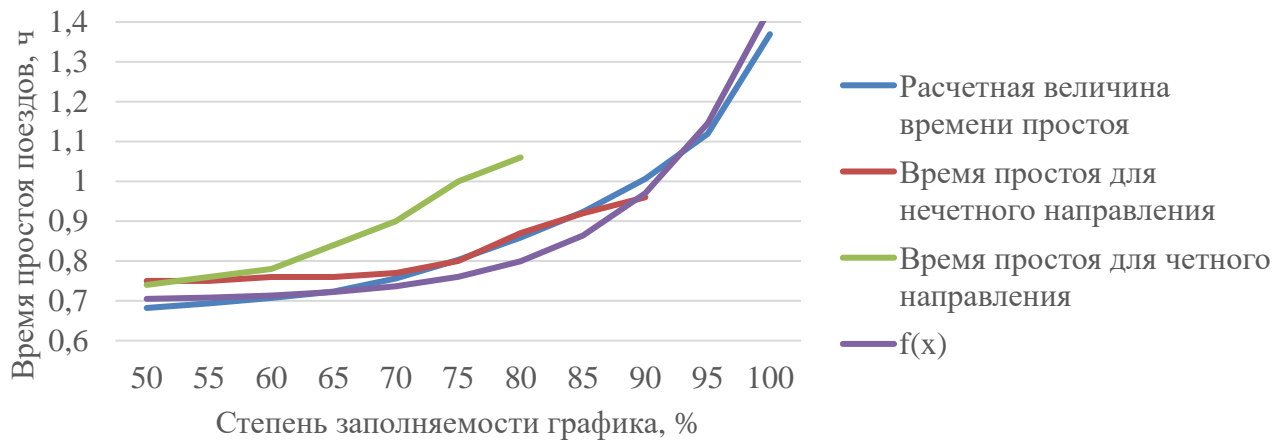


Рисунок 2.11 – График зависимости среднего времени простоя поезда от степени заплняемости нормативного графика

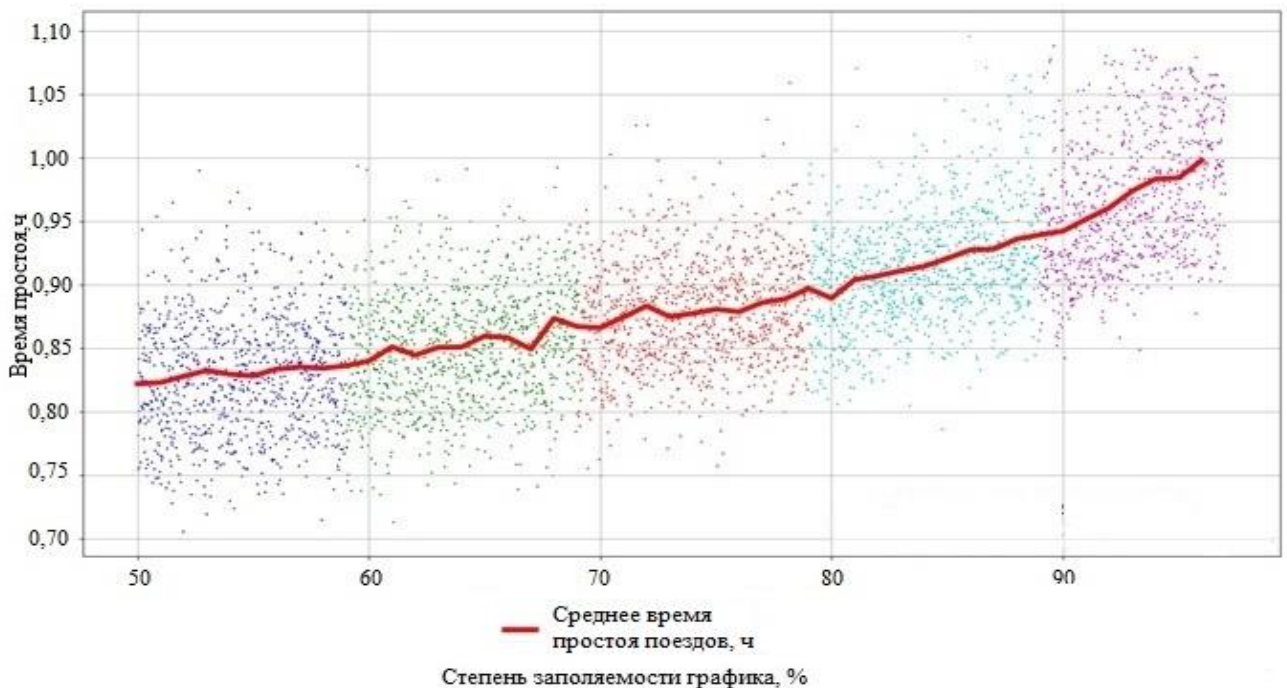


Рисунок 2.12 – Результаты моделирования по исследованию влияния степени заплняемости графика на время простоя поездов

Для проверки достоверности полученных результатов применено математическое моделирование с использованием ЭВМ. Рассмотрен нормативный график исполненного движения за сутки 01.10.2020 по станции Барабинск. Запрограммирована модель случайного распределения заданного количества поездов между нитками прибытия на станцию. Количество поездов зависит от степени заполняемости графика (рассмотрен диапазон от 50 % до 97 %). Всего в рассматриваемые сутки графиком «Эльбрус» заложена 81 четная нитка. Моделирование проводилось с шагом 1 %. На каждом шаге рассматривалась выборка из 100 различных вариантов прибытия поездов. Всего рассмотрено 4700 случаев. Среднее время простоя поезда для каждого испытания на рисунке 2.12 отмечено точкой. Цветовая градация на рисунке соответствует каждым 10 % степени заполняемости графика. По условиям моделирования поезда отправлялись на ближайшие нитки. Нормативное время обработки поезда на станции принято 30 мин.

Из рисунка 2.12 видно, что в диапазоне от 50 % до 80 % простой поездов имеет линейную зависимость от степени заполняемости графика. Через каждые 10 % заполняемости простоя изменяется на 0,026 ч. При степени заполняемости более 80 % кривая простоя больше похожа на экспоненту. При изменении степени заполняемости графика с 80 % до 97 % простой поездов возрос на 0,100 ч, или на 56,5 % относительно общего изменения.

Значения времени простоя, полученные с помощью математического моделирования, отличаются от вычисленных теоретическим методом (см. рисунок 2.11). Моделирование позволяет достичь более высокой точности ввиду наличия большого числа испытаний. Представленные на рисунках 2.11 и 2.12 кривые между собой визуально похожи, поэтому для проверки существования корреляции между ними произведен расчет коэффициента корреляции Пирсона по следующей формуле [44]:

$$r_{XY} = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}}, \quad (2.11)$$

где X , Y – значения независимых случайных величин;

\bar{X}, \bar{Y} – среднее значение выборок, вычисляемое по формуле (2.12).

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t, \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Y_t. \quad (2.12)$$

Коэффициент корреляции Пирсона может принимать значение от минус 1 до плюс 1. Между рассматриваемыми графиками будет высокая степень корреляции при условии $|r_{XY}| \rightarrow 1$. Расчет сведен в таблицу 2.7.

Таблица 2.7 – Расчет коэффициента корреляции Пирсона для кривых времени простоя, полученных теоретическим методом (X) и путем моделирования (Y)

Номер испытания	Степень заполняемости, %	X	Y	$(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})$	$(X - \bar{X})^2$	$(Y - \bar{Y})^2$
1	50	0,682	0,833	0,015	0,006	0,038
2	55	0,693	0,848	0,012	0,004	0,034
3	60	0,707	0,863	0,008	0,002	0,029
4	65	0,723	0,878	0,005	0,001	0,023
5	70	0,756	0,893	0,002	0,000	0,014
6	75	0,803	0,909	0,000	0,000	0,005
7	80	0,859	0,925	0,000	0,000	0,000
8	85	0,923	0,942	0,001	0,001	0,002
9	90	1,006	0,958	0,006	0,002	0,017
10	95	1,119	0,975	0,016	0,004	0,059
11	100	1,370	0,992	0,040	0,007	0,243
Σ				0,105	0,028	0,465
r_{XY}				0,924		

В результате расчета получено значение коэффициента корреляции Пирсона, равное $r_{XY} = 0,924$, что свидетельствует о высокой степени корреляции между рассмотренными графиками.

Дополнительно корреляция проверена с помощью применения t -критерия Стьюдента. Значение t -критерия определено по следующей формуле [44]:

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{s_X^2}{n_X} + \frac{s_Y^2}{n_Y}}}, \quad (2.13)$$

где s^2 – несмещенная оценка дисперсии, определяемая по формуле

$$s_X^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2}{n-1}, s_Y^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2}{n-1}. \quad (2.14)$$

В результате расчета (см. таблицу 2.7) получены значения $\bar{X} = 0,876$, $\bar{Y} = 0,911$, t -критерий Стьюдента $t = 0,51$. Число степеней свободы определено по формуле

$$f = (n_X + n_Y) - 2. \quad (2.15)$$

Число степеней свободы $f = 20$. Произведено сравнение полученного значения t -критерия Стьюдента, равного 0,51, с критическим при $p = 0,05$ значением, указанным в [44] и равным 2,086. Так как рассчитанное значение критерия меньше критического, сделан вывод о том, что наблюдаемые различия статистически не значимы.

Наличие корреляции между кривыми, представленными на рисунках 2.10 и 2.11, позволяет признать теоретический метод достоверным.

Из проведенного анализа следует:

- простой поездов имеет прямую нелинейную зависимость от степени заполняемости графика;
- существует предел степени заполняемости графика, при достижении которого происходит резкое увеличение времени нахождения поездов на технической станции.

Кроме степени заполняемости графика, простой поездов зависит от уровня выполнения графика поездов по прибытию, т. е. от равномерности подвода поездов [15, 139]. На данный показатель влияют отказы технических средств, технологические нарушения по другим станциям, невыдержки перегонных времен хода, а также другие причины. Значение данного показателя может колебаться в диапазоне от 20 % до 100 % (см. рисунок 2.1). Смоделирована ситуация отклонения от графика 50 % поездов и произведено сравнение образовавшихся простоев с ситуацией 100 % выполнения графика. При моделировании выполнением графика считается прибытие в интервале от плюс 5 до минус 10 мин (согласно телеграмме № ИСХ-

19635/ЦД от 20.08.2021). Отклонением от графика принимается ситуация невыполнения поездом заданного условия. Использован приведенный ранее метод моделирования (формулы (2.8)–(2.10)), заключающийся в разбиении подхода поездов на получасовые интервалы (равные времени обработки поезда). Снижение уровня выполнения графика в два раза означает перераспределение 50 % поездов в рамках заданных интервалов. При этом нужно учитывать, что в одном получасовом интервале не может прибывать более трех поездов. Получившиеся результаты представлены в виде графика, изображенного на рисунке 2.13.

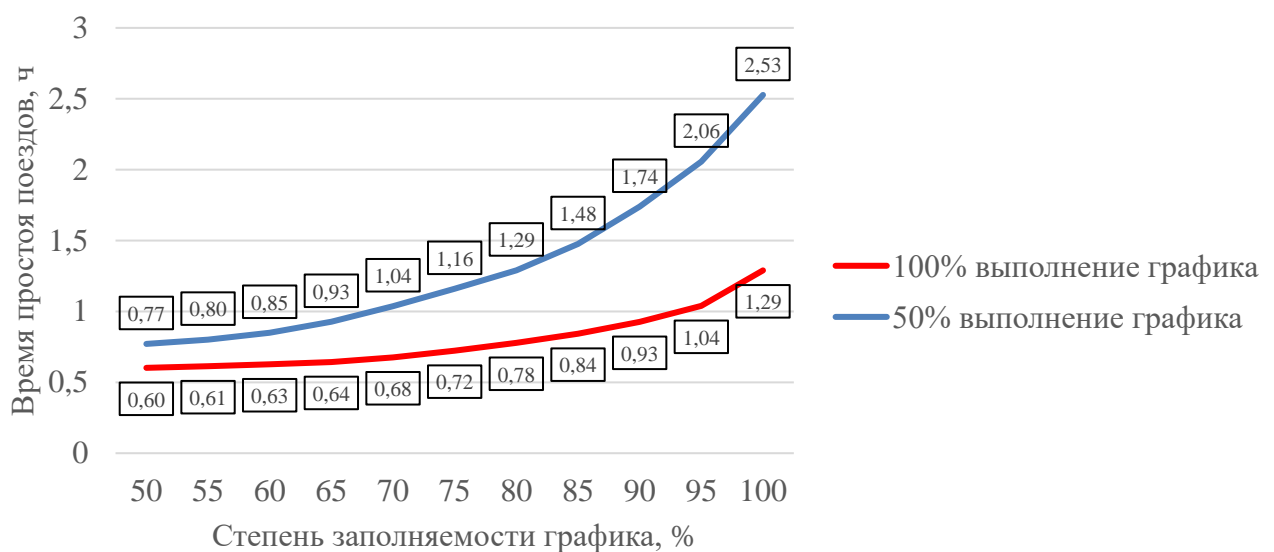


Рисунок 2.13 – Зависимость времени простоя поездов (заложенного графиком движения) от степени заполняемости нормативного графика и уровня выполнения графика поездов по прибытию

На рисунке 2.13 приведено сравнение величин простоя поездов при 100 % и 50 % выполнения графика. При нарушении графика движения поездов в заданном диапазоне время простоя поездов в зависимости от степени заполняемости графика и его выполнения увеличивается от 28 % до 97 %. Приведенный пример наглядно показывает влияние на время простоя поездов уровня выполнения графика движения поездов и сгущенности подводимого поездопотока. При увеличении плотности потока в отдельные промежутки времени от среднесуточных значений повышается нагрузка на различные элементы технологической цепочки обработки поездов.

Увеличивается загрузка бригад ПТОВ и сигналистов. В случае сохранения увеличенных размеров движения в рамках отдельных суток и на большем промежутке времени возникают проблемы со своевременным обеспечением поездов бригадами и локомотивами. Сгущенный поток является фактором, негативно влияющим на показатель времени простоя при невысокой среднесуточной загрузке станции [14]. Представленные выводы говорят о зависимости времени простоя поездов от уровня выполнения графика движения поездов.

2.3 Вероятность возникновения сверхнормативного простоя поездов на технических станциях

В п. 2.2 проведен анализ влияния уровня выполнения графика движения поездов на выполнение простоя по техническим станциям. Полученные результаты не являются эталоном зависимости, так как на них, кроме уровня выполнения графика движения поездов действует множество случайных факторов, также влияющих на простой поездов и вагонов на технической станции. Задача данного раздела исследования аналитическим путем найти точную зависимость простоя поездов от наиболее характерных параметров выполнения графика. К таким параметрам относятся уровень выполнения графика и степень заполняемости графика. В п. 2.2 уже приводился пример зависимости простоя поездов от указанных параметров, однако он носит общий характер и отражает среднее значение увеличения простоя.

Уровень выполнения графика движения поездов в заданном нормативными документами ОАО «РЖД» диапазоне значений (плюс 5 мин, минус 10 мин) сам по себе не оказывает большого влияния на простой поезда. Поезд, отправившийся со станции на запланированную нитку, при условии его прибытия с опозданием от графика на рассматриваемую техническую станцию, наоборот, будет иметь меньший простой, чем в случае прибытия согласно расписанию. Такой эффект достигается в результате существования заложенных графиком временных резервов между нитками прибытия и отправления поездов, а также временем обработки поезда. Время прибытия и отправления на технической станции различаются на величину,

большую, чем время, необходимое на проведение технических операций. Принципиальное влияние на увеличение простоя оказывает «срыв» планируемой нитки отправления в результате опоздания поезда. Так как не всякое опоздание ведет к потере нитки, то в данном случае речь пойдет о вероятности потери нитки, которая влечет за собой возникновение вероятности увеличения простоя поезда.

В результате исследования определена зависимость времени простоя поездов от уровня выполнения и степени заполняемости графика. Для решения задачи выполнены следующие промежуточные этапы:

- определена зависимость вероятности срыва нитки от выполнения графика по прибытию и степени заполняемости графика для каждого из поездов в течение суток;

- определена вероятность возникновения суммарного простоя для любого количества поездов. Суммарный простой определяется для числа поездов от 1 до n , где n – число поездов, отправившееся со станции в течение суток.

Срыв нитки отправления влечет за собой поиск следующей по порядку нитки, которая может быть как свободна, так и занята ранее планируемым на нее поездом. Если ранее на нитку был запланирован другой поезд, то использование ее поездом, потерявшим свою нитку в результате опоздания, повлечет и ее срыв для изначально планируемого поезда, т. е. происходит сдвиг ниток до первой свободной. Каждый «сдвигаемый» при этом поезд имеет дополнительный простой. Вероятность появления свободной нитки напрямую зависит от степени заполняемости графика. Это значит, что вероятность возникновения сверхнормативного простоя каждого поезда можно рассчитать, используя данный показатель [11]. Вероятность возникновения сверхнормативного простоя для поезда с порядковым номером k ($p(k)$) определяется по формуле (2.16), которая следует из определения вероятности [37]. Вероятность появления события в данном случае равняется отношению числа несовместимых равновероятных элементарных событий (количество ниток, занятых еще не отправившимися поездами, $n - (k - 1)$) к числу всех возможных элементарных событий (количество оставшихся для использования ниток после отправления $k - 1$ поезда).

$$p(k) = \frac{n - (k - 1)}{\frac{n}{Z \cdot 10^{-2}} - (k - 1)}, \quad (2.16)$$

где k – порядковый номер поезда, начиная с нарушившего график;

n – количество отправившихся со станции поездов в течение суток;

Z – степень заполняемости графика, %.

Вероятность появления сверхнормативного простоя (срыва нитки) у каждого из поездов в течение суток показана на рисунке 2.14, на котором изображены зависимости изменения указанной вероятности при степени заполняемости графика от 50 % до 100 % при нарушении графика одним из поездов. В указанной зависимости не учитывается продолжительность опоздания поезда, а только факт такого опоздания, который привел к срыву нитки. Такая условность принята для унификации модели зависимости и исключения привязки к какому-нибудь отдельному фактору (поломка локомотива, отсутствие бригады и т. д.).

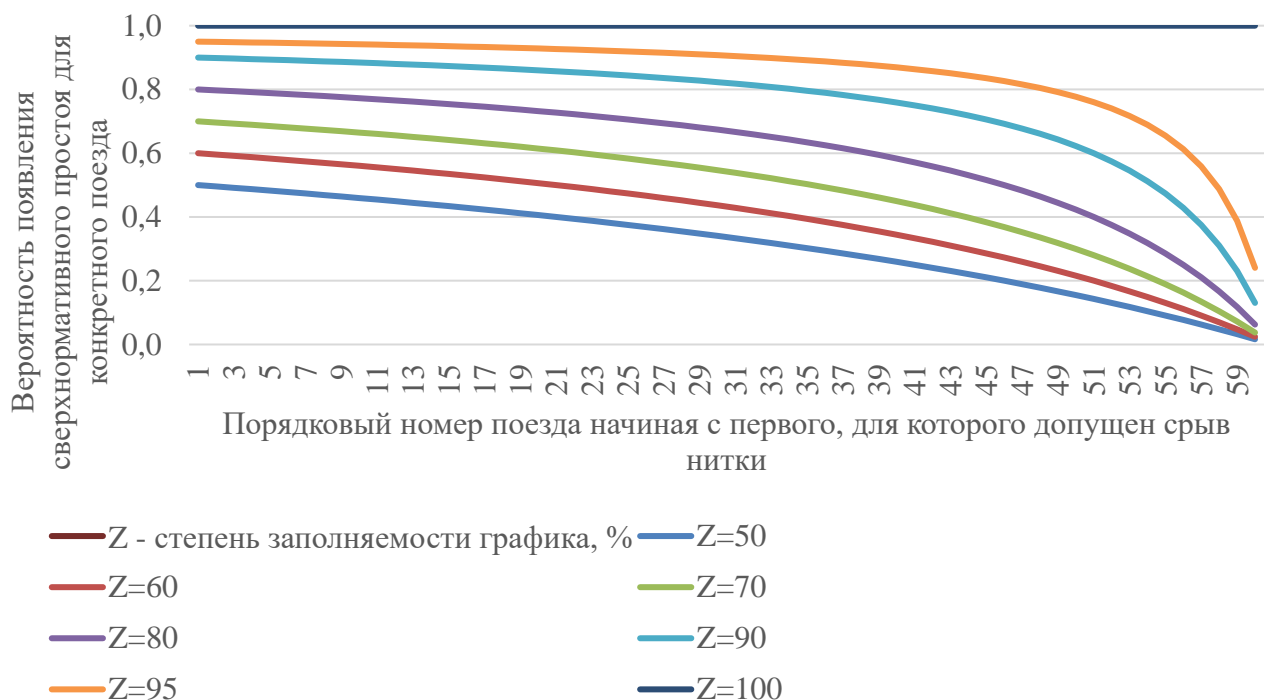


Рисунок 2.14 – Вероятность появления сверхнормативного простоя поездов

Вероятность срыва нитки зависит от ее расположения относительно первой нитки, для которой был допущен срыв, и степени заполняемости графика. Например, рассмотрим четыре нитки с временем отправления 12:00, 12:10, 12:20, 12:30

при степени заполняемости графика 50 % (см. рисунок 2.13). Если допущен срыв нитки с временем отправления 12:00, с вероятностью примерно 0,5 будет сорвана третья по счету от нее нитка с временем отправления 12:30. На рисунке 2.14 представлена расчетная вероятность для количества поездов от 1 до 60. На практике их число не будет превышать 10 поездов. Наличие большего количества сорванных поездов может быть связано только с отказами в работе технических средств.

После расчета зависимости вероятности появления сверхнормативного простоя для каждого из поездов определена вероятность срыва ниток для некоторого количества поездов k , начиная с первого поезда, потерявшего нитку отправления. В общем случае, когда необходимо рассчитать вероятность появления некоторого числа событий, пользуются формулой Бернулли $p_n(m) = C_n^m p^m q^{n-m}$ [106]. В рамках исследования ее применение в первоначальном виде неправильно из-за наличия ряда особенностей:

- вероятность появления каждого отдельного события отличается от всех прочих;

- вероятность наступления события в каждом из испытаний зависит от результатов предыдущего испытания. Другими словами, в случае появления для рассматриваемого поезда события срыва нитки для следующего поезда также существует вероятность появления данного события, однако если срыва нитки для рассматриваемого поезда не допущено, то и следующий поезд использует ранее запланированную нитку.

Определена вероятность $p_k(k)$ появления k событий (количество сорванных ниток) в k испытаниях по формуле (2.17), представляющей собой адаптированную в рамках условий исследования, приведенных выше, формулу Бернулли [106]:

$$p_k(k) = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k \cdot q_{k+1}, \quad (2.17)$$

где p – вероятность появления события в 1, 2, ..., k испытаниях;

q – вероятность того, что событие для рассматриваемого испытания не произойдет.

Вычисления сделаны с учетом влияния уровня выполнения нормативного графика на вероятность простоя, описанного формулой (2.16). Результаты (для

уровня выполнения нормативного графика в 50 %, 80 % и 90 %), полученные с помощью использования формулы (2.17), изображены в виде графика на рисунках 2.15–2.17. Вероятность срыва ниток более чем для 10 поездов подряд стремится к нулю. На рисунках 2.15–2.17 для наглядности рассмотрено то количество поездов, при котором вероятность возникновения простоя поддается визуальному анализу.

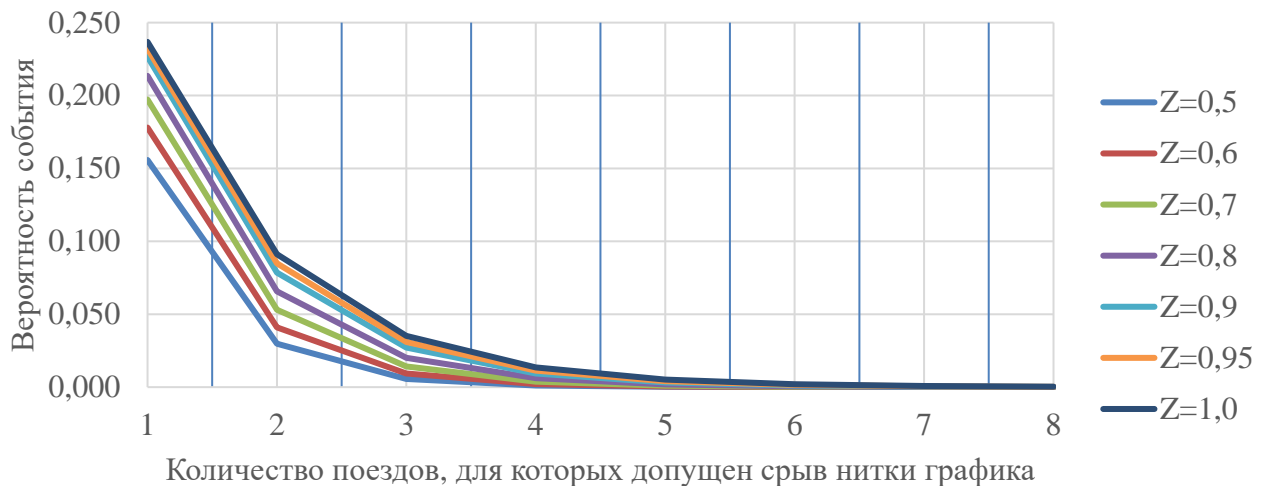


Рисунок 2.15 – Вероятность появления сверхнормативного простоя (срыва нитки) для заданного числа поездов в течение суток при выполнении графика поездов по прибытию на уровне 50 %

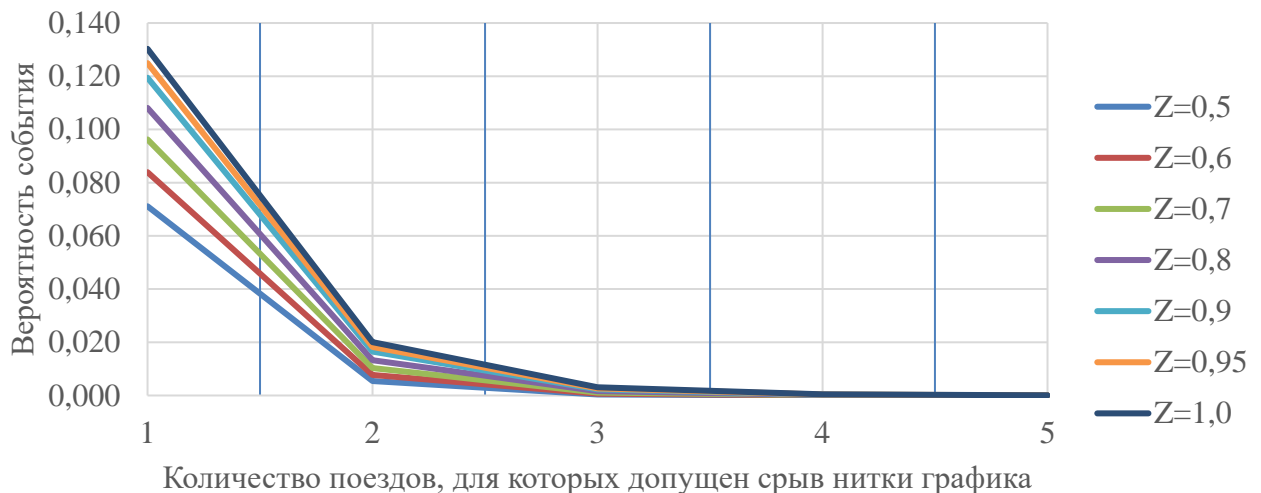


Рисунок 2.16 – Вероятность появления сверхнормативного простоя (срыва нитки) для заданного числа поездов в течение суток при выполнении графика поездов по прибытию на уровне 80 %

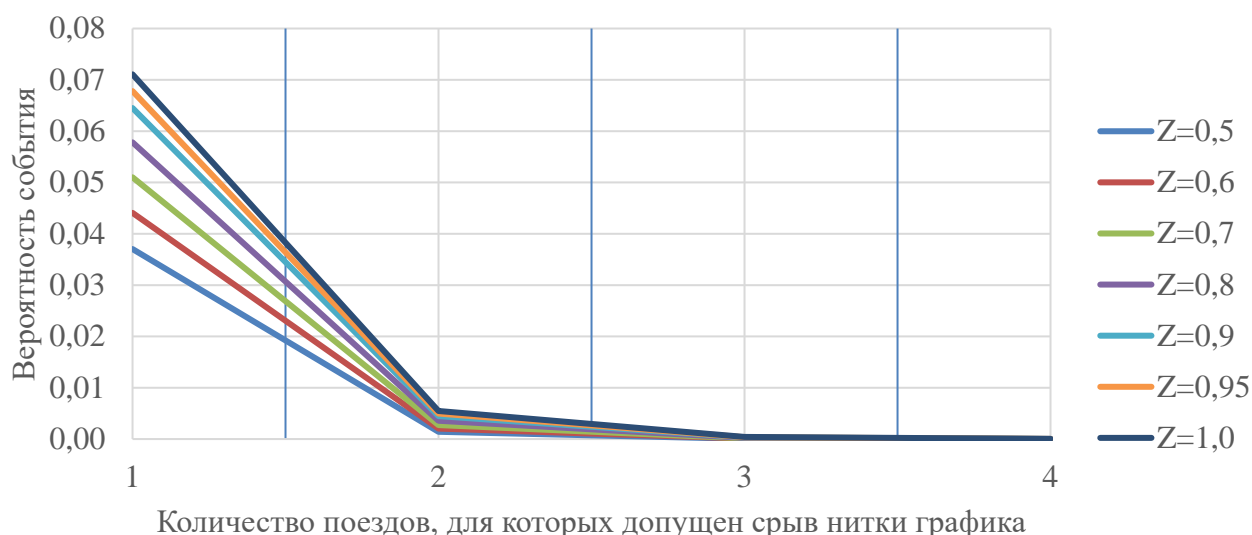


Рисунок 2.17 – Вероятность появления сверхнормативного простоя (срыва нитки) для заданного числа поездов в течение суток при выполнении графика поездов по прибытию на уровне 90 %

Из рисунка 2.15 с наиболее приближенным к реальности уровнем выполнения нормативного графика (50 %) следует, что вероятность сверхнормативного простоя одного поезда, в зависимости от степени заполняемости графика, расположена в диапазоне от 0,15 до 0,25. Два подряд поезда допустят срывы запланированных ниток с вероятностью от 0,03 до 0,09. Для пяти и более поездов значение вероятности не превышает 0,01.

В результате проведенного исследования определена зависимость вероятности возникновения простоя поездов по станции от степени заполняемости графика и уровня его выполнения (см. рисунки 2.14–2.17). Зависимости описаны формулами с применением теории вероятностей.

2.4 Расчет эффективности использования действующего графика движения поездов на железной дороге

В комплексе «Эльбрус» реализована возможность построения энергосберегающего графика, а точнее, энергооптимальных, если исходить из оптимальности хода по-

езда, ниток нормативного графика [90]. В АПК «Эльбрус» построение графика производится с учетом максимального использования пропускной способности участка. Построенные нитки графика разделяются на несколько видов: не имеющие стоянок на участке между техническими станциями – прямые нитки, а также имеющие одну и более остановок (в основном для осуществления пропуска пассажирских поездов). При наличии остановок увеличиваются эксплуатационные расходы, связанные с разгоном поездов и увеличением рабочего времени локомотивной бригады, а также другие виды затрат.

В работе рассмотрена и проанализирована степень заполняемости нормативного графика движения поездов. При проведении анализа (п. 2.2) выявлено, что степень заполняемости графика для участков Барабинск – Инская, Барабинск – Московка составляет 79 % для нечетных поездов и 65 % для четных поездов (см. таблицу 2.6). Средняя величина степени заполняемости графика равна 72 %, т. е. не используется 28 % ниток нормативного графика. Возникает вопрос о целесообразности использования ниток, имеющих стоянки на промежуточных станциях участка, при организации движения поездов. Проведен анализ наличия в графике движения поездов ниток со стоянками на промежуточных станциях и частоты их использования (рисунки 2.18–2.22).

Эксплуатационные расходы, связанные с пропуском поезда по конкретной нитке, имеют прямую зависимость от массы поезда [20]. Использование одной и той же нитки может быть целесообразным для поездов массой до 2000 т, но, с другой стороны, это может привести к потерям при пропуске поездов с большими массовыми характеристиками.

В ходе анализа произведено разделение всех поездов в зависимости от массы на семь категорий (для наглядности выбран шаг между категориями в 1000 т):

- менее 2000 т;
- от 2000 до 3000 т;
- от 3000 до 4000 т;
- от 4000 до 5000 т;
- от 5000 до 6000 т;
- от 6000 до 7000 т;
- более 7000 т.

Нитки графика распределены на три группы:

- прямые нитки (не имеющие стоянок на промежуточных станциях участка);
- нитки, с одной остановкой на участке;
- нитки, с двумя и более остановками.

Анализ произведен по отдельности для нечетного и четного направлений участка Инская – Барабинск в связи с существующими отличиями данных направлений, заключающимися в разнице средней массы пропускаемых поездов. Диаграммы распределения поездов (в зависимости от их массы) различных категорий между нитками графика, имеющими остановки на участке, для четного и нечетного направлений приведены на рисунках 2.18 и 2.19.

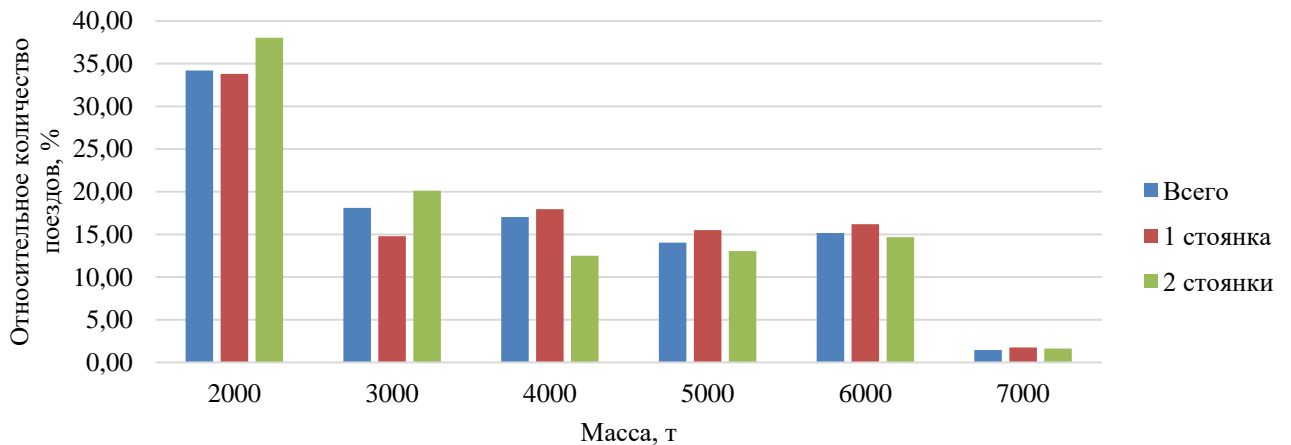


Рисунок 2.18 – Диаграмма распределения четных поездов между нитками графика

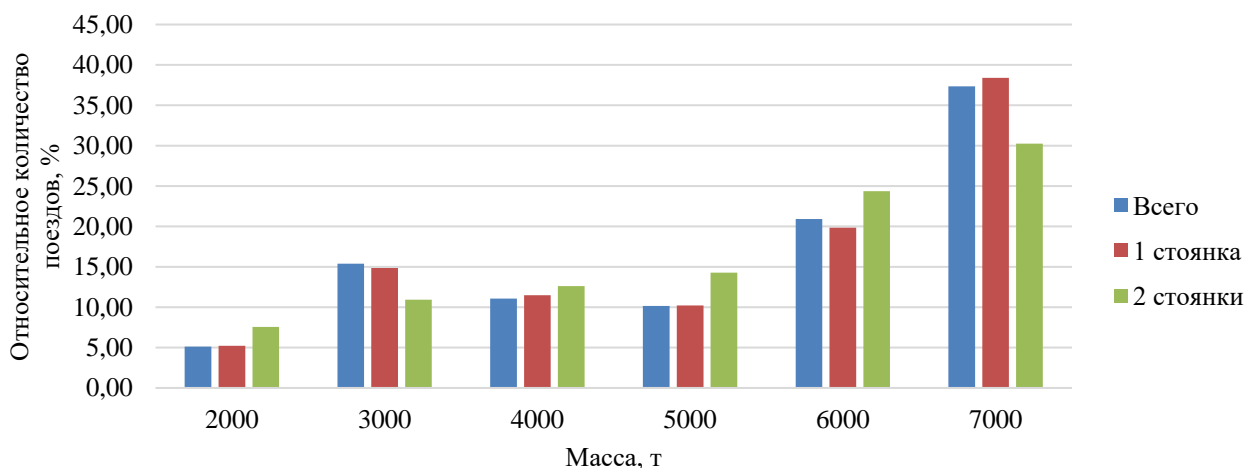


Рисунок 2.19 – Диаграмма распределения нечетных поездов между нитками графика нечетных поездов

На приведенных диаграммах (см. рисунки 2.18, 2.19) видно, что поездами различных категорий нитки с разным числом остановок на участке используются неравномерно. Диапазон колебания процента использования ниток поездами различных категорий составляет 9 %. Данная ситуация объясняется отсутствием приоритетов при планировании ниток отправления.

Определенные нормативным графиком движения пропорции ниток различных категорий и соответствующее им распределение четных и нечетных поездов показаны на рисунках 2.20, 2.21.

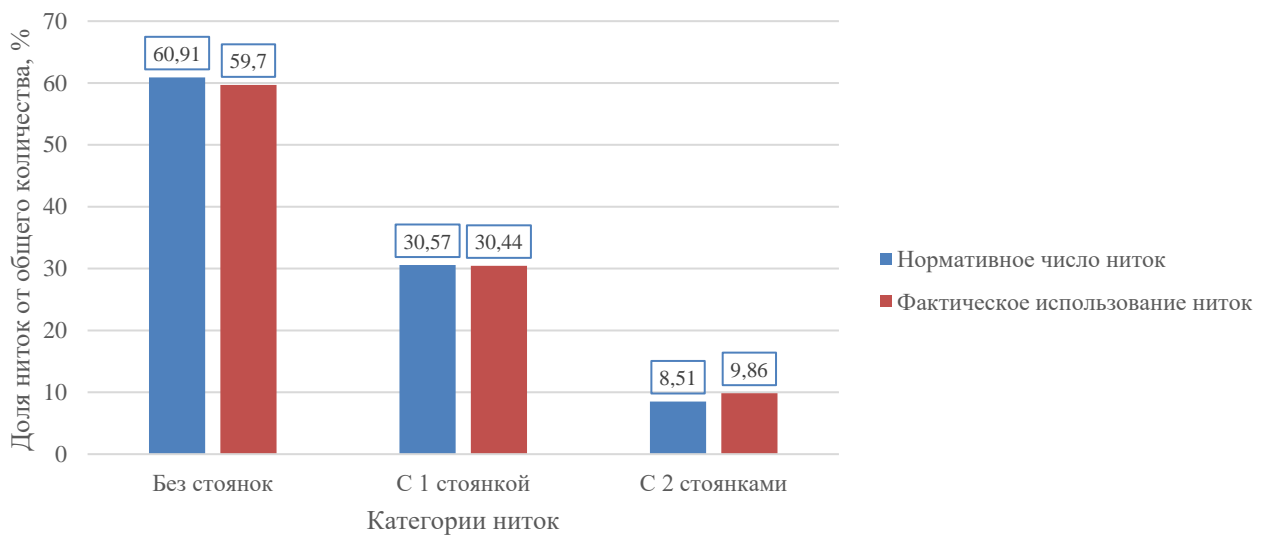


Рисунок 2.20 – Диаграмма наличия и использования ниток в четном направлении

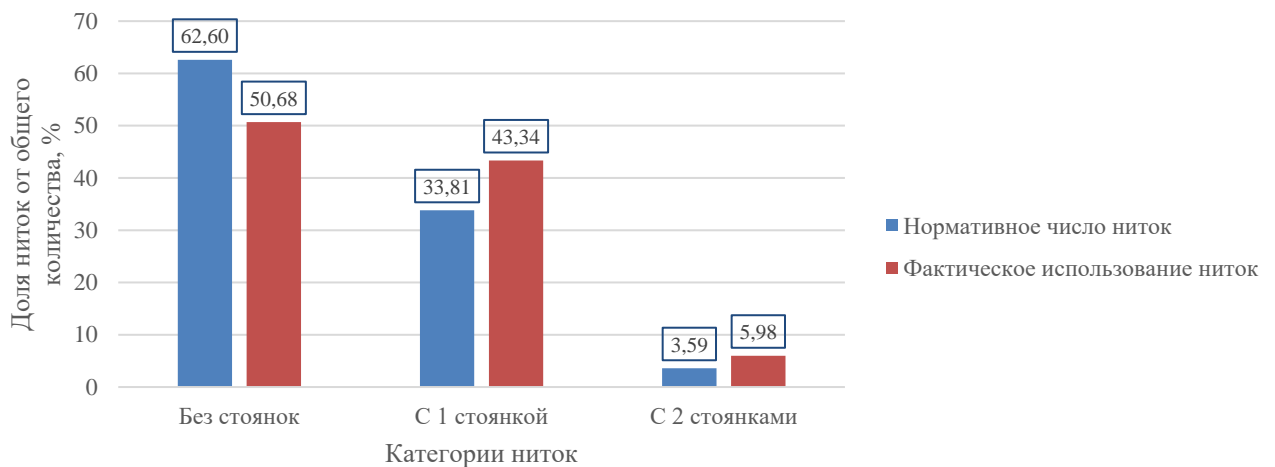


Рисунок 2.21 – Диаграмма наличия и использования ниток
в нечетном направлении

Найдена доля поездов, отправленных на нитки, с одной, двумя и более стоянками по участку между техническими станциями. Проведен анализ величины данной доли, в итоге рассмотрена возможность отказа (частичного или полного) от использования данных ниток при обязательном учете возможных отрицательных последствий.

Отношение поездов с двумя и более остановками на участке к общему числу поездов составило 6 % для нечетного направления и 10 % для четного соответственно. Отправление поездов на нитки с одной остановкой составило 30 % и 43 % поездов соответственно. У 51 % нечетных и 61 % четных поездов отсутствовали стоянки на участке. На основании приведенных данных сделано три вывода:

1 Нитки с одной остановкой являются неотъемлемой и важной частью пропускной способности, полный отказ от их использования не представляется возможным ввиду неравномерности подхода поездов. Количество таких ниток составляет 30 % и более от общего числа. Степень заполняемости графика в среднем составляет от 65 % до 80 % (п. 2.2). Соответственно, невозможно осуществить пропуск имеющегося количества поездов только по прямым ниткам графика, так как их число меньше размеров движения.

2 Использование ниток с двумя и более остановками затрагивает небольшие объемы движения, которые в общем не превышают 10 %, для сокращения эксплуатационных расходов имеется потенциальная возможность отказаться от использования данных ниток.

3 При отказе от использования ниток с двумя и более остановками произойдет увеличение процента использования прямых ниток до 70 %, а общая степень заполняемости графика возрастет до 81 %, так как произойдет сокращение общего числа проложенных ниток в нормативном графике движения поездов.

Анализ графика и последующее принятие решений о перераспределении поездов между нитками на примере одних суток исполненного графика движения поездов представлен в приложении В, в котором также приведен расчет эксплуатационных расходов, возникающих при различных вариантах распределения поездов.

В п. 2.2 было определено, что процент использования ниток графика составляет от 70 % до 80 %. Однако необходим более детальный анализ нормативного графика с последующим сопоставлением с графиком исполненного движения для определения резерва ниток и их категорий. На рисунке 2.22 изображена диаграмма процентного распределения ниток нормативного графика по числу стоянок на участке.

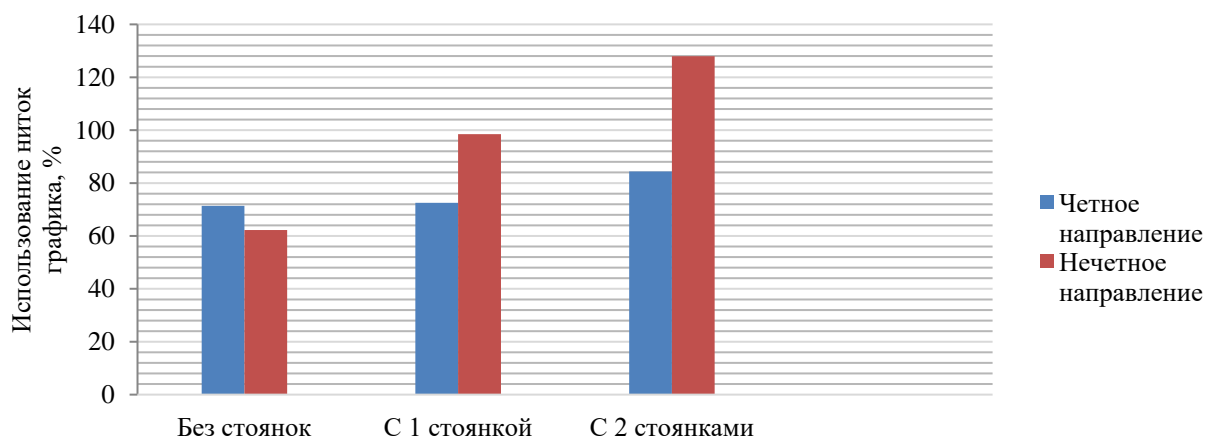


Рисунок 2.22 – Диаграмма распределения ниток нормативного графика по числу стоянок на участке

Учитывая, что общая степень заполняемости графика составляет 70 %, использование ниток различных категорий происходит неравномерно относительно друг друга. Нитки с остановками используются чаще, чем прямые. Доля использования ниток четного направления с двумя и более остановками составляет 85 %. Для нечетного направления доля использования ниток с одной остановкой составляет 99 %, а ниток с двумя и более остановками – 128 % (это объясняется отправлением поездов без нормативного графика с технической станции, для отправления поездов было использовано 100 % имеющихся ниток графика с двумя остановками, часть поездов была отправлена диспетчерским расписанием без ниток, при этом данные поезда также имели две остановки). Прямых ниток нечетного направления при этом задействовано только 62 %. Неравномерное использования ниток различных категорий объясняется тем, что в существующей системе планирования не учитывается такой критерий, как количество остановок, и поезда планируются к отправлению на нитки графика по мере готовности.

Из данных, указанных на рисунках 2.20–2.22 следует, что доля используемых прямых ниток графика является недостаточной. Нитки с различным числом остановок на участке используются неравномерно. Возможны ситуации использования почти всех ниток с остановками и неиспользования прямых ниток. Доля использования ниток, имеющих стоянки поездов на участке, составляет от 85 % до 99 %, что в среднем на 10–20 % больше общей степени заполняемости графика.

Для исследования влияния использования различных ниток графика на изменение эксплуатационных расходов проведены соответствующие расчеты по формулам, составленным автором работы.

Сначала определяются расходы P_{mi} , руб., связанные с пропуском имеющегося количества поездов m весовой категории в рамках рассматриваемого периода (в работе рассмотрен один месяц) по нитке с i остановками:

$$P_{mi} = P_m \cdot N, \quad (2.18)$$

где P_m – расходы, связанные с пропуском поезда m весовой категории по рассматриваемой нитке, руб.;

N – количество пропущенных поездов в рамках рассматриваемого периода.

Далее определяется соотношение количества дополнительных расходов α (возникающих при стоянках на промежуточных станциях), приходящееся на пропуск поездов различных категорий по ниткам графика с одной и двумя остановками, по формуле

$$\alpha = \frac{P_{mi}}{(P_{m1} + P_{m2})} \cdot 100, \quad (2.19)$$

где P_{m1} , P_{m2} – расходы, возникающие при стоянках на промежуточных станциях, связанные с пропуском имеющегося количества поездов m весовой категории в рамках рассматриваемого периода по нитке с одной и двумя остановками соответственно, руб. (в п.3.2 приведена методика расчета данных показателей (см. формулы (3.1)–(3.12))).

При расчете эксплуатационных расходов не рассматривались нитки без остановок на участке, так как пропуск поездов по таким ниткам не влечет дополнительных расходов, связанных с остановками. Расчет расходов, возникающих при стоянках на промежуточных станциях, выполнялся для электровозов постоянного тока по методу укрупненных расходных ставок [94].

Результат расчетов показан на рисунках 2.23 и 2.24 в виде диаграмм колебания расходов для четного и нечетного направлений соответственно в зависимости от использования ниток разных категорий поездами различных масс.

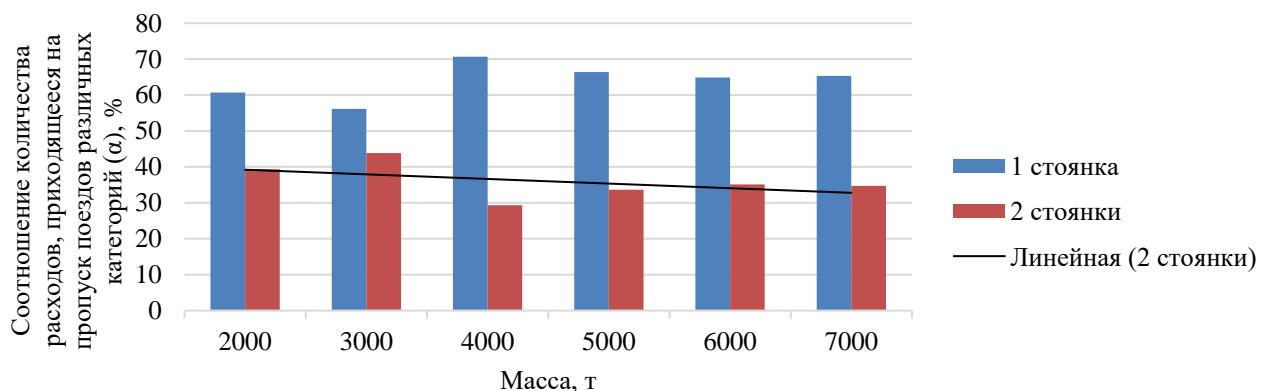


Рисунок 2.23 – Диаграмма процентного изменения эксплуатационных расходов, связанных с пропуском поездов по ниткам графика, в зависимости от массы поезда и количества стоянок для четного направления

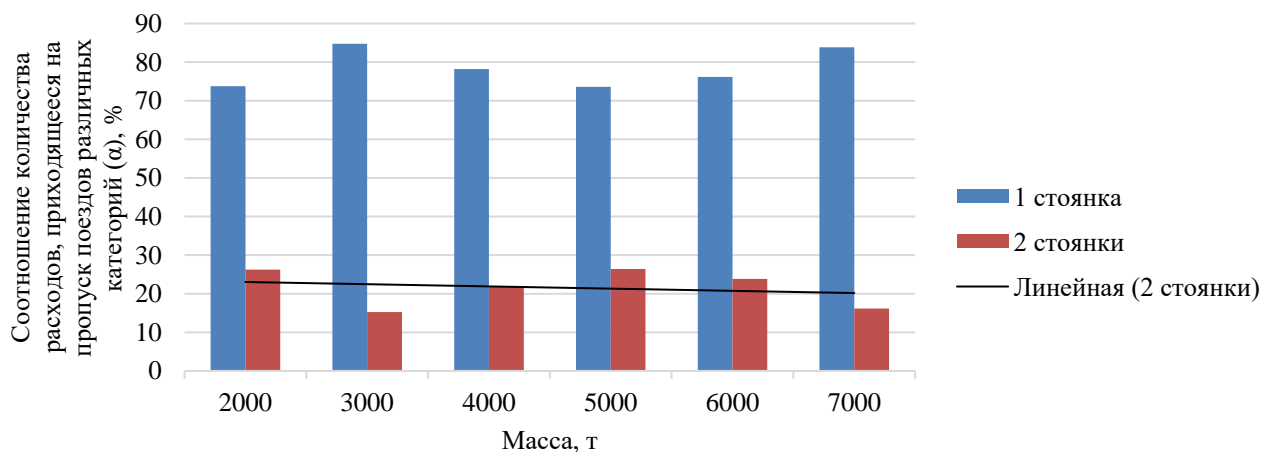


Рисунок 2.24 – Диаграмма процентного изменения эксплуатационных расходов, связанных с пропуском поездов по ниткам графика, в зависимости от массы поезда и количества стоянок для нечетного направления

На рисунках 2.23, 2.24 наглядно показано отношение расходов, возникших при использовании различных ниток. В итоге 35 % расходов приходится на 10 % поездов четного направления, имеющих две и более остановки. На 6 % нечетных поездов приходится 25 % расходов. Данные процентные распределения соответствуют 777,0 тыс. руб. и 631,0 тыс. руб. для одного диспетчерского участка.

После проведения анализа спрогнозирована ситуация отказа от использования ниток с двумя и более остановками. Вместо них предложено использовать прямые нитки графика. Подобные исключения возможны только при наличии резервов пропускной способности в размере не менее 10 %, которых будет достаточно для компенсации последствий отказов технических средств и других сбоев в работе. Прогнозируемое увеличение степени заполняемости нормативного графика сведено в таблицу 2.8.

Таблица 2.8 – Степень заполняемости нормативного графика движения за декабрь 2020 г.

Тип ниток	Степень заполняемости графика, %			
	Четные поезда		Нечетные поезда	
	Исполненный	Прогнозный	Исполненный	Прогнозный
Прямые нитки	71,41	83,21	62,22	69,57
С одной стоянкой	72,54	72,54	98,51	98,51
С двумя и более стоянками	84,40	–	127,96	–
Всего	72,86	79,64	76,85	79,72

После отказа от использования ниток с двумя и более остановками произошло увеличение степени заполняемости графика. При неизменном числе пропущенных поездов количество возможных для использования ниток уменьшилось на величину неиспользуемых. Степень заполняемости увеличилась на 7 % и 3 %, соответственно, для четного и нечетного направлений, или в среднем на 5 %. Существующий резерв прямых ниток является достаточным для обеспечения заданных размеров движения без использования ниток, имеющих две и более остановки. В

случае отсутствия необходимых резервов (не менее 10 %), исключение ниток не представляется возможным ввиду возникновения негативных последствий, связанных с увеличением времени простоя поездов на технических станциях, а именно:

- увеличение времени занятия станционных приемо-отправочных путей, что приведет к необходимости увеличения количества путей для приема и отправления поездов на ряде технических станций для выполнения действующего графика;

- рост оборота локомотива и последующая ему необходимость в увеличении локомотивного парка.

Подробно влияние исключения ниток графика на эксплуатационные расходы рассмотрено в главе 3 настоящей работы.

Из результатов корреляционного анализа следует, что существующие размеры движения позволяют отказаться от использования ниток с двумя и более остановками. Однако нельзя на постоянной основе исключить из использования нитки с одной остановкой по причине того, что существующие размеры движения не будут обеспечены нитками. При принятии решения об исключении ниток необходимо учитывать путевое развитие станций и выполнение условия обеспечения своевременного приема поездов. Чтобы сократить эксплуатационные расходы, связанные с пропуском поезда по конкретной нитке графика, нужно распределять поезда между нитками на основе принципа их рационального использования. По возможности необходимо использовать нитки, имеющие стоянки, только для поездов с наименьшей массой.

Все нитки с одной стоянкой занимать только лишь легковесными поездами (массой 2000, 3000 т) не получится в связи с высокой долей поездов большой массы в общих размерах движения. Для нечетного направления 58 % поездопотока составляют поезда массой 6000 т и более. Разница эксплуатационных расходов при использовании нитки даже с одной остановкой для поездов с массой 6000 т (2382 руб.) и 2000 т (753 руб.) составляет более 1600 руб.

2.5 Влияние человеческого фактора на процесс планирования отправления поездов

Человеческий фактор оказывает воздействие на технологический процесс во многих сферах производства [39]. Часто результаты такого влияния являются отрицательными. Например, человеческий фактор лежал в основе крушения поездов на перегоне Тальменка – Литвиново в 1996 г., отправления поездов навстречу друг другу на перегоне Иж-Бобья – Агрыз в 2021 г. и др. Процент принятия оптимальных решений при пропуске поездов по ограничивающему участку составляет 7–12 % [120].

Человек имеет предел объема оперативной обработки информации, заключающийся в резком, недопустимом для оперативной работы увеличении времени на ее обработку и принятие решения. Указанный предел возникает при чрезмерной загрузке человека потоками входящей информации, требующей обработки [38, 39, 52, 88]. Также возникает риск принятия поспешных, ошибочных решений при попытке снижения времени, необходимого для их принятия [39]. Любое введение автоматизации той или иной функции сопряжено с инвестициями, связанными с созданием и обеспечением работы соответствующего программного комплекса.

Определена существующая загрузка дежурно-диспетчерского персонала технических станций, связанная с вопросами планирования отправления поездов. Для решения поставленной задачи произведен анализ планирования отправления поездов в течение двух декад (с 11.01.2020 по 31.01.2020) по станции Барабинск. В ходе анализа определено количество случаев принятия решений, связанных с планированием отправления поездов, в том числе с повторным. Такое планирование возникает при изменении изначально запланированного сценария отправления поездов в результате изменения условий отправления, вызванного, как правило, отказами технических средств либо нарушением технологии работы.

На рисунках 2.25, 2.26 представлены диаграммы относительного количества поездов, отправившихся в течение месяца на запланированные нитки, и поездов,

подвергшихся повторному планированию. Поезда, подвергшиеся повторному планированию, разделены на три категории:

- поезда, для которых изменилась планируемая нитка;
- поезда, для которых изменилась планируемая бригада;
- поезда, для которых изменилась планируемая нитка и бригада.

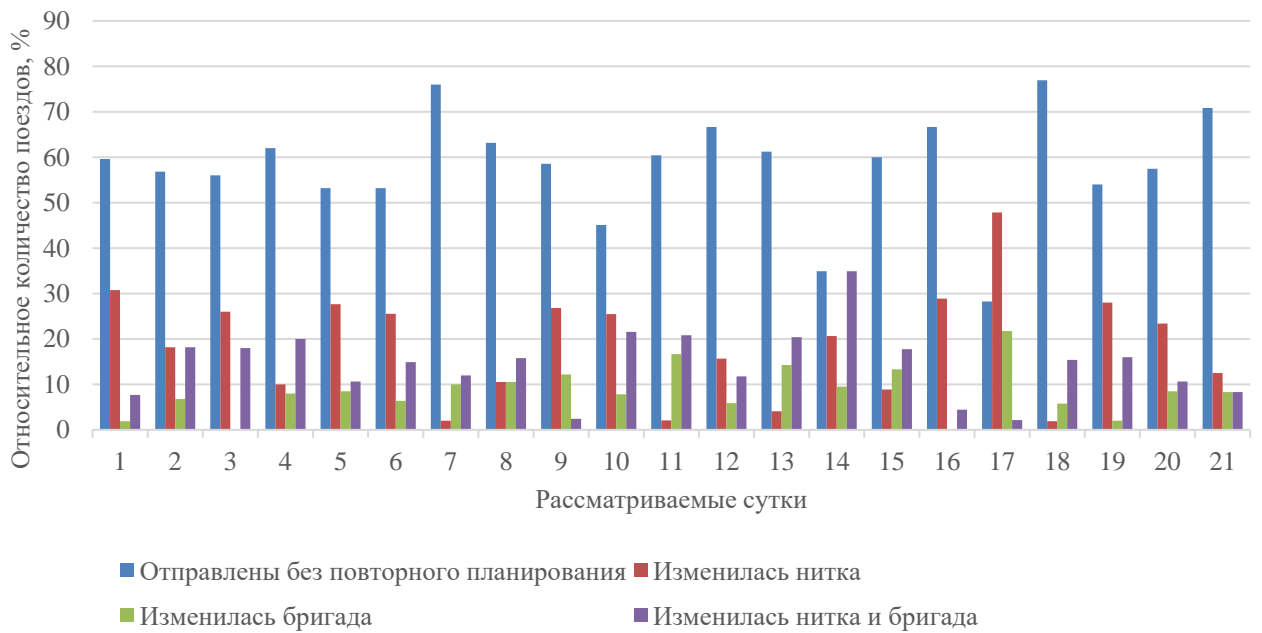


Рисунок 2.25 – Диаграмма распределения причин повторного планирования поездов для нечетного направления

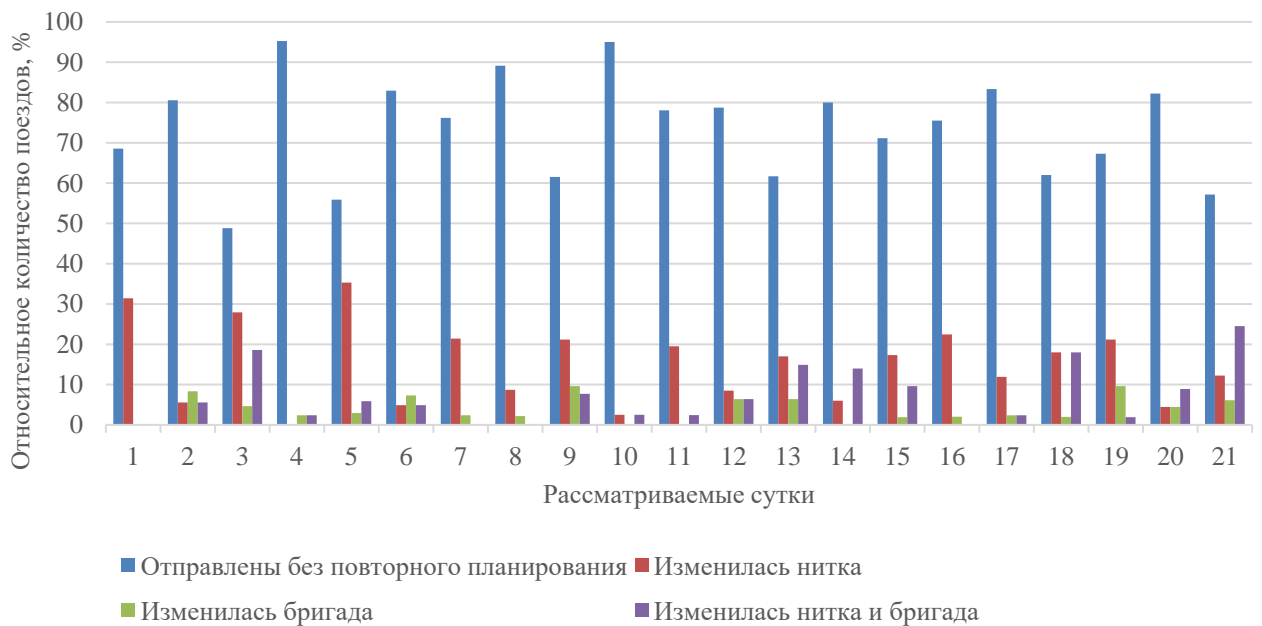


Рисунок 2.26 – Диаграмма распределения причин повторного планирования поездов для четного направления

Из представленных диаграмм видно, что в зависимости от характера поездопотока (нечетный либо четный) повторному планированию подвергается от 10 % до 70 % поездов. В среднем за месяц по двум направлениям для 37 % поездов осуществлялась операция планирования два и более раза.

В случае сбоя в первоначальном сценарии отправления поездов необходимо произвести перерасчет следующих характеристик и их взаимоувязку: поезд, локомотивная бригада, нитка графика. При среднесуточном поездопотоке 104 поезда в двух направлениях 38 поездов подвергнуты повторному планированию. В совокупности с тремя вышеуказанными характеристиками процесс планирования заключается в рассмотрении минимум 426 комбинаций параметров в сутки. Статистическим путем установлено, что среднее время, необходимое для планирования одного поезда в штатной ситуации, соответствует 10 сек. При повторном планировании время увеличивается до 30 сек по причине необходимости согласования с другими участниками перевозочного процесса. В итоге в сутки на вопросы планирования отправления поездов отведено 109 мин рабочего времени одной единицы дежурно-диспетчерского персонала станции, или 7,6 % суточного бюджета времени. Учитывая сменный график работы и время, затрачиваемое на прием пищи и иные потребности, получается, что 8,3 % рабочего времени смены одного сотрудника тратится на решение указанных задач. Подобное использование рабочего времени не является эффективным ввиду больших временных затрат на простые операции, не требующие высокой квалификации сотрудников.

Выводы по главе 2

По результатам проведенного во второй главе исследования установлено следующее:

1 Время простоя поездов имеет нелинейную (приближенную к экспоненциальной) зависимость от степени заполняемости графика, кроме того, время стоянки зависит от количества пассажирских поездов и взаимоувязки с ними грузовых ниток.

2 Отказ от использования ниток со стоянками на участке приведет к сокращению связанных с их использованием эксплуатационных расходов.

3 Решение об использовании нитки графика должно приниматься с учетом массы поезда и его приоритетности.

4 Регулирование степени заполняемости графика движения поездов на основе баланса между временем стоянок на технических и промежуточных станциях и количеством используемых ниток приведет к улучшению качественных показателей (увеличение участковой скорости, сокращение времени работы локомотивных бригад) и сокращению эксплуатационных расходов (в первую очередь от потерь, связанных с остановками на промежуточных станциях).

5 Существует предел объема информации, которую можно оперативно обработать силами человека. При чрезмерной загрузке человека увеличивается вероятность принятия поспешных, ошибочных решений, а значит, требуется автоматизация процесса планирования отправления поездов.

Сделанные выводы позволяют определить концепцию решения, которое направлено на минимизацию эксплуатационных расходов, связанных с использованием ниток графика. Разработка порядка использования ниток графика должна основываться на возможности гибко изменять степень использования графика в зависимости от возникающих расходов. Способ выбора варианта планирования поездов должен учитывать возможность использования ниток с различным числом остановок и массы поездов.

3 ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИТОК НОРМАТИВНОГО ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В СИСТЕМЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ПОЕЗДНОЙ РАБОТЫ

3.1 Разработка алгоритма планирования отправления поездов на нитки графика

Применение программных комплексов планирования, прогнозирования и последующей автоматизации работы полигона, состоящего из сортировочных станций и диспетчерских участков, уже длительное время рассматривается дирекциями управления движением и научно-исследовательскими организациями [34, 35, 47, 50, 57, 95, 107, 125, 131].

В работах ряда ученых [5, 6, 82, 83, 105, 113] процесс планирования и прогнозирования был автоматизирован на основе расчетных моделей отдельно для станций и перегонов. Технология комплексного взаимоувязанного прогнозирования и графического отображения поездной работы технических станций с примыкающими к ним перегонами, обеспечивающая взаимоувязку всех элементов перевозочного процесса, на основе автоматизированной системы комплексной эмуляции и усовершенствованных методов имитационного моделирования реализована в Самарском государственном университете путей сообщения [5, 6, 82, 83, 105, 113].

В настоящее время работу по прогнозированию прибытия и планированию отправления поездов (распределение между нитками графика) осуществляет дежурно-диспетчерский персонал станций. Человеческий фактор в указанной работе часто не позволяет с математической точностью выполнить все задачи, поставленные в рамках перевозочного процесса. Например, вследствие отвлечения дежурного персонала на выполнение маневровой работы, приготовление маршрутов прибытия и отправления поездов, организацию работ по текущему содержанию инфраструктуры, взаимодействие с работниками путей необщего пользования и т. д.

имеют место случаи несвоевременного планирования поездов. В итоге увеличивается время нерационального использования локомотивных бригад и сверхнормативный простой поездов и вагонов на станциях. Случаи некачественного планирования в части распределения поездов между нитками графика не носят массовый характер (см. рисунки 2.25, 2.26), но в настоящее время требуется полное исключение подобного. Необходима передача функций по планированию отправления поездов от человека машине, для чего нужно разработать и внедрить соответствующий программный продукт. Данная мера позволит исключить отрицательное влияние человеческого фактора на процесс планирования поездной работы и разгрузить персонал станций для того, чтобы освободившееся время они использовали для решения других задач.

На рисунке 3.1 представлена укрупненная структура диспетчерского участка с обозначением функций, которые необходимо смоделировать и алгоритмизировать для дальнейшей передачи от человека программно-вычислительным комплексам.

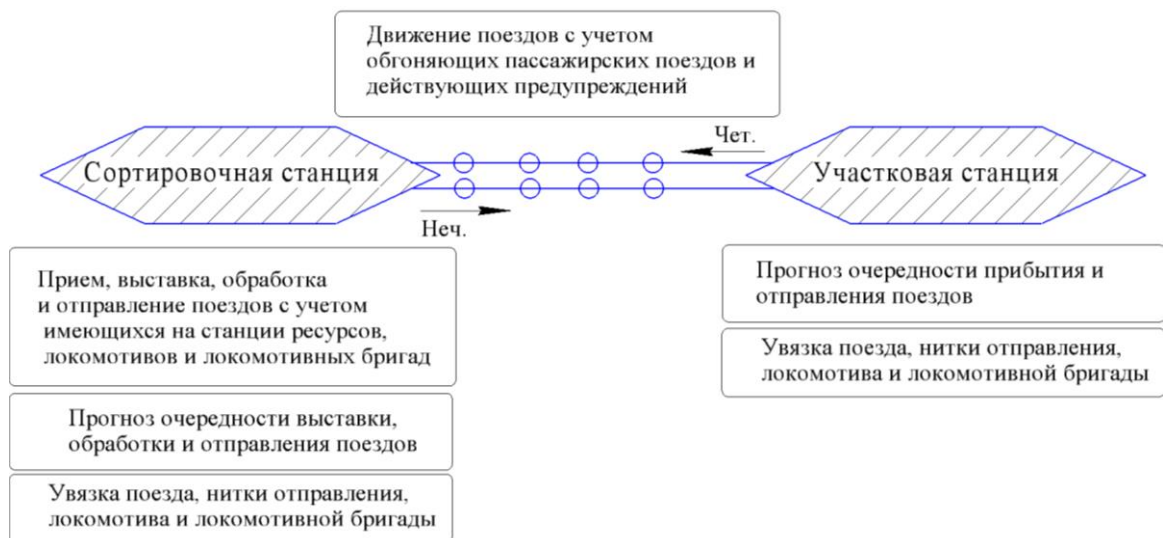


Рисунок 3.1 – Укрупненная структура диспетчерского участка

Попытки свести все действия при работе с информацией для последующего планирования в единый алгоритм предпринимались и ранее [101], однако носили укрупненный характер. Существует пример детальной алгоритмизации процесса планирования, однако в нем рассмотрен лишь процесс выбора нитки отправления

для поезда своего формирования [103]. Кроме того, в данном процессе не рассматривается взаимная увязка всех поездов в «подходе».

В работе автором представлен алгоритм, направленный на обеспечение автоматического планирования отправления поездов на нитки графика. В приведенном на рисунках 3.2, 3.3 алгоритме применяются следующие обозначения:

$t_{\text{приб}}$ – время прибытия поезда на станцию проведения технических операций (смены локомотивной бригады/локомотива);

$t_{\text{норм}}$ – нормативное время обработки, требуемое для проведения с поездом технических операций, в течение которого поезд будет готов к отправлению (задается технологическим процессом станции);

$t_{\text{пл}}$ – планируемое время отправления, к которому поезд будет готов к отправлению, сумма времени прибытия и технических операций;

t_m – время отправления, соответствующее m -ой нитке графика;

$L_{\text{ст}}$ – длина станционных приемо-отправочных путей по участку следования поезда (рассматриваются станции с наличием графиковых стоянок);

$L_{\text{поезда}}$ – длина поезда;

$k_{\text{пл}}$ – категория планируемого на нитку поезда;

$k_{\text{наз}}$ – категория назначенного на нитку поезда;

k_1, k_2, \dots, k_n – категории первого, второго, n -го поездов.

При разработке алгоритма рассматривалась существующая на станциях Западно-Сибирской железной дороги технология обработки поездов. Возможные временные потери в ожидании обработки поезда, локомотива, локомотивных бригад и иные непредвиденные факторы, находящиеся за рамками технологии, не учитывались.

Разработан алгоритм, обеспечивающий автоматическое планирование отправления поездов на нитки графика. Для работы алгоритма в зависимости от приоритетности следования поездам присваивается определенная категория (в рамках работы установлено три категории) [12]. Категории распределяются в порядке уменьшения приоритета поезда, например:

1 – соединенные поезда;

2 – ускоренные контейнерные поезда;

3 – прочие транзитные поезда.

В зависимости от характера поездопотока конкретного рассматриваемого участка количество категорий поездов может изменяться.

Каждая нитка графика по совокупности своих характеристик будет соответствовать одной или нескольким категориям, т. е. удовлетворять ряду обязательных требований, для пропуска одной или нескольких категорий поездов.

Алгоритм, приведенный на рисунках 3.2 и 3.3, строится по принципу обязательности подбора поезда для каждой нитки графика. Авторский алгоритм включает в себя три этапа отбора.

На первом этапе (см. рисунок 3.2) на рассматриваемую нитку производится поиск поездов – возможных претендентов за время, необходимое для вызова локомотивной бригады ($t_{\text{бр}}$). Перебираются все не распределенные между нитками поезда на участке, для которых отправление еще не запланировано. Для этого выполняются операции [10]:

1 Руководствуясь нормативным графиком, определяется время прибытия поезда на станцию проведения технических операций (смены локомотивной бригады и/или локомотива).

2 Рассчитывается нормативное время отправления:

$$t_{\text{пл}} = t_{\text{приб}} + t_{\text{норм}}, t_m - t_{\text{пл}} \geq 0, t_m - t_{\text{пл}} \rightarrow 0.$$

3 Проверяется готовность поезда к отправлению на рассматриваемую нитку.

4 Проверяется соответствие нитки и категории поезда:

$$k_{\text{нитки}} = k_{\text{поезда}}.$$

5 Осуществляется проверка соответствия длины станционных путей, на которых по графику предусмотрена стоянка поезда. Пути должны обладать достаточной длиной для обеспечения остановки поезда в пределах полезной длины:

$$L_{\text{ст}} \geq L_{\text{поезда}}.$$

6 Поезд не назначается на рассматриваемую нитку, если не выполнено хотя бы одно из приведенных выше условий.

7 В случае удовлетворения указанным требованиям поезд потенциально может быть назначен на рассматриваемую нитку, т. е. допускается до второго этапа отбора.

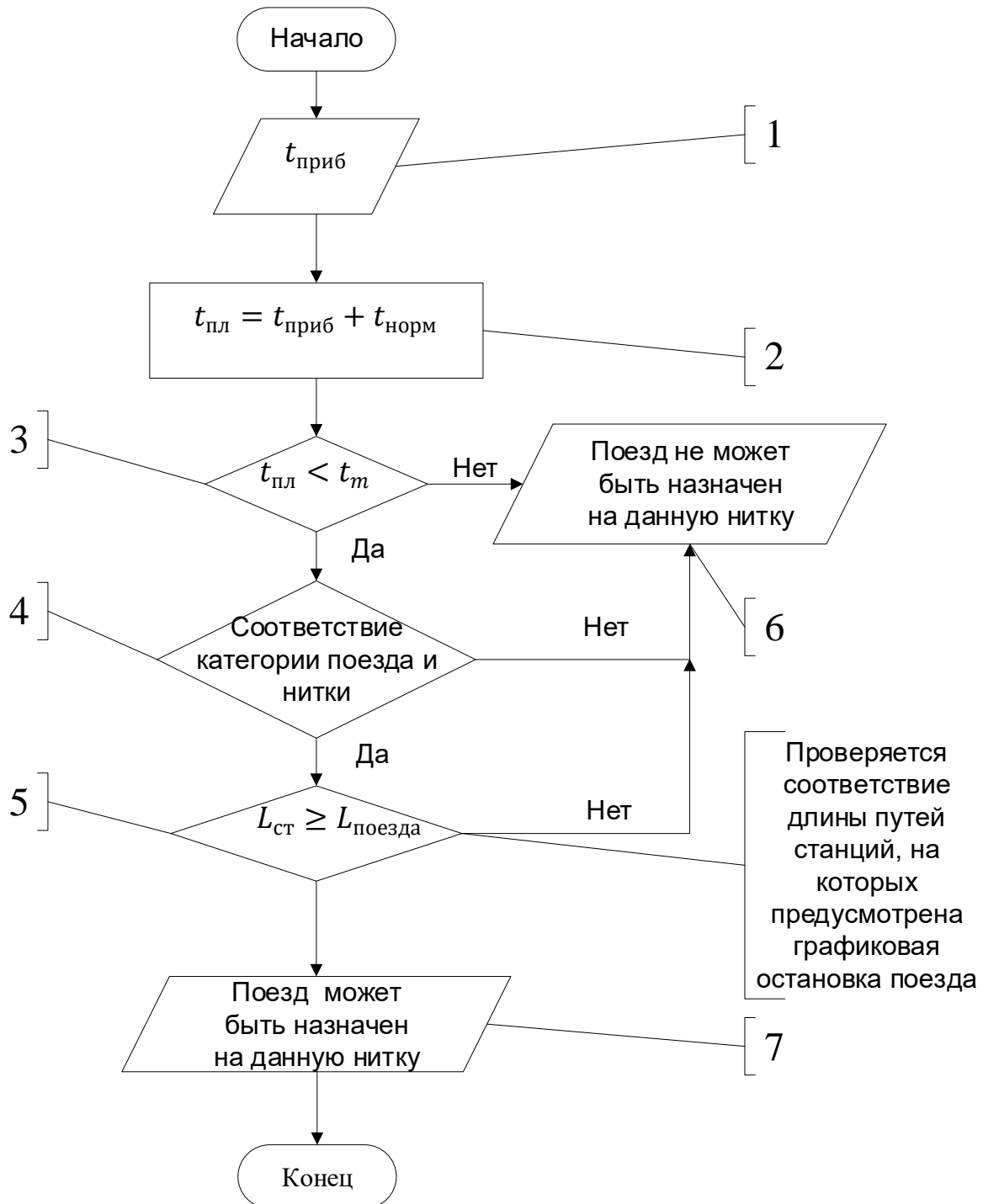


Рисунок 3.2 – Первый этап алгоритма подбора поезда для нитки графика

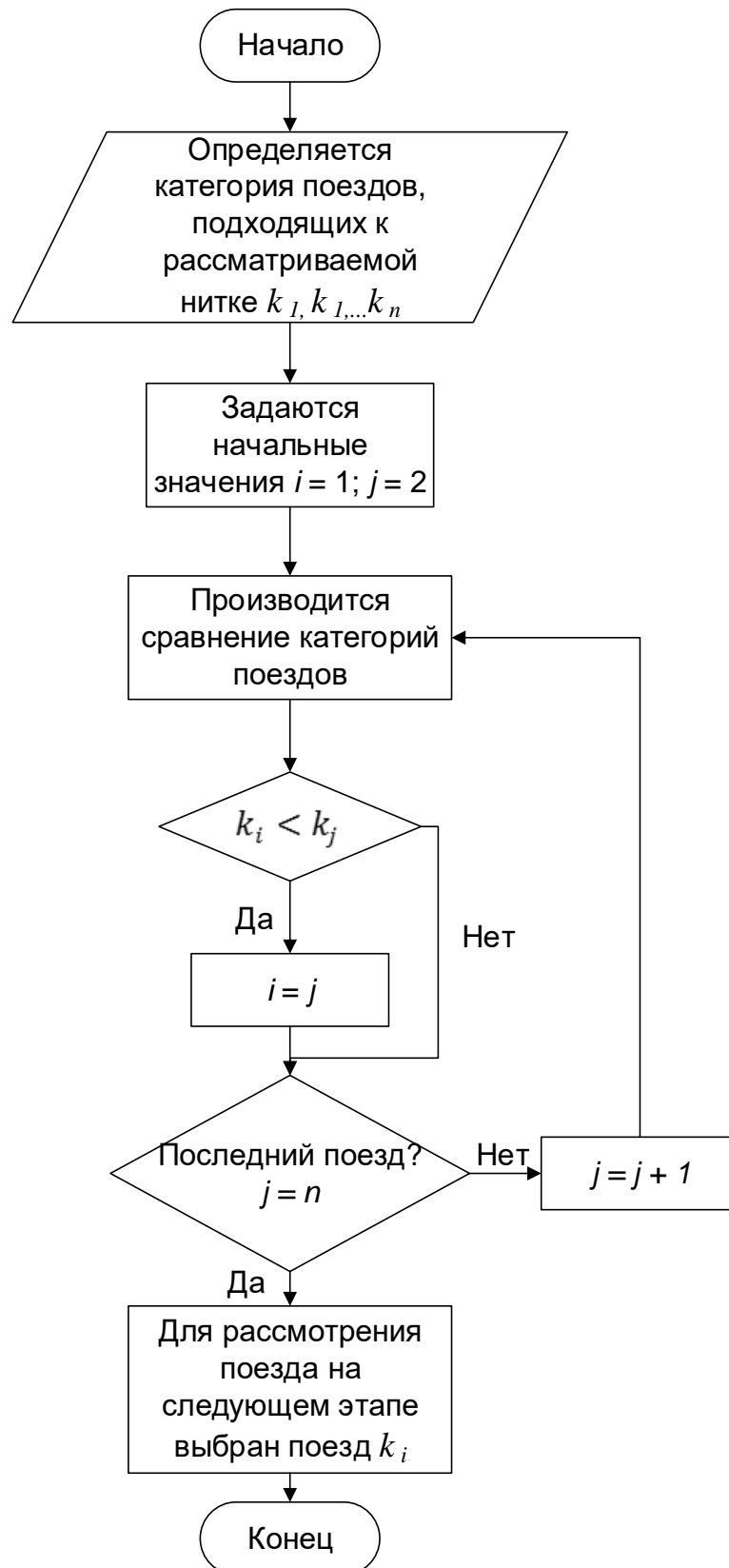


Рисунок 3.3 – Второй этап алгоритма подбора поезда для нитки графика

На втором этапе (см. рисунок 3.3) из полученного набора поездов производится их категоризация по критерию приоритетности и выбирается поезд (поезда), имеющий наиболее высокую категорию (наибольший приоритет).

$$\text{Если } k_i = \max(k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n) \Rightarrow N = i,,$$

где N – номер поезда.

На третьем этапе, в случае наличия в результате второго этапа двух и более поездов с одинаковой категорией, выбирается поезд с наименьшим временем прибытия на рассматриваемую станцию.

$$\text{Если } k_1 = k_2 \Rightarrow t_n = \min(t_1, t_2).$$

Пример с результатами использования авторского алгоритма приведен на рисунке 3.4.

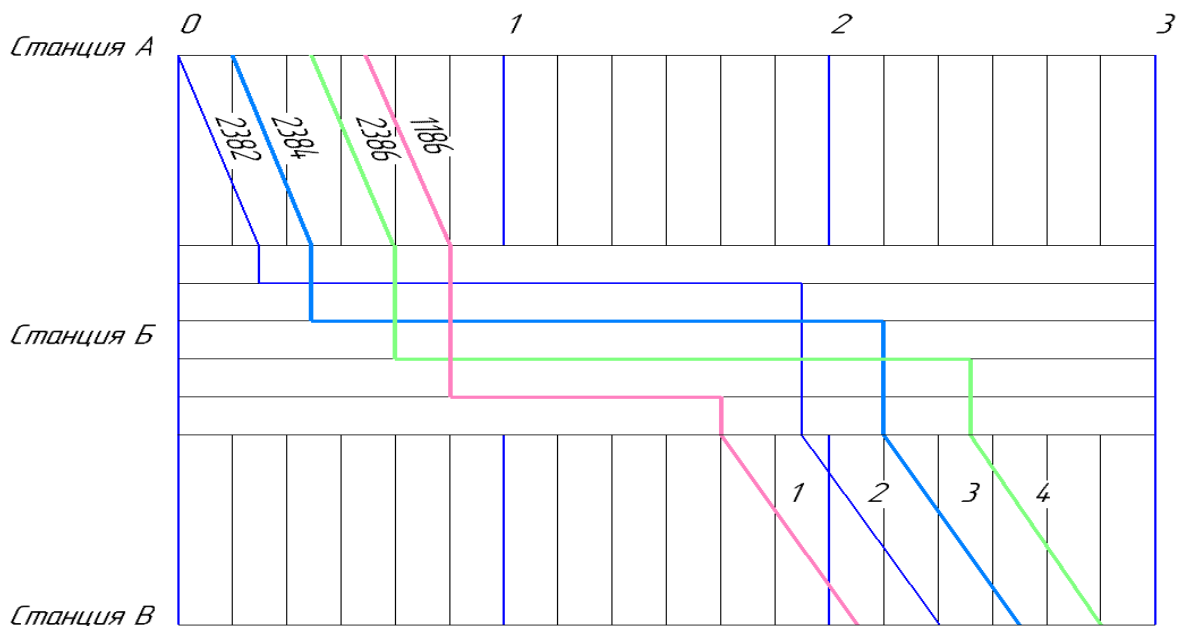


Рисунок 3.4 – Вариант распределения поездов при использовании авторского алгоритма

Для имеющихся поездов по всем параметрам могут быть использованы нитки №№ 1, 2, 3, 4. На основании требований приоритетности планирование отправления поездов производится следующим образом:

- к нитке № 1 – поезд № 1186 (контейнерный – 2-я категория);
- к нитке № 2 – поезд № 2382 (прочий – 3-я категория);
- к нитке № 3 – поезд № 2384 (прочий – 3-я категория);

- к нитке № 3 – поезд № 2386 (прочий – 3-я категория).

То есть на нитку № 1 планируется поезд наиболее высокой категории, несмотря на то что время его прибытия больше, чем у остальных поездов. Поезда №№ 2382, 2384, 2386 имеют категорию № 3, соответственно, нитки для их отправления выбираются в том же порядке, в котором поезда прибывали на станцию.

Разобран пример планирования отправления поездов с помощью графика исполненного движения по участку Барабинск – Инская за 20.11.2020. Фрагмент графика исполненного движения изображен на рисунке 3.5. В таблицу 3.1 сведены данные о подходе поездов, их прибытии, отправлении, времени отправления, полученные по итогам использования разработанного алгоритма. Технологическое время простоя $t_{\text{норм}}$, необходимое для использования алгоритма для станции Б, принимается равным 33 мин.

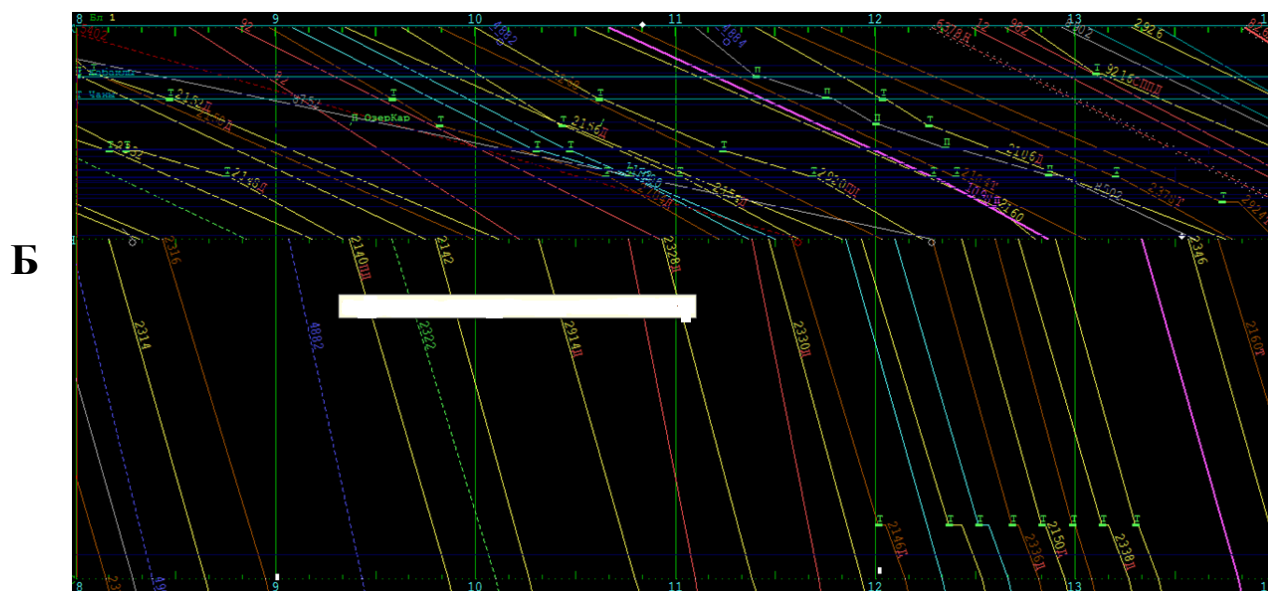


Рисунок 3.5 – Фрагмент графика исполненного движения

Таблица 3.1 – Результаты распределения поездов между нитками графика, полученные после использования авторского алгоритма

Номер поезда по прибытию	Примечание	Время прибытия	Время фактического отправления	Время отправления по авторскому алгоритму
1	2	3	4	5
2148	Размен лок.	9:20	12:02	11:46

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
2914	–	9:45	10:22	10:22
2150	–	9:59	11:37	11:28
2152	–	10:07	11:28	11:37
2704	–	11:13	12:20	12:20
1200	Уск.	11:22	11:46	12:02
1192	Уск.	11:30	12:11	12:11
2154	–	11:37	12:29	12:29
2156	85	11:50	12:47	12:47
1268	Уск.	12:02	12:38	12:38
2920	100	12:14	12:56	12:56
<p>Примечание – В столбце 2 указываются:</p> <ul style="list-style-type: none"> - производимые с поездом операции, помимо смены локомотивной бригады; - длина поезда в условных вагонах, если он является длинносоставным (например, 100 ваг.); - приоритетность поезда (Уск. – ускоренный контейнерный поезд); - прочие необходимые особенности. 				

Данные, приведенные в таблице 3.1, показывают, что результаты, полученные при планировании с использованием авторского алгоритма, в основном совпадают с фактически произведенным отправлением поездов. Однако имеет место два случая, при которых результаты отличаются:

1 Простой поезда № 1200, который отправился ранее планового времени, составил 24 мин, что меньше норматива на 10 мин. Как следствие, поезд № 2148 простаивал дополнительно еще 16 мин в ожидании пропуска поезда № 1200 как обладающего повышенным приоритетом. Причина объясняется оперативными действиями причастных к обработке состава поезда № 1200 работников, что позволило сократить время простоя.

2 Отправление поезда № 2150 произошло позднее отправления поезда № 2152. Указанные поезда обладают одинаковой категорией, и поезд № 2150 при-

был ранее. Причиной необоснованного увеличения сверхнормативного простоя поезда явилось наличие человеческого фактора при планировании отправления поездов.

Сделан вывод, что разработанный авторский алгоритм автоматического планирования поездов отвечает предъявляемым требованиям и обеспечивает качественное планирование отправления поездов на нитки графика.

3.2 Оптимизация использования ниток графика движения поездов

3.2.1 Разработка способа планирования отправления поездов, повышающего эффективность использования ниток графика

Как было сказано выше, нитка является ценным ресурсом, однако существуют случаи, когда прокладка определенных ниток является необоснованной с точки зрения увеличения эксплуатационных расходов. На одном отдельно взятом участке нитки различаются числом и продолжительностью стоянок на промежуточных станциях под обгон преимущественных поездов.

Наличие стоянок на участке связано с дополнительными эксплуатационными расходами на разгон/замедление поездов [80]: увеличивается время работы локомотивных бригад, оборот локомотивов (локомотивы и локомотивные бригады в фактической работе находятся около половины рабочего времени [21, 81]), а также расход электроэнергии непосредственно во время стоянки, уменьшается участковая скорость. Кроме того, стоянки зачастую ведут к незначительному (на 1–2 мин) отклонению от графика, а как было доказано в работах [78, 126], такое отклонение приводит к увеличению расходов электроэнергии на 10 %. С другой стороны, исключение по техническим станциям ниток с наличием стоянок на участке обернется дополнительными расходами, связанными с простоем поезда на технической станции в ожидании отправления. В результате отказа от использования ниток при больших размерах движения возможно возникновение «неприема» станцией. Это

ситуация, при которой число приемо-отправочных путей меньше количества поездов, которым необходимо прибыть на станцию.

Следовательно, для повышения эффективности использования графика необходимо определить пригодные нитки графика и обеспечить их рациональное использование. При планировании поездов предпочтение будет отдаваться варианту с наименьшими эксплуатационными расходами, связанными с движением поездов. На неэффективные нитки поезда отправляться не будут. Направление поиска оптимального графика не является новым для науки [60], однако в настоящей работе, кроме обобщения накопившегося опыта, разработан способ, позволяющий решить поставленную задачу – усовершенствовать существующую технологию отправления грузовых поездов с технических станций, ограничивающих двухпутные участки, по ниткам графика движения.

Для достижения поставленной в исследовании задачи разработан способ планирования отправления поездов, который позволяет сократить эксплуатационные расходы, связанные со стоянками поездов на промежуточных станциях участка. Указанный способ заключается в реализации двух этапов планирования, в рамках которых необходимо:

- уменьшить количество используемых ниток со стоянками на участке (с безусловным учетом текущей поездной обстановки);
- найти оптимальный вариант распределения поездов между нитками графика.

Использование предложенного способа осуществляется с помощью изложенной ниже методики.

Планирование отправления поездов осуществляется с первой свободной нитки графика. Если нитка имеет не менее одной стоянки, то производится проверка целесообразности ее использования исходя из условия минимизации эксплуатационных расходов при движении поезда [16, 17, 18]:

$$P_{\text{экс}} = P_{\text{тех}} + P_{\text{пром}} \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

где $P_{\text{тех}}$ – эксплуатационные расходы, связанные с увеличением времени стоянки на технических станциях в случае снятия рассматриваемой нитки, руб.;

$P_{\text{пром}}$ – эксплуатационные расходы, связанные со стоянками поезда на промежуточных станциях участка в случае использования данной нитки, руб.

Проверяется соответствие категории поезда и нитки:

$$k_{\text{нитки}} = k_{\text{поезда}} \quad (3.2)$$

Проверяется условие соответствия количества одновременно простаивающих на технической станции поездов $N_{\text{пр}}$ числу путей $N_{\text{пут}}$, специализированных для их обработки:

$$N_{\text{пр}} \leq N_{\text{пут}} \quad (3.3)$$

Планирование отправления поездов по предлагаемому способу осуществляется только при выполнении условия (3.3). В противном случае поезда планируются на ближайшие свободные нитки графика.

Расчет совокупного эффекта от использования каждой нитки производится по формуле

$$\mathcal{E} = P_{\text{тех}} - P_{\text{пром}} \quad (3.4)$$

При расчете эксплуатационных расходов необходимо выделить две группы основных параметров:

1 Эксплуатационные расходы, связанные со стоянками поезда на промежуточных станциях участка $P_{\text{пром}}$, состоят из совокупности следующих расходов:

- эксплуатационные расходы, связанные со временем нахождения локомотивной бригады на промежуточных станциях участка $P_{\text{лб}}$;
- эксплуатационные расходы, связанные с разгонами и замедлениями поезда на участке (энергетические) $P_{\text{рз}}$;
- эксплуатационные расходы, связанные со временем нахождения поездных локомотивов на промежуточных станциях участка $P_{\text{лок}}$;
- эксплуатационные расходы, связанные с занятием станционных путей промежуточных станций при стоянках $P_{\text{ли}}$;

- эксплуатационные расходы, связанные с затратами электроэнергии во время остановки $P_{\text{э}}$.

2 Эксплуатационные расходы, связанные с увеличением времени стоянки на технических станциях в случае снятия рассматриваемой нитки $P_{\text{тех}}$, состоят из совокупности следующих расходов:

- эксплуатационные расходы, связанные с занятием станционных путей простаивающими поездами $\sum P_{\text{ли}}$;

- эксплуатационные расходы, связанные с простоем локомотивов других поездов, возникающим в результате сдвига ниток $\sum P_{\text{лок}}$;

- эксплуатационные расходы, связанные с потреблением электроэнергии во время стоянки $\sum P_{\text{э}}$ (в зимнее время).

Указанные выше группы расходов определяются по адаптированным в рамках исследования формулам [36]:

$$P_{\text{пром}} = P_{\text{лб}} + P_{\text{рз}} + P_{\text{лок}} + P_{\text{ли}} + P_{\text{э}}, \quad (3.5)$$

$$P_{\text{лб}} = \frac{(\sum t_{\text{с}} + \sum t_{\text{р}} + \sum t_{\text{з}})}{60} \cdot e_{\text{бр}}, \quad (3.6)$$

где $\sum t_{\text{с}}$ – суммарное время стоянок, заложенное ниткой графика, мин;

$\sum t_{\text{р}}$ – суммарное время на разгон на станциях, где предусмотрена остановка поезда, мин;

$\sum t_{\text{з}}$ – суммарное время на замедление на станциях, где предусмотрена остановка поезда, мин;

$e_{\text{бр}}$ – единичная расходная ставка одного бригадо-часа, руб.

Эксплуатационные расходы, связанные со стоянками поезда на промежуточных станциях участка $P_{\text{пром}}$, равны сумме составляющих затрат, перечень которых приведен выше.

Затраты времени локомотивной бригады во время стоянок $P_{\text{лб}}$ равны произведению суммы времени стоянок, разгона, замедления (в минутах) и расходной ставки одного бригадо-часа. Полученный результат делится на 60, так как ставка приведена для бригадо-часа, а время используется в минутах.

$$P_{\text{рз}} = 3,8 \cdot (Q_{\text{лок}} + Q_{\text{бр}}) \cdot V_x^2 \cdot \alpha \cdot 10^{-6} \cdot N_{\text{ост}} \cdot e_3, \quad (3.7)$$

где $Q_{\text{лок}}$ – масса локомотива, т;

$Q_{\text{бр}}$ – масса состава поезда брутто, т;

V_x – ходовая скорость движения поезда, км/ч;

α – норма расхода электроэнергии на один тонно-километр пробега локомотива, принимается равной 3,6 кВт · ч (для электровозов постоянного тока);

$N_{\text{ост}}$ – количество остановок в соответствии с ниткой графика;

e_3 – единичная расходная ставка одного киловатт-часа, руб. [94].

Эксплуатационные расходы, связанные со временем нахождения поездных локомотивов на промежуточных станциях участка $P_{\text{лок}}$ определяются по формуле:

$$P_{\text{лок}} = \frac{(\sum t_c + \sum t_p + \sum t_3)}{60} \cdot e_{\text{лок}}, \quad (3.8)$$

где $e_{\text{лок}}$ – единичная расходная ставка одного часа работы поездного локомотива, руб.

Эксплуатационные расходы, связанные с занятием станционных путей промежуточных станций при стоянках $P_{\text{ли}}$ определяются по формуле:

$$P_{\text{ли}} = \frac{(\sum t_c + \sum t_p + \sum t_3)}{60} \cdot e_{\text{п}} \cdot L_{\text{поезда}}, \quad (3.9)$$

где $e_{\text{п}}$ – единичная расходная ставка одного часа занятия одного километра станционных путей, руб.;

$L_{\text{поезда}}$ – длина поезда, км (в работе принята равной 1 км, что соответствует унифицированной длине, установленной на Западно-Сибирской железной дороге, в 71 условный вагон).

Эксплуатационные расходы, связанные с затратами электроэнергии во время остановки P_3 определяются по формуле:

$$P_3 = e_3 \cdot \sum t_c \cdot \frac{H_{\text{пр}}}{60}, \quad (3.10)$$

где $H_{\text{пр}}$ – норма расхода электроэнергии на один час простоя, кВт · ч (принимается равной 124,8 кВт · ч) [94].

По формуле (3.9) расходы электроэнергии во время стоянки являются произведением стоимости единицы электроэнергии, времени стоянки и нормы расхода электроэнергии в единицу времени. Коэффициент 60 используется для приведения к единому измерителю времени стоянки, так как оно используется в минутах.

Эксплуатационные расходы, связанные с увеличением времени стоянки на технических станциях в случае снятия рассматриваемой нитки $P_{\text{тех}}$ определяются по формуле:

$$P_{\text{тех}} = \sum P_{\text{ли}} + \sum P_{\text{лок}} + \sum P_{\text{э}}. \quad (3.11)$$

Эксплуатационные расходы, связанные с занятием станционных путей простаивающими поездами $\sum P_{\text{ли}}$ определяются по формуле:

$$\sum P_{\text{ли}} = \frac{\sum_{N=1}^n t_N}{60} \cdot e_{\text{п}}, \quad (3.12)$$

где n – число поездов, простаивающих сверх нормативного времени, в ожидании нитки, или число используемых подряд ниток до первой свободной;

t_N – время сверхнормативного простоя N -го поезда, определяемого по графику движения поездов, мин.

Если совокупный эффект от использования нитки \mathcal{E} (см. формулу (3.4)) примет отрицательное значение, то рассматриваемая нитка не должна использоваться в планировании. В противном случае нитка признается эффективной для использования и для нее подбирается поезд из возможных претендентов, что представляет собой выбор варианта с таким порядком отправления поездов, при котором достигаются наименьшие эксплуатационные расходы.

Для определения числа возможных вариантов порядка отправления поездов принята базовая формула комбинаторики, определяющая число размещений из n элементов по m [45]:

$$A_n^m = n \cdot (n-1) \cdot (n-2) \cdot \dots \cdot (n-m+1). \quad (3.13)$$

Математические обозначения n и m соответствуют поездам и ниткам графика. Задача – вычислить число размещений из n поездов по m ниткам графика.

Формула (3.13) была изменена автором с учетом особенности объекта исследования. Количество поездов, которое может быть распределено между нитками графика, – переменная величина, которая может иметь различные значения для разных ниток.

Число возможных вариантов порядка отправления поездов N определяется по формуле

$$A_n^m = n_1 \cdot (n_2 - 1) \cdot (n_3 - 2) \cdot \dots \cdot (n_m - (m - 1)), \quad (3.14)$$

где n_m – количество поездов-претендентов на 1-ю, 2-ю, m -ю нитку, при этом всегда выполняется условие $n_m \leq n_{m+1}$;

m – количество рассматриваемых ниток графика.

Для каждого варианта определяются эксплуатационные расходы $P_{\text{экс}}$ по формуле

$$P_{\text{экс}} = \sum_{l=1}^p P_{\text{пром.}l}, \quad (3.15)$$

где $P_{\text{пром.}l}$ – эксплуатационные расходы, связанные со стоянками поездов на промежуточных станциях участка для нитки графика при условно выбранном поезде, руб.;

l – порядковый номер нитки, начиная с планируемой.

При выборе варианта с наименьшими эксплуатационными расходами на рассматриваемую нитку планируется поезд, соответствующий данному варианту, после чего рассматривается следующая нитка и цикл начинается заново.

Для достижения наиболее рационального способа использования заложенных нормативным графиком движения ниток, а также, соответственно, и пропускной способности участка в процессе планирования, необходимо решить две задачи:

1) определить целесообразность использования нитки (исходя из актуальных на текущий момент времени размеров подвода поездов);

2) найти наиболее рациональный вариант распределения поездов между нитками графика.

Для решения первой задачи производится сравнение эксплуатационных расходов, связанных с использованием рассматриваемой нитки, с расходами, образующимися в результате ее снятия.

Решение второй задачи заключается в расчете и последующем анализе эксплуатационных расходов, связанных с использованием рассматриваемой нитки каждым из возможных поездов-претендентов. После чего производится сравнение полученных результатов расчетов и выбор варианта распределения по критерию минимизации эксплуатационных расходов.

Реализация обозначенных идей сопряжена с большим объемом расчетов, произвести которые не представляется возможным силами дежурно-диспетчерского персонала, занимающегося планированием поездной работы. При распределении поездов необходимо руководствоваться точной логической цепочкой последовательности действий. Наиболее эффективным способом для этого является построение алгоритма, логика которого будет отвечать требуемым условиям [13].

На рисунках 3.6, 3.7 представлены алгоритмы, отвечающие за определение целесообразности использования нитки и поиск наиболее рационального варианта распределения поездов между нитками графика. С помощью этих алгоритмов подбирается набор поездов одной категории, которые могут быть отправлены на данную нитку графика.

Для определения целесообразности использования нитки и поезда, который будет на нее назначен, производится расчет по алгоритму, представленному на рисунке 3.6.

Если нитка имеет остановки на участке, то проверяется целесообразность ее использования. Расчет проводится для самого легкого с точки зрения массы поезда среди возможных поездов-претендентов для данной нитки. Это обусловлено существованием линейной прямо пропорциональной зависимости эксплуатационных расходов, связанных с остановкой поезда от его массы. Расчет расходов от увеличения сверхнормативного простоя поездов на технической станции в результате сдвига ниток при снятии рассматриваемой нитки производится для количества по-

ездов, равного k . Здесь k – порядковый номер первой нитки (после рассматриваемой), на которую нет поездов-претендентов, при условии использования всех предшествующих ниток.

Если в результате расчета расходы $P_{\text{тех}}$ превысят $P_{\text{пром}}$, то данная нитка не будет использоваться. В противном случае нитка признается эффективной для использования, после чего в процессе планирования наступает переход к следующему шагу – подбору для нитки из возможных претендентов поезда, пропуск по ней которого позволит минимизировать эксплуатационные расходы при использовании нитки, т. е. использованию наиболее рационального варианта распределения поездов между нитками графика. Данный процесс описан алгоритмом, приведенным на рисунке 3.7.

Планирование отправления поездов осуществляется после получения набора ниток, пригодных для использования. Распределение поездов выполняется исходя из следующего принципа: наиболее тяжелые поезда назначаются на нитки с наименьшими эксплуатационными расходами на разгон и замедление. Зависимость эффективности использования нитки от массы поезда была доказана в работах [61, 62]. Планирование начинается не с первой по порядку нитки, а с нитки, обладающей наиболее высокими эксплуатационными расходами (наибольшим числом стоянок) среди рассматриваемых.

В соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3.3, определяется число поездов-претендентов на первую свободную нитку n . После чего, согласно алгоритму, изображенному на рисунке 3.6, выполняется следующая цепочка действий:

1 Рассчитываются эксплуатационные расходы, возникающие при использовании каждой из n нитки каждым из n поездов по формуле $P_{\text{экс.}j} = \sum_{l=1}^n P_{\text{пром.}j}$.

2 Производится сортировка полученных вариантов по возрастанию значения эксплуатационных расходов: $P_{\text{экс}} = \min (P_{\text{экс.}1}, \dots, P_{\text{экс.}i}, \dots, P_{\text{экс.}j})$.

3 Рассматривается первый по порядку вариант распределения $P_{\text{экс.}i}$.

4 Проверяется условие соответствия максимальной категории поезда для первой по порядку нитки: $k_i = \max(k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_j)$. При невыполнении условия рассматривается следующий вариант распределения.

5 Проверяется соответствие количества отправляемых подряд длинносоставных (d_i), разборочных (s_i) и транзитных (g_i) поездов заданным параметрам $(d_i, s_i, g_i) = (d_{\text{норм}}, s_{\text{норм}}, g_{\text{норм}})$. При невыполнении условия рассматривается следующий вариант распределения.

6 При выполнении всех условий рассмотренный вариант распределения поездов принимается и на первую нитку назначается поезд согласно данному варианту $i \Rightarrow l$.

В предложенном алгоритме не учитываются возможные ограничения по следующей технической станции, на которую планируется отправлять поезда, например, такие как плановые «окна». Такие факты не рассматриваются в рамках работы, потому что разработанный способ планирования использует существующий график движения, учитывающий плановые работы на инфраструктуре. Соответственно, исключена ситуация отправления большего количества поездов, чем предусмотрено действующим графиком.

На основе приведенных в текущем разделе алгоритмов и принципов планирования автором на ЭВМ создана математическая модель (программа) для тестирования порядка отправления поездов по разработанному способу. Программа обеспечивает генерирование случайного подхода поездов или получение информации о подходе из системы ГИД «Урал ВНИИЖТ». Авторской вычислительной системой осуществляется формирование нормативного графика в рамках восьмичасового периода на участке из пяти станций для различного количества пассажирских поездов (четыре, шесть, восемь). По команде пользователя осуществляется распределение поездов между нитками графика и расчет эксплуатационных расходов, возникающих до и после применения авторского способа планирования. На рисунках 3.8 и 3.9 приведены примеры распределения поездов между нитками графика на базе разработанной программы.

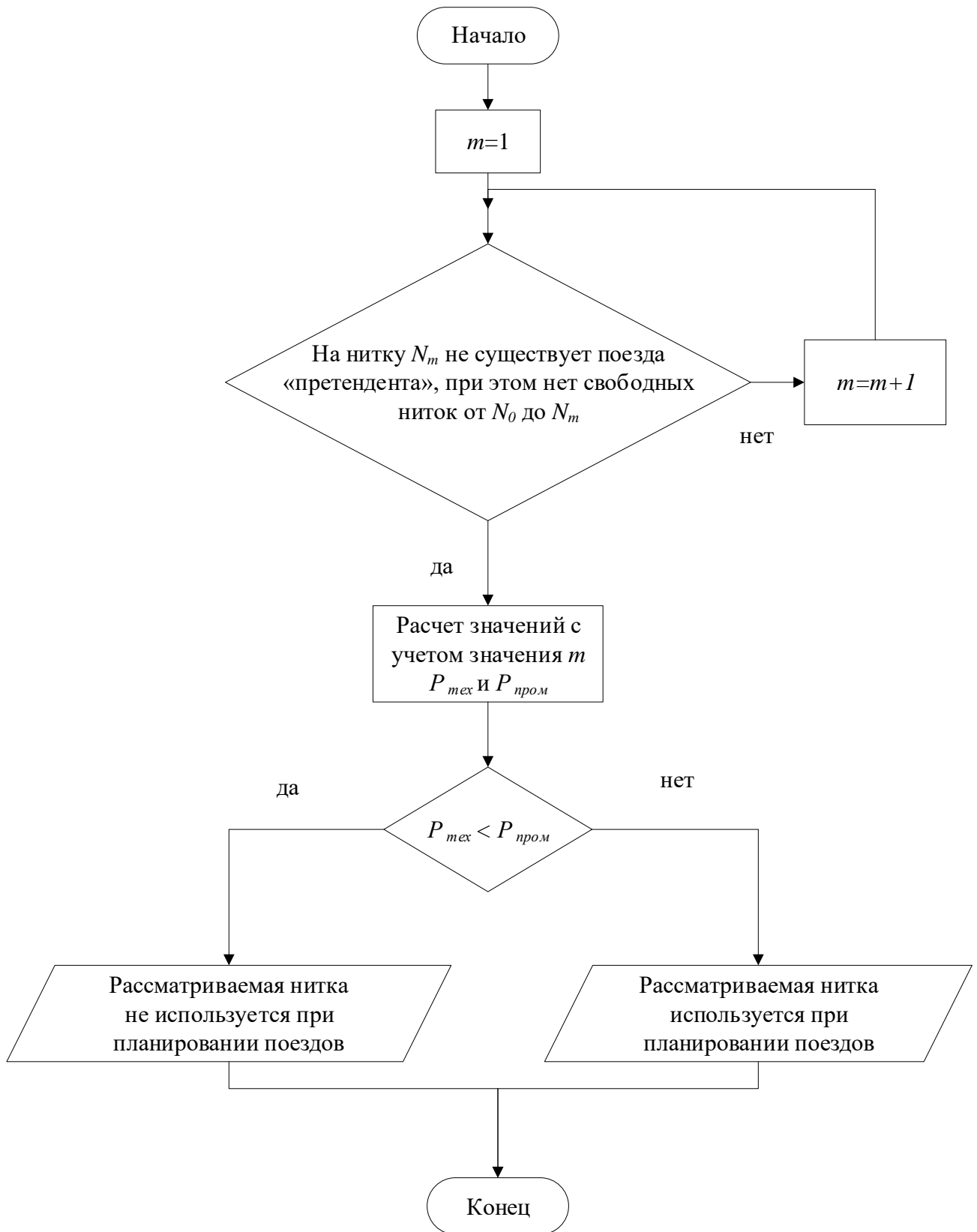


Рисунок 3.6 – Алгоритм определения целесообразности использования нитки

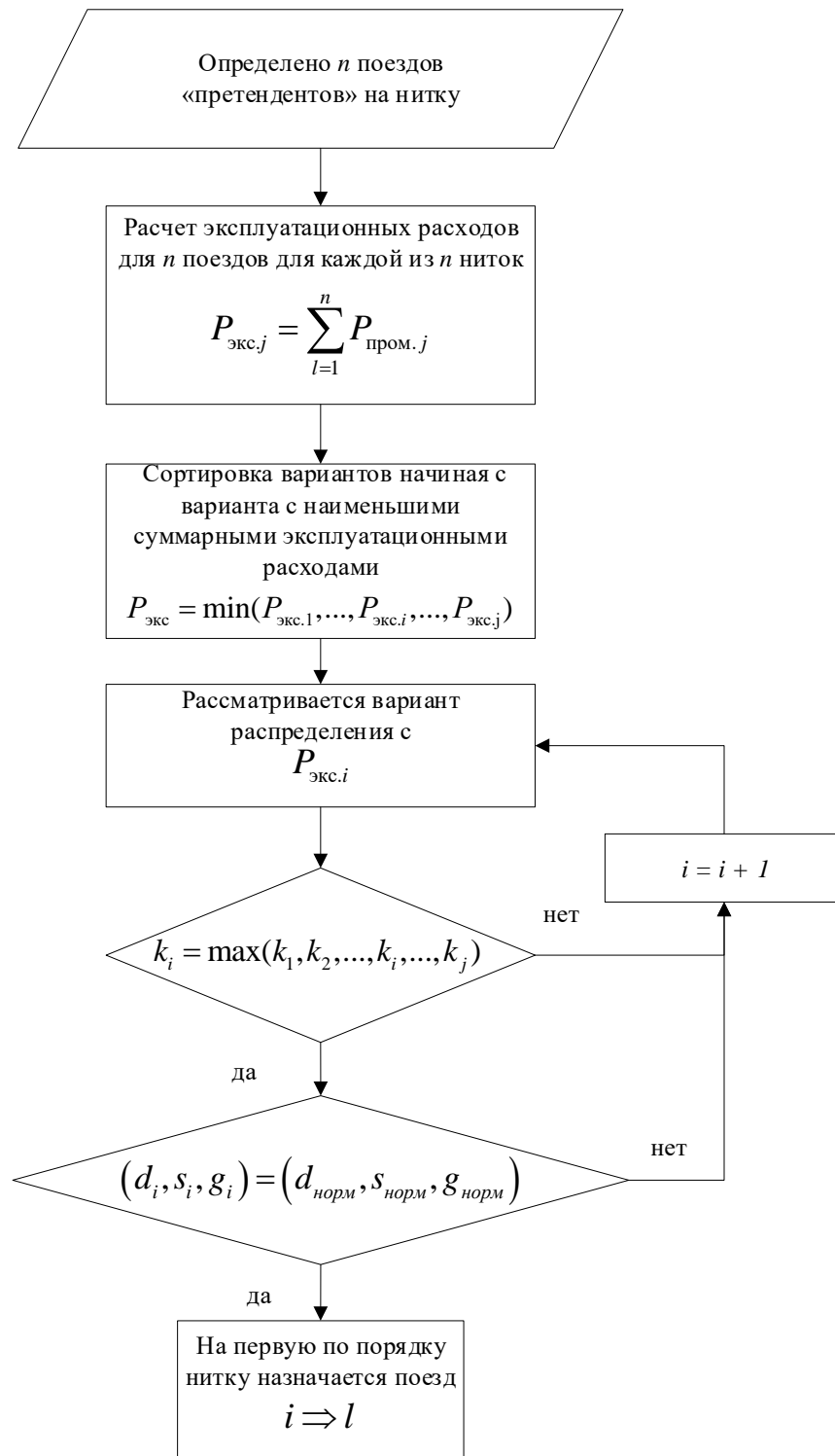


Рисунок 3.7 – Алгоритм выбора рационального варианта распределения поездов между ниток графика

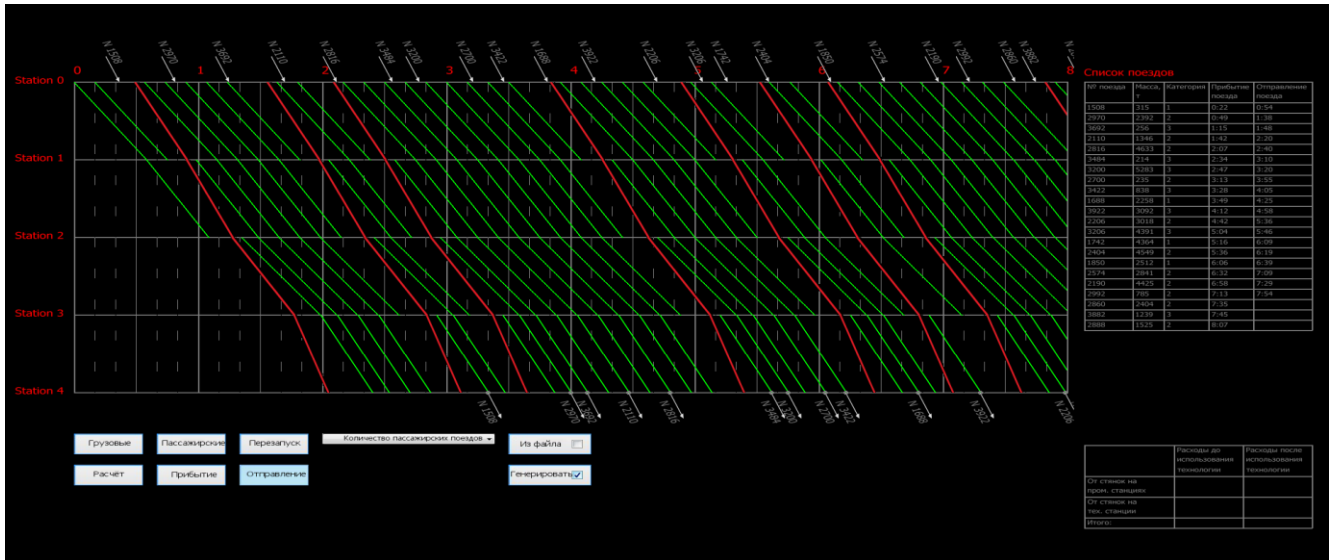


Рисунок 3.8 – График движения поездов при традиционном способе планирования отправления

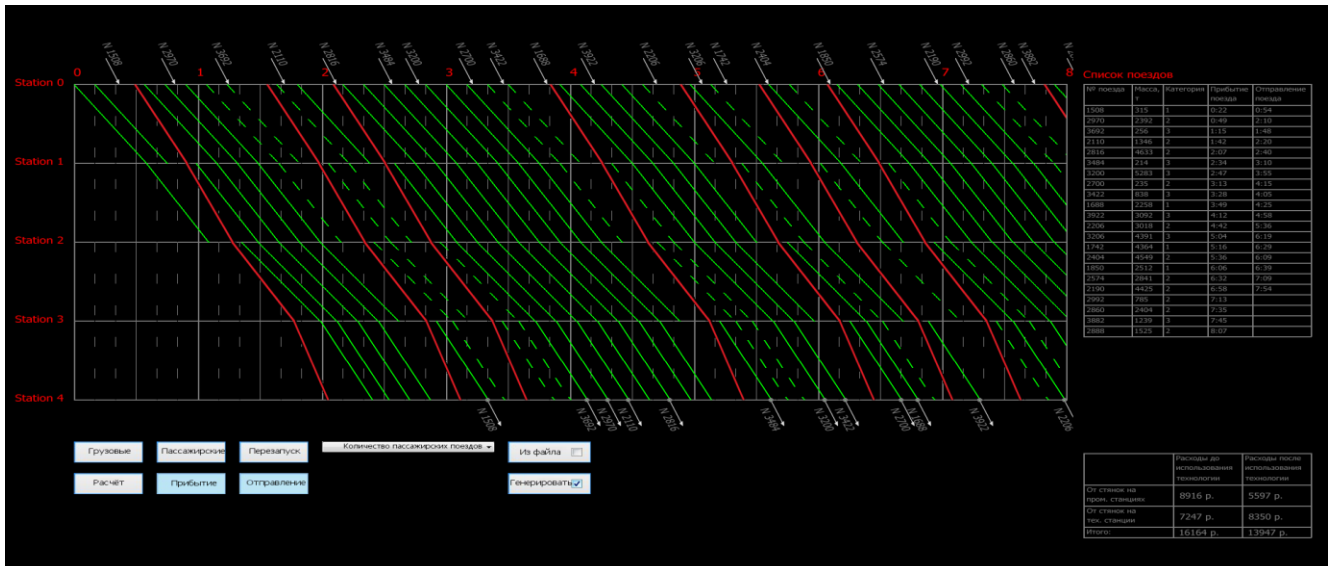


Рисунок 3.9 – График движения поездов при применении предложенного способа рационального использования ниток графика

На рисунках 3.8, 3.9 красными линиями показаны нитки пассажирских поездов, зелеными линиями – нитки грузовых поездов. На рисунке 3.9 зеленые штриховые линии соответствуют ниткам графика, которые были признаны нецелесообразными для использования на основании проведенных программой расчетов. В результате использования разработанного способа планирования в смоделированном восьмичасовом интервале времени было исключено использование двух неэф-

фективных ниток графика и, как следствие, сокращено общее количество остановок на участке на две единицы. При традиционном способе планирования отправления поездов эксплуатационные расходы составили 16,2 тыс. руб., при применении предлагаемого порядка рационального использования ниток – 13,9 тыс. руб. Сокращение расходов составило 2,2 тыс. руб. за восемь часов, что соответствует 6,7 тыс. руб. / сут. для рассматриваемого при моделировании участка.

Кроме возникающих эксплуатационных затрат, при отправлении поездов по предложенному способу планирования необходимо учитывать количество приемо-отправочных путей технических станций. Нельзя допустить возникновение ситуации, при которой станция останавливается «по неприему». Для этого в процессе планирования необходимо всегда проверять соответствие количества одновременно простаивающих поездов и специализированных для их приема путей. В случае невыполнения данного условия отправление поездов планируется с учетом использования необходимого количества ниток графика, применение которых было признано нецелесообразным.

Сфера применения разработанного способа планирования ограничивается двухпутными участками. Данное ограничение связано прежде всего с наличием резервов пропускной способности на таких участках, что было установлено в результате анализа, приведенного во второй главе (см. п. 2.2). На однопутных участках из-за их невысокой пропускной способности использование рационального порядка отправления поездов не представляется возможным. Даже при условии средних размеров движения поездов на рассматриваемом направлении эффект от применения не будет большим ввиду наличия остановок на промежуточных станциях под скрещение.

Предложенный способ планирования отправления грузовых поездов имеет общие признаки с мерами по диспетчерскому регулированию, представленными в Интегрированной технологии (см. п. 1.4) [70], а также алгоритмами оперативного управления из исследования А. Ф. Бородина [25] – все предложения направлены на сокращение эксплуатационных расходов за счет уменьшения количества остановок на участке железной дороги. Однако ряд отличий указывает, что представленные

способы планирования отправления поездов используют различные принципы. В таблице 3.2 представлена сравнительная характеристика указанных методов.

Таблица 3.2 – Сравнительная характеристика авторского способа планирования отправления грузовых поездов и методов диспетчерского регулирования, разработанных в рамках Интегрированной технологии

Принципы планирования	Авторский способ	Интегрированная технология	Алгоритмы оперативного управления
1	2	3	4
Использование на двухпутных участках	Да	Да	Да
Использование на однопутных участках	Нет	Да	Да
Для уменьшения числа остановок изменяется график	Нет	Да	Нет
Для уменьшения числа остановок изменяется порядок использования ниток графика	Да	Нет	Да
Поезд наибольшей массы и длины имеет приоритет при планировании на нитки с любым количеством остановок	Нет	Да	Да
Приоритет устанавливается заранее	Да	Да	Да
При сравнении расходов, связанных с простоем поездов в ожидании нитки графика, используется одна впередилежащая нитка	Нет	Нет	Да
При сравнении расходов, связанных с простоем поездов в ожидании нитки графика, используется количество ниток, равное числу потенциально готовых к отправлению поездов	Да	Нет	Нет
Учитываются сроки доставки	Нет	Нет	Да
Используются разработанные графики определения эксплуатационных расходов	Да	Нет	Нет
Уменьшается число остановок	Да	Да	Да

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4
Обеспечивается беспрепятственный прием поездов станциями и соседними подразделениями	Да	Да	Да
Выполняется расчет уменьшения эксплуатационных расходов	Да	Нет	Да

3.2.2 Валидация разработанной программы расчета рационального распределения поездов

Валидация созданной модели необходима для проверки достоверности ее работы. Валидация проведена прямым способом, т. е. полученные в результате моделирования значения Y сравнены с экспериментальными данными фактического объекта X . Валидация прямым способом в рамках данного исследования проведена для такого показателя, характеризующего эффективность предложенного способа планирования, как время простоя вагонов без переработки на технической станции. Для валидации программы прямым способом были использованы реальные значения простоев поездов (см. таблицу 2.6) по станции Барабинск за декабрь 2020 г. (после корректировки на величину непроизводительных потерь от отказов технических средств и технологических нарушений). Графики зависимостей времени простоя от степени заполняемости графика для реальной и моделируемой ситуаций представлены на рисунке 3.10.

Валидация разработанной программы проведена с помощью использования двух методов [44]:

- расчета коэффициента корреляции Пирсона;
- определения t -критерия Стьюдента.

Для расчета использовались формулы (2.11)–(2.15). Расчет выполнен в таблице 3.3.

В результате расчета получено значение коэффициента корреляции Пирсона r_{XY} , равное 0,657, что свидетельствует (согласно таблице Чеддока [44]) о заметной степени корреляции между рассмотренными графиками.

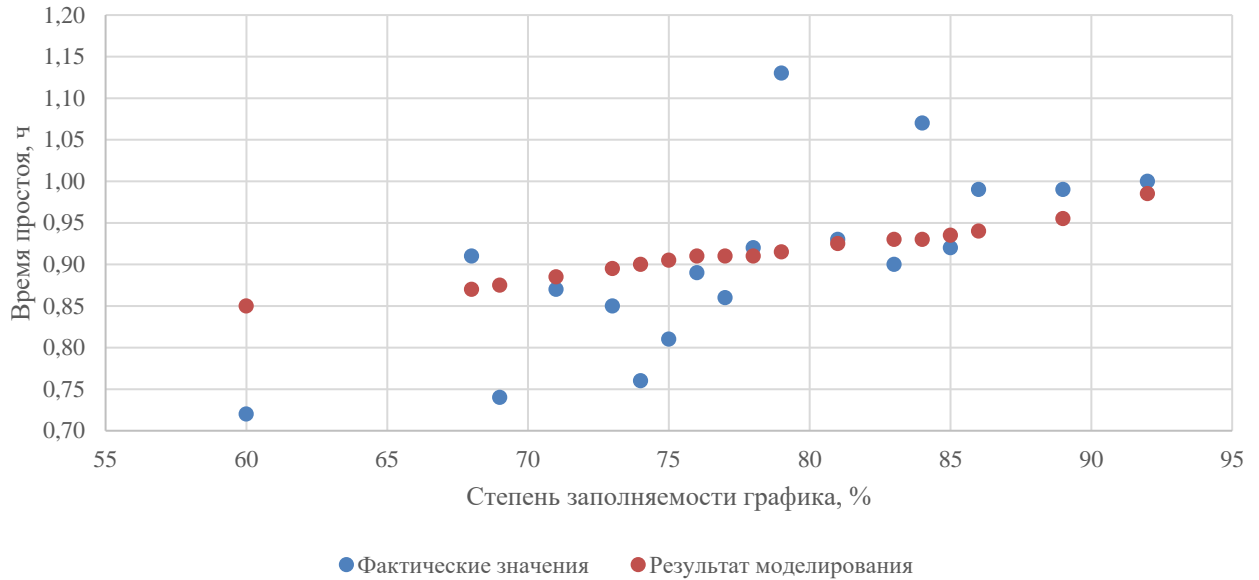


Рисунок 3.10 – Графики зависимости времени простоя от степени за­полняе­мости гра­фика

Таблица 3.3 – Валидация разработанной программы расчета рационального распределения поездов прямым способом

Номер ис- пытания	Степень за­полняе­ мости, %	X	Y	$(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})$	$(X - \bar{X})^2$	$(Y - \bar{Y})^2$
1	2	3	4	5	6	7
1	60	0,720	0,850	0,011	0,034	0,004
2	68	0,910	0,870	0,000	0,000	0,002
3	69	0,740	0,875	0,006	0,027	0,001
4	71	0,870	0,885	0,001	0,001	0,001
5	73	0,850	0,895	0,001	0,003	0,000
6	74	0,760	0,900	0,002	0,021	0,000
7	75	0,810	0,905	0,001	0,009	0,000
8	76	0,890	0,910	0,000	0,000	0,000
9	77	0,860	0,910	0,000	0,002	0,000
10	78	0,920	0,910	0,000	0,000	0,000
11	79	1,130	0,915	0,001	0,051	0,000

Продолжение таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6	7
12	81	0,930	0,925	0,000	0,001	0,000
13	83	0,900	0,930	0,000	0,000	0,000
14	84	1,070	0,930	0,003	0,028	0,000
15	85	0,920	0,935	0,000	0,000	0,001
16	86	0,990	0,940	0,002	0,008	0,001
17	89	0,990	0,955	0,004	0,008	0,002
18	92	1,000	0,985	0,007	0,009	0,005
Σ				0,039	0,200	0,018
r_{xy}				0,657		

В результате расчета (см. таблицу 3.2) получены значения $\bar{X} = 0,903$, $\bar{Y} = 0,913$, t -критерий Стьюдента $t = 0,34$. Число степеней свободы $f = 34$. Произведено сравнение полученного значения t -критерия Стьюдента 0,34 с критическим при $p = 0,05$ значением, указанным в [44]: 2,032. Так как рассчитанное значение критерия меньше критического, сделан вывод о том, что наблюдаемые различия статистически не значимы.

На основании полученных данных сделан вывод об успешной валидации разработанной программы расчета рационального распределения поездов.

3.2.3 Практическое применение способа рационального планирования отправления грузовых поездов без использования автоматизации планирования

Представленные выше алгоритмы сопряжены с целым рядом громоздких расчетов, в том числе с перебором большого числа вариантов распределения поездов между нитками графика, что является сложной задачей для оперативного персонала. В целях повышения потенциала практического применения предложенного

способа планирования представлено решение, упрощающее процесс использования методики эффективного использования ниток графика и исключающее большой объем расчетов и вычислений.

Так, первый этап планирования отправления поездов – рассмотрение целесообразности использования нитки – можно в общем случае рассчитать заранее, и результат представить пользователю в графическом виде. Задача по исключению непригодных ниток сводится к определению с помощью имеющегося графика и небольшого числа данных, характеризующих поездную обстановку, эксплуатационных расходов, возникающих при использовании нитки.

Формулы, используемые для расчета $P_{\text{тех}}$ и $P_{\text{пром}}$, являются линейными функциями $P(t)$. В случае $P_{\text{тех}}$ единственной переменной, от которой зависит значение функции, является суммарное время простоя поездов в ожидании нитки графика на технической станции $t_{\text{тех}}$, которое определяется по формуле [19]

$$t_{\text{тех}} = \sum_{N=1}^n t_N. \quad (3.16)$$

В случае построения графика для функции, описывающей $P_{\text{пром}}$, количество влияющих факторов увеличивается, однако и в данной ситуации возможно представить линейную функцию (а точнее, несколько функций) с переменной $t_{\text{пром}}$, являющейся совокупностью времени стоянок поездов на промежуточных станциях и времени на разгон и замедление. Для функции $P_{\text{пром}}(t_{\text{пром}})$ существуют еще два переменных параметра. Это масса поезда $Q_{\text{п}}$, равная сумме $Q_{\text{лок}}$ и $Q_{\text{бр}}$, и количество стоянок, заложенное ниткой графика $N_{\text{ост}}$. Для графического изображения масса поезда выбрана в интервале от 200 до 6200 т с шагом в 1000 т. Каждый шаг изображен в виде отдельной функции на одном графике. Функции имеют обозначения от P_0 до P_6 и соответствуют массам поездов: P_0 – 200 т, P_1 – 1200 т, P_2 – 2200 т, P_3 – 3200 т, P_4 – 4200 т, P_5 – 5200 т, P_6 – 6200 т. Количество остановок принято от одной до четырех (использование большего числа остановок на практике, как правило, нецелесообразно). Для каждого $N_{\text{ост}}$ построен отдельный график.

Графики функций $P_{\text{тех}}$ и $P_{\text{пром}}$, в зависимости от числа остановок $N_{\text{ост}}$, изображены на рисунках 3.11–3.14.

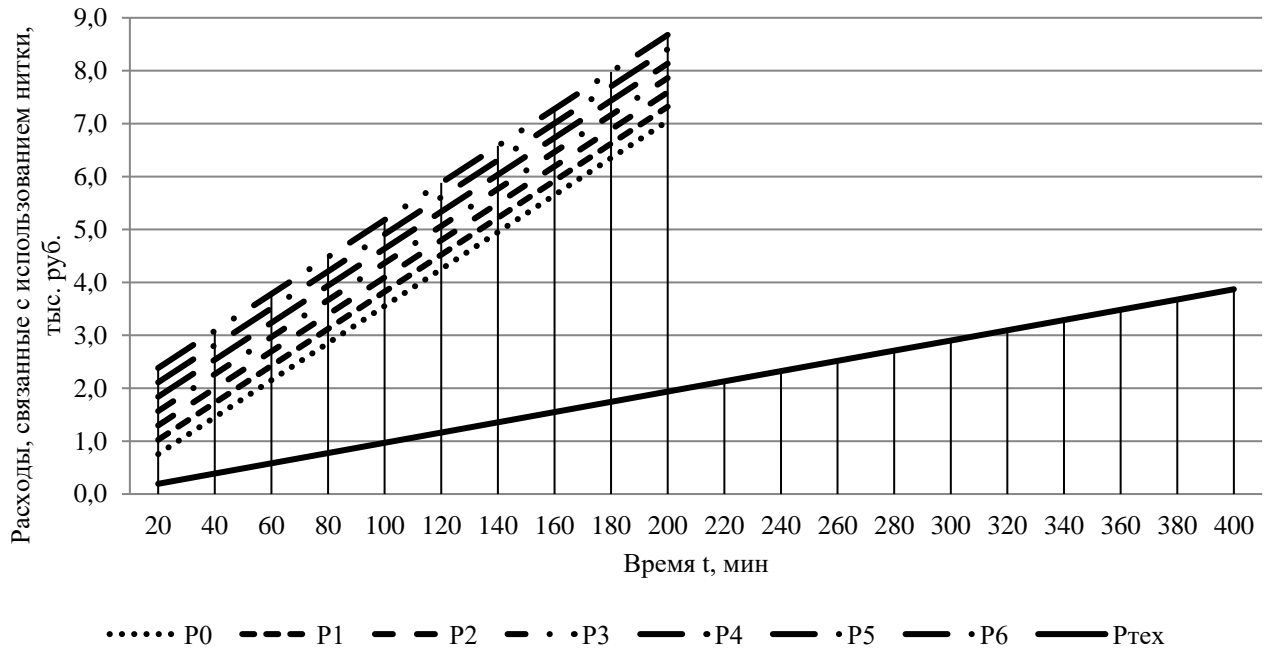


Рисунок 3.11 – График распределения расходов, связанных с использованием нитки и возникающих в результате ее исключения, при количестве остановок, равном единице

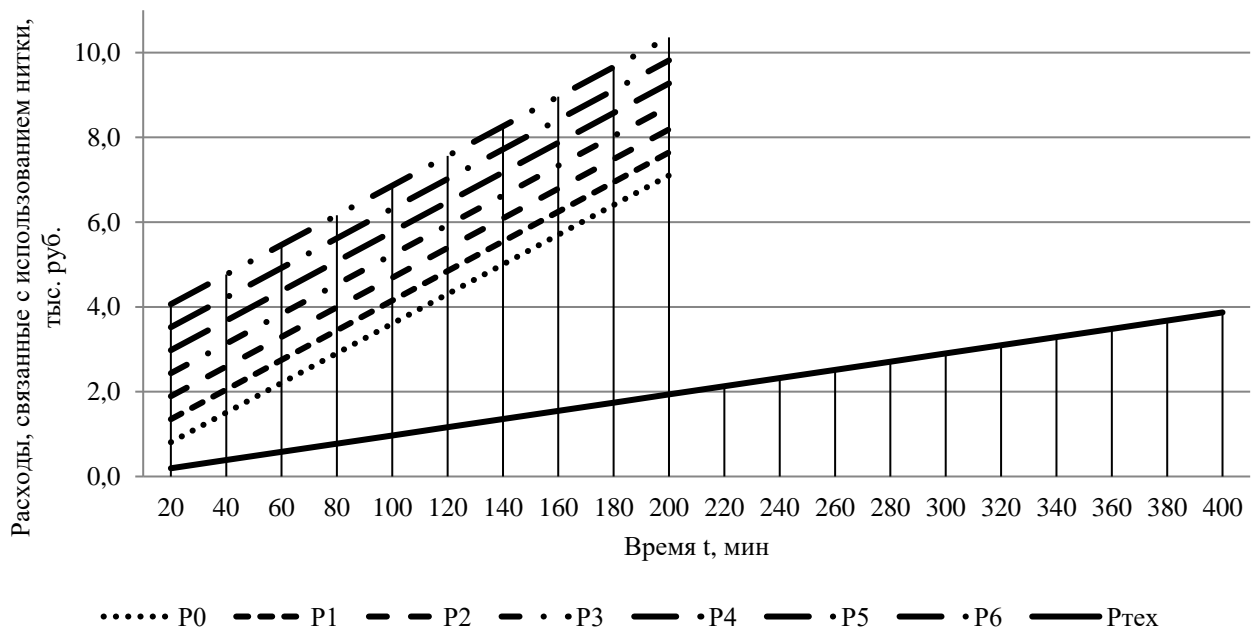


Рисунок 3.12 – График распределения расходов, связанных с использованием нитки и возникающих в результате ее исключения, при количестве остановок, равном двум

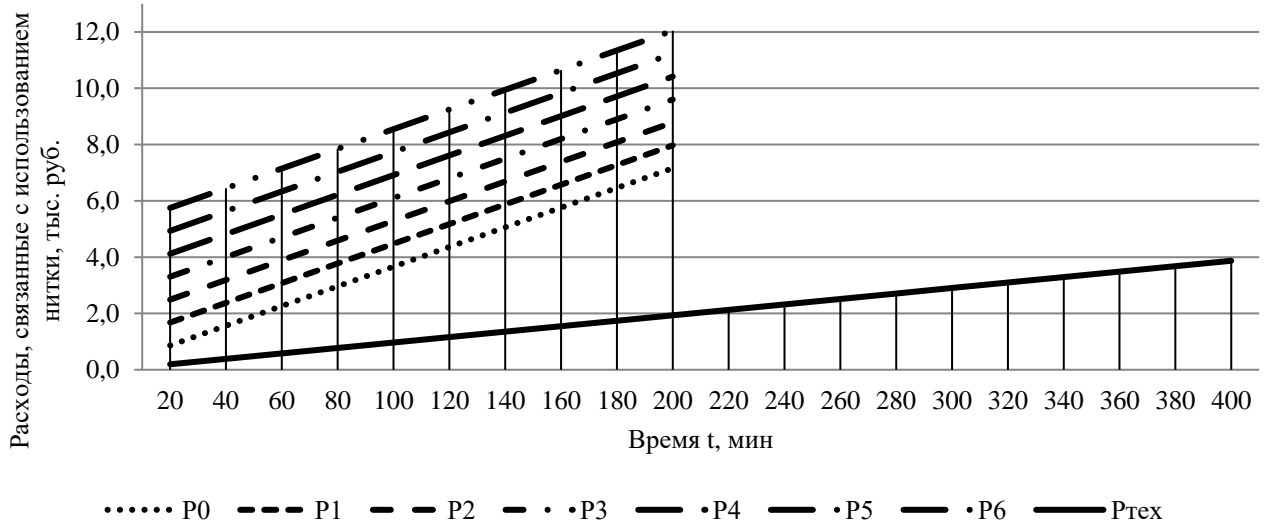


Рисунок 3.13 – График распределения расходов, связанных с использованием нитки и возникающих в результате ее исключения, при количестве остановок, равном трем

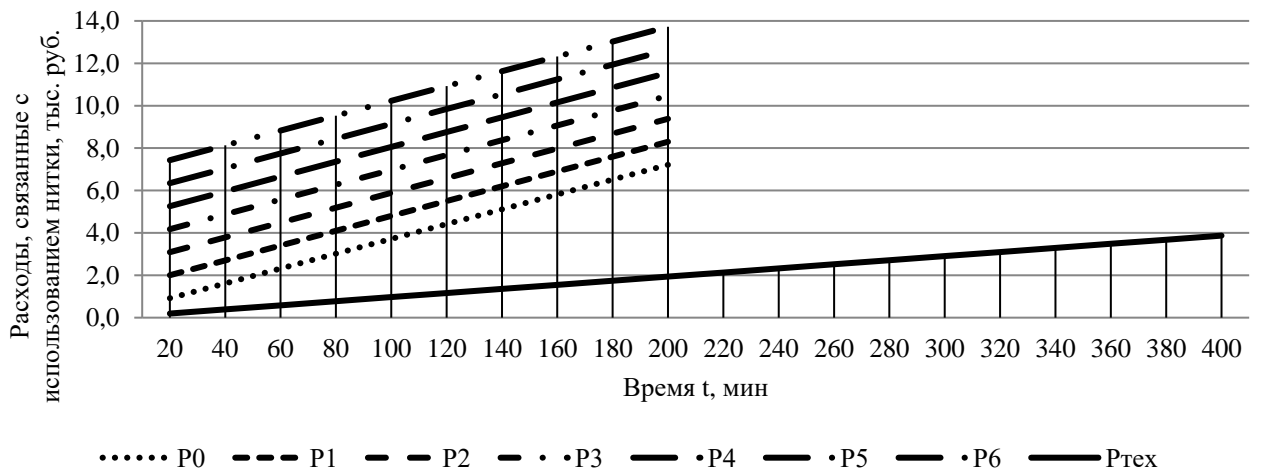


Рисунок 3.14 – График распределения расходов, связанных с использованием нитки и возникающих в результате ее исключения, при количестве остановок, равном четырем

Практическое применение изображенных графиков заключается в последовательном выполнении представленных ниже операций. Для определения целесообразности использования нитки необходимо:

- 1) отложить горизонтальную проекцию функции $P_{\text{тех}}$ для заданного значения t_i на ось ординат;

2) отложить горизонтальную проекцию функции $P_{\text{пром}}$, соответствующей массе рассматриваемого поезда ($P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$), для заданного значения времени стоянки, на промежуточных станциях на ось ординат;

3) сравнить расположение полученных проекций.

4) определить целесообразность использования нитки: если проекция на ось ординат функции $P_{\text{пром}}$ расположена на графике ниже проекции функции $P_{\text{тех}}$, то нитка является целесообразной.

Пример

Определим целесообразность использования нитки графика с тремя остановками, суммарным временем остановок, равным 115 мин, для поезда массой 4200 т. В случае неиспользования нитки суммарный простой поездов на технической станции в ожидании следующей нитки составит 360 мин.

На рисунке 3.15 отображен процесс определения целесообразности использования нитки. Проложив горизонтальные прямые в точках, соответствующих значениям функций $P_{\text{тех}}$ (для 360 мин) и P_4 (для 115 мин), видно, что проекция на ось ординат функции $P_{\text{тех}}$ расположена ниже, чем у функции P_4 . Условие, обозначенное выше в п. 4 перечня, не выполняется. Из этого следует вывод: использование рассматриваемой нитки графика не является целесообразным для заданного условием задачи поезда, а значит, не будет использоваться при планировании отправления поездов. Целесообразность использования данной нитки была бы возможна при условии расположения проекции функции $P_{\text{тех}}$ выше проекции функции P_4 .

Из графиков, приведенных на рисунках 3.11–3.14, видно, что для большинства поездов, как правило, нецелесообразно использовать нитки с числом остановок три и более. Данный факт обусловлен большими издержками, возникающими из-за остановок на участке. Использование таких ниток целесообразно для поезда массой 1000 т, только если отказ от них приведет к увеличению суммарного простоя поездов на технической станции на время, превышающее 180 мин. Для более тяжелых поездов возможность использования ниток появляется в случае возникновения простоя на технической станции, превышающего 220 мин. Нитки с четырьмя

остановками можно использовать только для легковесных поездов, что подтверждается разработанными графиками.

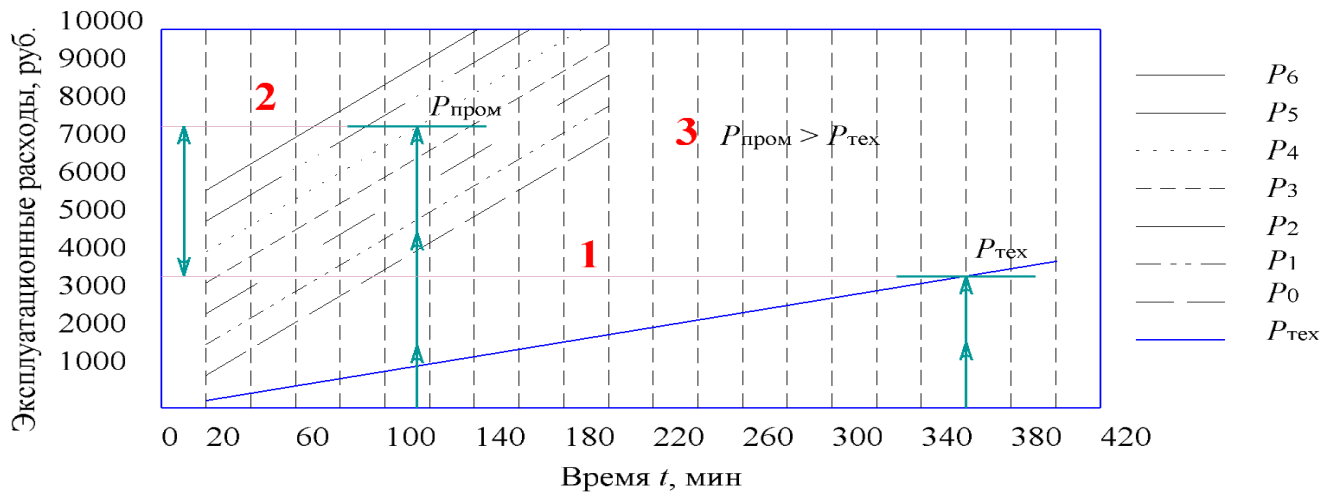


Рисунок 3.15 – Пример графического определения целесообразности использования нитки графика

После определения целесообразности использования нитки графика становится возможным выбрать наиболее рациональный вариант распределения поездов между имеющимися заранее определенными нитками. Нецелесообразные нитки при этом не используются.

Эксплуатационные расходы при различных вариантах пропуска n поездов по n ниткам будут отличаться на величины, которые зависят от массы поезда и числа остановок, заложенного ниткой графика. Расходы, которые зависят от времени остановок, заложенного ниткой графика (использование локомотивов, бригад, инфраструктурная составляющая), будут одинаковы для всех поездов. Расходы от использования нитки графика $P_{пром}$ условно представлены в виде линейной функции $f(Q) = NQ$, где N – количество остановок, заложенное ниткой графика, соответствующее $N_{ост}$; Q – масса назначаемого на нитку поезда, т, соответствующая $Q_{п.}$

Необходимо найти такое распределение значений $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ и $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$, чтобы $\sum_{i=1}^n N_i Q_i \rightarrow \min$, где i – порядковый номер нитки графика и поезда, упорядоченных с условием возрастания количества остановок (для нитки) и массы (для поезда); n – число рассматриваемых ниток/поездов. Возможна ситуация, в которой будет несколько ниток с одинаковым количеством остановок и несколько

поездов с одинаковой массой (что намного реже). В данном случае порядок расположения ниток/поездов будет зависеть от временных параметров, т. е. меньшими порядковыми номерами будут обладать нитки/поезда, имеющие меньшее время отправления/прибытия.

Данная задача является классическим транс-неравенством, с известным решением [60]. Сумма $N_i Q_i$ примет минимально возможное значение при следующем варианте распределения:

$$\sum_{i=1}^n N_i Q_i = N_1 Q_n + N_2 Q_{n-1} + N_3 Q_{n-2} + \dots + N_{n-1} Q_2 + N_n Q_1. \quad (3.17)$$

Оптимальным вариантом распределения поездов между нитками графика будет являться вариант, при котором соблюдается правило: поезда, обладающие наибольшей массой, должны назначаться на нитки с наименьшим числом остановок.

Используя данное правило, перебор вариантов сводится лишь к учету приоритетности и времени прибытия поезда, тогда как вопрос громоздких расчетов отпадает за ненадобностью.

Рассмотрен пример распределения для заданных параметров N и Q (количество остановок и масса поездов соответственно): $N_1 = 1$, $N_2 = 2$, $N_3 = 3$, $N_4 = 4$, $Q_1 = 3,2$ тыс. т, $Q_2 = 4,2$ тыс. т, $Q_3 = 5,2$ тыс. т, $Q_4 = 6,2$ тыс. т.

$\sum_{i=1}^4 N_i Q_i = 42$ принимает наименьшее значение при варианте распределения $N_1 Q_4 + N_2 Q_3 + N_3 Q_2 + N_4 Q_1$.

Практический пример подтверждает ранее выдвинутый тезис о минимизации затрат при таком варианте распределения поездов между нитками графика, при котором поезда, обладающие наибольшей массой, назначаются на нитки с наименьшим количеством остановок.

В результате проделанной работы предложен порядок оптимального использования ниток графика. Смоделирован процесс планирования поездной работы, каждый подпроцесс описан алгоритмом, использующим простейшие логические и математические функции. В совокупности все представленные в главе алгоритмы

образуют способ рационального планирования отправления поездов по техническим станциям, ограничивающим двухпутные участки, в основе которого лежит порядок эффективного использования ниток графика.

Предложенные алгоритмы позволяют передать функции планирования отправления поездов от дежурно-диспетчерского персонала станций ЭВМ. Это позволяет снизить нагрузку на человека и уменьшить влияние человеческого фактора на производственный процесс. Снижение уровня загруженности на дежурно-диспетчерский персонал окажет самое позитивное влияние на повышение уровня безопасности движения поездов. Кроме того, предложенный способ планирования позволит сократить эксплуатационные расходы, связанные с пропуском поездов по ниткам графика.

Реализация предложенного решения потребует затрат на разработку и приобретение программного продукта. Существует возможность использования выдвинутых принципов планирования силами дежурно-диспетчерского персонала, в том числе с помощью применения разработанных диаграмм (см. рисунки 3.11–3.14), однако практически это сопряжено с увеличением загрузки человека. Кроме того, при ручном использовании предложенного способа планирования отправления поездов не будет обеспечена абсолютная точность расчетов и решений, а соответственно, снизится эффективность планирования.

Описанные в работе принципы и алгоритмы организации движения поездов дают возможность дальнейшего воплощения разработанного способа планирования в виде программного продукта. Становится возможным уменьшение влияния человеческого фактора на процесс организации движения поездов, т. е. сокращение возможного числа ошибок.

3.2.4 Влияние применения способа рационального планирования отправления поездов на перевозочный процесс в рамках полигона

Рассмотрен процесс влияния предложенного способа планирования на перевозочный процесс в рамках полигона дороги и сети. Смоделирована ситуация про-

пуска 72 пар поездов по главному ходу Западно-Сибирской железной дороги Исилюль – Мариинск. По данному маршруту следования расположены четыре технические станции: Московка, Барабинск, Инская, Тайга. Основные риски, возникающие при применении способа планирования отправления поездов, образуются от дополнительного простоя поездов на технических станциях. С помощью разработанной на ЭВМ математической модели проведен ряд экспериментов и получено среднее время задержки поезда на технической станции. Рассмотрены ситуации пропуска заданных размеров грузового движения при 12, 18 и 24 парах пассажирских поездов в сутки. Результаты экспериментов сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты изменения времени простоя поездов на технических станциях после применения рационального способа планирования отправления

Показатель		Количество пассажирских поездов, поезд		
		12	18	24
Количество поездов, превысивших простой на технической станции	Минимальное	6	15	18
	Максимальное	9	30	30
	Среднее	7,2	23,4	22,8
Время дополнительного простоя, мин	Минимальное	10	10	10
	Максимальное	82	101	88
	Среднее на один поезд	34,9	33,2	31
	Среднее в сутки	83,8	259,2	235,6

В среднем, в зависимости от размеров пассажирского движения, от 10 % до 32,5 % поездов имеют дополнительный простой поездов на технических станциях после использования предлагаемого способа планирования. При этом 7 % поездов, наоборот, сокращают данный показатель. В среднем такой простой не превышает 35 мин на один поезд для одной технической станции. При рассмотрении принята маршрутная скорость равная 1200 км/сут, что примерно соответствует маршруту Исилюль – Мариинск. Для четырех рассматриваемых станций такое увеличение простоя не приведет к большому снижению маршрутной скорости для данной

группы поездов (не более 9 %). Маршрутная скорость для поездов, превысивших простой, в результате составит 1083 км/сут. Изменение маршрутной скорости в зависимости от размеров пассажирского движения составит от 0,91 % до 3,1 %.

Необходимо отметить, что данная ситуация практически не реализуема и является прогнозным верхним пределом, который может достичь данный показатель, а не обязательным результатом. Для такого уменьшения скорости необходимо, чтобы отдельные поезда превысили первоначальное время простоя на всех технических станциях дороги, что фактически маловероятно. Вероятность возникновения такого исхода найдена в соответствии с теорией вероятностей [106] и рассчитана по формуле

$$p_n = p^n, \quad (3.18)$$

где p_n – вероятность возникновения простоя поезда на всех технических станциях;

p – вероятность возникновения простоя поезда на одной станции;

n – количество технических станций на рассматриваемом полигоне.

В результате проведения соответствующих вычислений вероятность задержки поездов на всех станциях полигона составила от $1 \cdot 10^{-4}$ до $112 \cdot 10^{-4}$. Приведенные вероятности малы и не могут оказать существенного влияния на продвижение как отдельных поездов, так и в целом грузового потока в пределах одной дороги.

Экстраполирование проведенных расчетов на полигон, охватывающий всю сеть железных дорог Российской Федерации, дает такие же результаты. При увеличении расстояния следования поездов вероятность возникновения простоя уменьшается. На рисунках 3.16, 3.17 приведены графики изменения простоя поездов на технических станциях и вероятности их возникновения в зависимости от пути следования поезда. Для расчетов принято расположение технической станции через каждые 300 км.

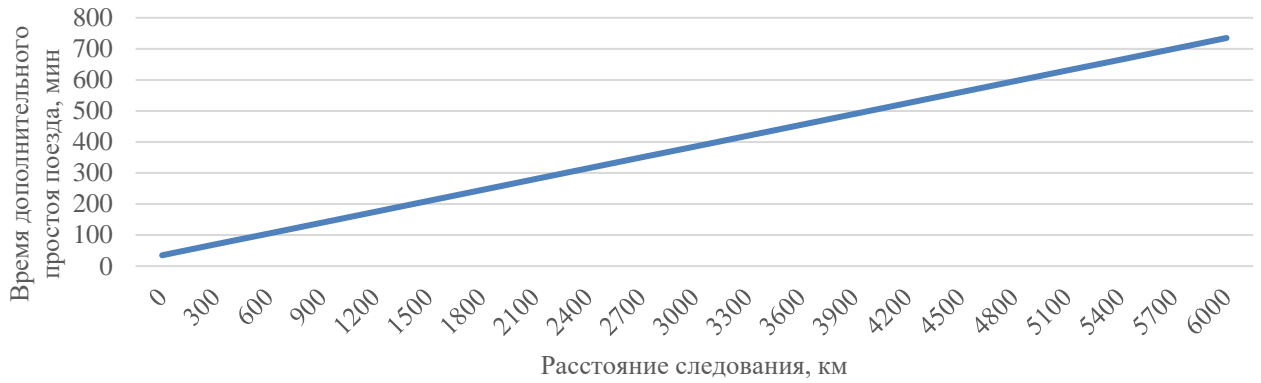


Рисунок 3.16 – График изменения времени простоя поезда на технической станции



Рисунок 3.17 – График зависимости вероятности возникновения дополнительного простоя поезда на технической станции от расстояния следования

Уменьшение эксплуатационных расходов в результате применения предложенного способа планирования немного уменьшит маршрутную скорость, однако не окажет существенного влияния на перевозочный процесс. При расстоянии следования поезда, превышающем 1200 км, максимально возможное увеличение времени доставки вагона (груза) составит 2,9 % от нормативного срока для отправок, следующих с грузовой скоростью. Вероятность дополнительного простоя на всех технических станциях по маршруту следования в данном случае стремится к нулю.

Наиболее вероятным будет наличие у поезда двух-трех задержек с суммарным временем дополнительного простоя от 45 до 90 мин.

В результате проведенного моделирования установлено, что отрицательные эффекты, возникающие при использовании рационального способа планирования отправления поездов, не оказывают большого влияния на работу полигона дороги. В результате применения предложенного способа планирования уменьшение эксплуатационных расходов за счет рационального использования ниток графика значительно превысит расходы, которые могут возникнуть при уменьшении маршрутной скорости. Все возникающие расходы учтены в рамках планирования при использовании авторской методики.

С точки зрения управления планированием на различных уровнях диспетчеризации предлагаемый порядок отправления обладает необходимой гибкостью. Механизм принятия решений по порядку пропуска определенного поездопотока реализован в рамках категорирования поездов. При изменении приоритетов пропуска поездов различных категорий достаточно определить в процессе планирования категории преимущественных поездов.

В рамках предложенного способа планирования распределение поездов между нитками графика осуществляется в отдельности на каждой технической станции. Однако такой подход к планированию не означает, что на отдельно взятых станциях происходит никак не согласованная с другими узлами управления работа. Предложенный автором способ отправления поездов соответствует принципам полигонных технологий, внедренных в ОАО «РЖД». А. С. Гершвальд рассматривал эффективность перевозок в рамках полигона с точки зрения размера пеней, которые выплачивает ОАО «РЖД» за опоздание доставки грузов и передислокации порожних вагонов [33]. Поставленная в работе цель повышения эффективности использования ниток графика на основе совершенствования системы организации планирования отправления грузовых поездов является одним из компонентов эффективности перевозок в целом.

Для достижения поставленной цели в рамках полигона предлагается интегрировать размер снижения эксплуатационных расходов при использовании предложенного способа планирования в установленную систему показателей работы железнодорожного транспорта. Каждой смене, заступающей на дежурство, необходимо устанавливать задание по выполнению эксплуатационных расходов, связанных с использованием ниток графика. Выдача такого задания, учитывающего особенности каждого участка полигона и особенности, планируемого на предстоящую смену, поездопотока, на всех уровнях управления (станция, ДЦУП, ЦУП) обеспечивает единый подход к планированию отправления поездов на полигоне.

3.3 Действия оперативного персонала при возникновении сбоя в движении поездов на участке или станции

Многие имеющиеся системы планирования справляются с возложенными на них задачами, однако они не обладают автономностью и требуют вмешательства со стороны человека. Недостатком программного обеспечения в сфере планирования является отсутствие механизма принятия решений при отказах технических средств на станциях и перегонах, приводящих к сбою в движении поездов. Одной из задач данной работы является разработка механизмов, позволяющих функционировать разработанной системе планирования во время непредвиденных ситуаций.

При непредвиденном опоздании поезда на станцию смены локомотива и/или локомотивной бригады вследствие отказа на участке запускается следующая цепочка действий. Производится перерасчет ниток, на которые были запланированы поезда, прибывшие с нарушением графика. При невозможности отправления поездов на ранее запланированные нитки данный факт учитывается при распределении остальных поездов. То есть при последующем планировании учитывается сдвиг ниток, произошедший в результате отказа. Для принятия своевременных действий в результате отказа необходимо обеспечить постоянный мониторинг со стороны

программного обеспечения поездной обстановки и анализ возможности отправления ранее спланированных поездов и бригад. В случае отказа технических средств при проверке (в рамках вышепредставленных алгоритмов) учитывается количество сорванных ниток, происходит их пропуск.

При возможности закрытия ниток другими поездами на ЭВМ дежурного персонала выводится рекомендательная информация, показывающая измененный порядок отправления поездов.

Для описания порядка действий при срыве нитки определены основные временные рамки обнаружения потери нитки:

1 Срыв нитки выявлен, когда текущее время больше или равно времени нитки.

2 Срыв нитки спрогнозирован в результате мониторинга либо ручного ввода информации, при этом текущее время больше или равно времени явки бригады.

3 Срыв нитки спрогнозирован в результате мониторинга либо ручного ввода информации, при этом текущее время меньше времени явки бригады.

Выделена группа основных причин, влекущих срыв запланированного времени отправления. Для отправления поезда на запланированное время необходимы три основных компонента – нитка, сформированный поезд и локомотивная бригада. При классификации причин за основу взяты указанные составляющие.

Соответственно, причиной срыва нитки может послужить только отклонение от запланированных параметров одной из указанных составляющих, при этом для процесса планирования в принципе неважно, что именно послужило причиной изменения параметров. Возможны следующие варианты отклонений:

1 Нитка снята для рассматриваемого поезда вследствие регулировки движения поездов (используется для отправления другого).

1.1 Нитка снята полностью (не может быть использована для отправления поездов).

1.2 Нитка перенесена на более раннее время (перенесена не сама нитка, а возможность отправления поезда, возможность так или иначе использовать пропускную способность).

- 1.3 Нитка перенесена на более позднее время.
- 2 Поезд не готов / не может быть готов к планируемому времени отправления.
 - 2.1 Поезд опаздывает по прибытию.
 - 2.2 Задержка на станции.
 - 2.2.1 Безотцепочный ремонт локомотива/вагона.
 - 2.2.2 Отцепка неисправного вагона.
 - 2.2.3 Отцепка локомотива, при этом локомотив для замены имеется в наличии либо планируется отцепка от другого поезда.
 - 2.2.4 Отцепка локомотива, при этом отсутствует замена.
 - 2.2.5 Превышение норм обработки.
- 3 Нитка не обеспечена бригадой.
 - 3.1 Время явки бригады больше необходимого (несвоевременная выдача бригад из депо).
 - 3.2 Невыполнение бригадой установленных норм времени.
 - 3.3 Отмена бригады с рассматриваемого поезда (как искусственная, так и произошедшая в результате непредвиденных обстоятельств).

Выделено 12 основных причин, влекущих срыв нитки отправления. Каждая из указанных причин может возникать в определенных временных рамках. Распределение причин в зависимости от времени сведено в таблицу 3.5. Знаком «+» в таблице 3.5 обозначена возможность возникновения причины срыва нитки графика в зависимости от времени его выявления.

При описании порядка действий учитывается, что срыв нитки может как не оказать влияния на последующие нитки, так и привести к их сдвигу. При этом сдвиг (срыв) последующих ниток будет являться прогнозируемым событием, а значит, управляемым.

Таблица 3.5 – Распределение причин срыва ниток в зависимости от времени его выявления

Причины срыва ниток	Текущее время		
	Больше или равно времени нитки	Больше или равно времени явки	Меньше времени явки
1	2	3	4
1.1 Нитка снята полностью		+	+
1.2 Нитка перенесена на более раннее время (перенесена не сама нитка, а возможность отправления поезда, возможность так или иначе использовать пропускную способность)		+	+
1.3 Нитка перенесена на более позднее время	+	+	+
2.1 Поезд опаздывает по прибытию		+	+
2.2.1 Безотцепочный ремонт локомотива/вагона	+	+	+
2.2.2 Отцепка неисправного вагона		+	+
2.2.3 Отцепка локомотива, при этом локомотив для замены имеется в наличии либо планируется отцепка от другого поезда	+	+	+
2.2.4 Отцепка локомотива, при этом отсутствует замена	+	+	+
2.2.5 Превышение норм обработки	+		
3.1 Время явки бригады больше необходимого			+
3.2 Невыполнение бригадой установленных норм времени		+	
3.3 Отмена бригады с данного поезда (как искусственная, так и произошедшая в результате непредвиденных обстоятельств)		+	

После выделения необходимых для процесса прогнозирования и планирования причин срыва ниток устанавливаются последствия, к которым они могут привести. После чего определяются основные информационные параметры, которые

позволят осуществлять прогноз и планирование. Входящая информация в описываемом процессе может быть двух видов:

- информация, получаемая автоматически из различных АСУ и прочих программных комплексов;

- вводимая вручную информация, получаемая от других участников перевозочного процесса и на текущий момент времени не подлежащая точной фиксации различными средствами контроля и учета.

Скорость обработки первого типа информации информационными системами отвечает всем требованиям оперативного управления и ограничивается лишь техническими возможностями оборудования. Соответственно, количество информации, получаемой данным способом, не может привести к перенасыщению и снижению оперативности действий. Для такой информации, скорее, применимо правило «Чем больше, тем лучше». Иными словами, чем больше информации о перевозочном процессе мы получим, тем более качественно и детально сможем спрогнозировать ситуацию.

Информация, поступающая в какую-либо АСУ в результате ручного ввода, напротив, ограничивается человеческими возможностями и связана с временными потерями, зависящими от скорости оператора, осуществляющего ввод. Лишний объем такой информации может не только не принести своевременной пользы процессу планирования, но и причинить вред.

Следовательно, для обеспечения высокой скорости планирования программный комплекс должен получать минимально возможное количество вводимой вручную информации. Полностью отказаться от такого типа информации на текущий момент времени не представляется возможным. Поэтому поставленная задача заключается в определении минимального количества вводимой информации и разработки с его учетом соответствующей логики, позволяющей производить прогноз и последующие управленческие воздействия на систему планирования.

Определены информационные параметры, необходимые для планирования, получаемые автоматически, как первичные, образовавшиеся с помощью напольных устройств, так и вторичные, образуемые в результате обработки первичной информации. Перечислим их:

1 Потеря нитки. Определяется в реальном времени на основе информации о времени отправления поезда. Если поезд отправился вне установленного ниткой интервала, то это значит, что нитка потеряна/сорвана. При этом возможны две различные ситуации:

1.1 Поезд считается отправившимся на следующую/другую нитку при условии, что время отправления находится в зоне действия соответствующей нитки.

1.2 Поезд отправлен с опозданием без потери нитки. Если время отправления поезда лежит вне временных границ какой-либо нитки, то будем считать поезд отправленным с опозданием на ближайшую последнюю нитку (если вручную не будет введено иного).

2 Изменилось прогнозируемое время прибытия поезда на техническую станцию прибытия поезда на техническую станцию. Учитывается, если изменение данного параметра перестает удовлетворять условиям планируемой нитки отправления (прибывает с большим опозданием).

При поступлении какой-либо из вышепредставленной информации наступают определенные последствия, выражающиеся в создании вторичной информации, влияющей на условия отправления остальных поездов с технической станции. При описании последствий введен ряд условностей. При планировании принимается одно, наиболее вероятное из возможных последствий, иные же будут учитываться только при осуществлении ручного ввода информации. На основании указанной информации могут наступить следующие изменения:

1.1 Поезд считается отправившимся на следующую/другую нитку. Если нитка не была занята другим поездом, последствий условно не наступает. Если нитка была занята другим поездом, то он на нее уже не сможет быть отправлен, а значит, образуется информация об отмене соответствующей нитки для ранее планируемого поезда. От данной точки разворачивается процесс расчета возможного

сдвига ниток и перераспределения уже вызванных бригад. После обработки информации с последующей выработкой решений об отмене нитки планируемого поезда автоматически зарождается информация, оказывающая влияние (при его наличии) на последующий поезд/нитку.

1.2 Поезд отправлен с опозданием без потери нитки. Условно не имеет последующего влияния, при отсутствии ручного вмешательства.

2 Изменилось прогнозируемое время прибытия поезда на техническую станцию. Происходит изменение времени отправления на установленное нормативами на обработку, которое уже не удовлетворяет заданной нитке отправления и тем самым инициирует ее отмену. Дальнейшие действия выполняются согласно п. 1.1 данного перечня.

Определены основные параметры и события, характерные для ниток/поездов/бригад, ввод которых может осуществляться в ручном режиме:

1 Факт отмены (исключение использования) нитки. Выполняется для своевременной корректировки планирования, которая может потребоваться в результате возникновения сбоев, отказов технических средств на участке либо на станции отправления поезда, не позволяющих отправить поезд на запланированное время. Данная информация необходима для оперативного сдвига ниток и перераспределения уже запланированных поездов между нитками с учетом их приоритетности и рабочего времени вызванных локомотивных бригад.

Образуется информация об отмене соответствующей нитки для ранее планируемого поезда. После чего выполняется расчет возможного сдвига ниток и перераспределения уже вызванных бригад. После обработки информации с последующей выработкой решений об отмене нитки планируемого поезда автоматически зарождается информация, оказывающая влияние на последующий поезд/нитку (при его наличии).

2 Факт отправления / планирования отправления поезда ранее или позже графического времени. Цели те же, что и у п. 1 настоящего перечня, при этом нитка не снимается. Вручную вводится время соответствующей нитки.

3 Время готовности поезда в случае изменения планируемого времени готовности к отправлению поезда в результате непрогнозируемо возникших обстоятельств, например:

- отцепка неисправного вагона;
- безотцепочный ремонт вагона/локомотива;
- нарушение технологических времен обработки со стороны любого из хозяйств.

4 Факт отцепки локомотива, при этом локомотив для замены отсутствует.

5 Прогнозируемое время прибытия локомотива для замены на станцию (либо время прицепки к составу).

6 Факт изменения прогнозируемого времени прибытия поезда на техническую станцию. Учитывается, если изменение данного параметра перестает удовлетворять условиям планируемой нитки отправления (прибывает с большим опозданием).

На основании полученной в результате ручного ввода информации возможно наступление следующих последствий:

1 Факт отмены (исключение использования) нитки. Образуется информация об отмене соответствующей нитки для ранее планируемого поезда. От данной точки разворачивается процесс расчета возможного сдвига ниток и перераспределения уже вызванных бригад. После обработки информации с последующей выработкой решений об отмене нитки планируемого поезда автоматически зарождается информация, оказывающее влияние на последующий поезд/нитку (при его наличии).

2 Факт отправления / планирования отправления поезда ранее или позже графического времени. Не влечет никаких последствий, носит лишь информационный характер. Данное время необходимо указывать для каждого поезда, который планируется отправить с отклонением от графика.

3 Время готовности поезда в случае изменения планируемого времени готовности к отправлению поезда в результате непрогнозируемо возникших обстоятельств. Если прогнозируемое время отличается от первоначально планируемого, то

срывается нитка графика. Вторичная информация такая же, как в п. 1 данного перечня, и образуется автоматически.

4 Факт отцепки локомотива, при этом локомотив для замены отсутствует. Последствия заключаются в невозможности отправить поезд до момента появления локомотива резервом или локомотива, отцепленного от другого поезда. Соответственно, если на поезд, от которого отцепляется локомотив без подмены, была вызвана бригада, происходит переизбыток вызванных бригад, необходимых для обеспечения запланированных ниток. При возникновении такой ситуации принимаются меры по перераспределению бригад между поездами и нитками и ищется дополнительный поезд, который ранее не планировался для данной бригады. При этом, как и в п. 1 данного перечня, возможен сдвиг ниток.

5 Прогнозируемое время прибытия локомотива для замены на станцию (либо возможно время прицепки к составу). Появление этой информации запускает процесс расчета на основе нормативных технологических времен планируемого времени отправления поезда. При этом возможно обеспечение данного поезда бригадой как из числа уже вызванных, так и путем вызова новой в зависимости от параметров поезда.

6 Факт изменения прогнозируемого времени прибытия поезда на техническую станцию. Влечет изменение времени отправления на установленные нормативами на обработку, которое уже не удовлетворяет заданной нитке отправления и тем самым инициирует ее отмену. Дальнейшие действия разворачиваются согласно п. 1 данного перечня.

В результате роль человека в процессе планирования отправления поездов в случае возникновения какого-либо сбоя сводится к вводу от одного до шести указанных выше параметров. При этом данную функцию не всегда требуется осуществлять, в ряде случаев информация об изменении состояния поездов берется автоматически. В условиях интенсивного движения наиболее важным является ручной ввод информации лишь на первый поезд пакета, последующее влияние на остальные поезда будет рассчитано автоматически.

В итоге выделено четыре необходимых параметра, получаемых или вычисляемых автоматически, и шесть параметров, вводимых вручную. Вручную вводятся следующие параметры:

- 1) факт снятия нитки;
- 2) время нитки отправления;
- 3) время готовности поезда;
- 4) факт отцепки / планируемой отцепки локомотива;
- 5) время прибытия локомотива;
- 6) время прибытия поезда.

Предлагаемый порядок действий при возникновении отказа или сбоя в работе железнодорожного транспорта заключается в вводе одного параметра из шести, необходимого для той или иной ситуации. Соответствие характера возникшего сбоя и требуемого параметра, вводимого пользователем системы либо получаемого автоматически, сведено в таблицу 3.6. В данной методике применяется правило приоритетности ручной информации над информацией, получаемой автоматически. То есть изначально используется автоматически получаемая информация, согласно которой производится перерасчет параметров отправления поездов. При вводе ручной информации соответствующая автоматически получаемая информация утрачивает практическое значение, и расчет производится по условиям введенной информации.

Таблица 3.6 – Соответствие сбоев в работе и изменения параметров

Характер сбоя / отклонения от нормальной работ	Информация, получаемая автоматически	Информация, вводимая вручную
1	2	3
1.1 Снятие нитки	Факт снятия нитки другим поездом	Факт снятия нитки
1.2 Планируется отправить поезд с опозданием	–	Время соответствующей нитки
2.1 Поезд опаздывает по прибытию	Время прибытия поезда	Время прибытия поезда

Продолжение таблицы 3.6

1	2	3
2.2.1 Безотцепочный ремонт локомотива/вагона	–	Время готовности поезда
2.2.2 Отцепка неисправного вагона	Время готовности поезда с учетом технологического времени на отцепку вагона	Время готовности поезда
2.2.3 Отцепка локомотива, при этом локомотив для замены имеется	–	Факт отцепки локомотива, время появления локомотива
2.2.4 Отцепка локомотива, при этом отсутствует замена	–	Факт отцепки локомотива
2.2.5 Превышение норм обработки	Факт снятия нитки в результате превышения норм обработки	Время готовности поезда или время соответствующей нитки
3.1 Время явки бригады больше необходимого	Время явки	Время готовности поезда
3.2 Невыполнение бригадой установленных норм времени	–	Время готовности поезда
3.3 Отмена бригады с данного поезда (как искусственная, так и произошедшая в результате непредвиденных обстоятельств)	Время явки бригады (определяется после получения информации об отсутствии бригады)	Факт отсутствия бригады

На основе данных анализа, приведенного в п. 2.1, 2.2 данной диссертации, выявлено, что в среднем за месяц для 37 % поездов осуществляется операция планирования нитки отправления два раза и более. Каждый из сбоев приводит к изменению условий отправления в среднем еще трех поездов, что при условии сочетания четырех параметров, необходимых для отправления поезда (нитка, локомотив, бригада, состав), сводится к определению и анализу 96 различных ситуаций дежурно-диспетчерским персоналом.

Процесс планирования заключается в рассмотрении минимум 426 комбинаций параметров основных составляющих, необходимых для отправления поезда в

сутки. Из указанного числа 114 комбинаций являются результатом повторного планирования, произошедшего из-за различных сбоев в работе. При применении предложенного порядка действий для «устранения» последствий сбоев достаточно не более одного случая вмешательства со стороны человека для каждого сбоя, сводящегося к простейшей операции ввода информации. От дежурно-диспетчерского аппарата не будет требоваться рассмотрение взаимоувязки параметров поезда, нитки, бригады, достаточно только ввести в систему значение одного временного параметра, необходимого для конкретной ситуации.

Выводы по главе 3

1 Предложена автоматизация процесса планирования отправления грузовых поездов на нитки графика, для чего разработан способ планирования, представленный в виде алгоритмов, которые учитывают время прибытия поездов, приоритетность их отправления, нормативное технологическое время на проведение операций с поездом на технических станциях и иные необходимые для планирования параметры. Предложенный способ планирования сводит к минимуму влияние человеческого фактора и риск ошибки.

2 Разработанный способ планирования усовершенствует существующую технологию отправления грузовых поездов с технических станций, ограничивающих двухпутные участки, и обеспечивает рациональное использование ниток графика при движении поездов. С помощью логических и математических функций разработан и описан алгоритмом процесс планирования поездной работы с учетом принципа минимизации эксплуатационных расходов. Разработанные алгоритмы являются основой предлагаемой системы планирования поездной работы по техническим станциям, в основе которой лежит порядок эффективного использования ниток графика. Основными критериями эффективности ниток графика являются эксплуатационные расходы, связанные со стоянками поездов на технических стан-

циях, а также остановки на участке под обгон поездов преимущественного назначения. Представленные формулы и принципы расчета отражают основные шаги на пути к повышению эффективности использования ниток графика.

3 Предлагаемый способ планирования заключается в определении возможности использования нитки графика, имеющей стоянки на промежуточных станциях участка, только после предварительного расчета возникающих расходов. Одним из шагов к практическому применению предложенного способа планирования является его реализация в виде программного комплекса, работающего во взаимосвязи с используемыми информационными системами.

4 Предложена методика, позволяющая использовать рациональный способ планирования без специальных вычислительных средств. Разработанные в рамках данной системы графики распределения расходов, связанных с использованием нитки и возникающих в результате ее отмены, позволяют при их использовании применять предложенный способ планирования, не прибегая к вычислительным комплексам. С помощью математического аппарата доказано, что планирование поездов по принципу назначения наиболее тяжеловесных поездов на нитки с меньшим числом остановок на участке приводит к минимизации эксплуатационных расходов.

5 Сформулированы рациональные действия при отказах технических средств, возможных срывах планируемого отправления поездов. Систематизированы основные причины срывов ниток графика и их влияние на процесс планирования. Причины возможных задержек поездов сведены в группы в зависимости от времени возникновения и величины влияния. Предложен порядок действий дежурного персонала по планированию отправления поездов при отказах технических средств и в условиях нестандартных ситуаций, требующий минимального вмешательства человека. При данном порядке действий роль человека ограничивается до ввода строго классифицированной информации о произошедшем событии.

4 ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА ПЛАНИРОВАНИЯ ОТПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ НА НИТКИ ГРАФИКА

4.1 Расчет изменения эксплуатационных показателей в результате применения предложенного рационального способа планирования

В п. 3.1, 3.2 данной работы были предложены и описаны при помощи алгоритмов технологические решения по оптимизации использования ниток графика. Процесс оптимизации сводится к решению двух основных задач:

- 1) определение целесообразности использования нитки (исходя из фактических размеров подвода поездов на конкретный момент времени);
- 2) расчет оптимального варианта распределения поездов между нитками графика.

Определить эффективность использования предложенного способа планирования предлагается с помощью расчета изменения основных эксплуатационных показателей работы железной дороги. При улучшении установленных количественных и качественных показателей предложенный способ планирования будет являться эффективным. Рассмотрено изменение следующих показателей работы:

- участковая скорость;
- время работы локомотивных бригад.

Участковая скорость – это один из важнейших эксплуатационных показателей, от которого также зависит и время работы локомотивных бригад. Выполнен расчет изменения участковой скорости после применения разработанного способа планирования отправления поездов и проведено сравнение с показателями, заложенными нормативным графиком. Расчет произведен при следующих условиях:

- полностью исключается использование ниток с двумя и более остановками на участке;
- исключается использование такого числа ниток с одной остановкой, в результате которого процент использования прямых ниток будет составлять 90 %. Оставшиеся 10 % закладываются в качестве резерва на случай отказов и сбоев.

Приведенные ограничения отражают применение рационального способа планирования в идеальных условиях. Фактически необходимость в использовании конкретных ниток должна определяться в зависимости от сложившейся эксплуатационной обстановки на основе расчетов эффективности применения каждой из них.

Участковая скорость определяется по формуле (4.1) (согласно Методическим указаниям о порядке формирования внутреннего статистического отчета формы ДО-10ВЦ на основании данных автоматизированной системы оперативного управления перевозками (АСОУП-2) от 31.08.2012 № 1728р) как отношение суммарных поездо-километров на участке к суммарным поездо-часам нахождения поездов на участке [36]:

$$V_{\text{уч}} = \frac{60 \sum S_{\text{уч}}}{\sum t} = \frac{60(x_0 + x_1 + x_2) \cdot L_{\text{уч}}}{x_0 \cdot t_0 + x_1 \cdot t_1 + x_2 \cdot t_2} = \frac{60(x_0 + x_1 + x_2) \cdot L_{\text{уч}}}{(x_0 + x_1 + x_2) \cdot (\gamma_0 \cdot t_0 + \gamma_1 \cdot t_1 + \gamma_2 \cdot t_2)} \quad (4.1)$$

при условии $\gamma_i = \frac{x_i}{x_0 + x_1 + x_2}$,

где 60 – коэффициент, применяемый для перевода часа в минуты;

x_0, x_1, x_2 – количество поездов, имеющих ноль, одну, две и более остановок на участке;

$L_{\text{уч}}$ – протяженность рассматриваемого участка между техническими станциями, км;

t_0, t_1, t_2 – среднее время необходимое на проследование участка для ниток, имеющих ноль, одну, две остановки, мин;

$\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ – доля поездов, имеющих ноль, одну, две и более остановок на участке, %.

После преобразований для вычисления используется формула

$$V_{\text{уч}} = \frac{60 \cdot L_{\text{уч}}}{\gamma_0 \cdot t_0 + \gamma_1 \cdot t_1 + \gamma_2 \cdot t_2}. \quad (4.2)$$

После сокращения использования ниток с наибольшими эксплуатационными расходами параметры графика вычисляются по приведенным ниже формулам.

Доля использования ниток с одной стоянкой после применения предложенного способа планирования δ_{n1} рассчитывается по следующей формуле (далее по тексту индексом n обозначаются новые параметры, полученные в результате исключения неэффективных ниток):

$$\delta_{n1} = \frac{x_{n0} + x_{n1}}{y_0 + y_{n1}}, \quad (4.3)$$

где x_{n0} – число поездов, отправляемых на прямые нитки после перераспределения ниток;

x_{n1} – число поездов, отправляемых на нитки с одной остановкой на участке;

y_0 – нормативное число прямых ниток (const);

y_{n1} – нормативное число ниток с одной остановкой на участке.

$$x_{n1} = x - \delta_{n0} \cdot y_0, \quad (4.4)$$

где x – число отправленных поездов (const);

δ_{n0} – доля использования прямых ниток, принимаемая равной 90 %.

$$x = x_0 + x_1 + x_2. \quad (4.5)$$

Количество отправляемых поездов на нитки прямые, с одной, двумя и более остановками вычисляется по формулам

$$\begin{aligned} x_0 &= \delta \cdot y_0, \\ x_1 &= \delta \cdot y_1, \\ x_2 &= \delta \cdot y_2. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Расчеты выполнены на основе участков Барабинск – Московка (для нечетных поездов) и Барабинск – Инская (для четных поездов). При расчетах принято общее число ниток нормативного графика y , равное единице. Число ниток прямых, с одной, двумя и более остановками соответствует их относительным долям в нормативном графике (данные взяты из анализа графика, приведенного в п. 2.4 гл. 2). Индексами «н» и «ч» обозначаются параметры для нечетного и четного направления графика соответственно:

$$\begin{aligned} y_{0(ч)} &= 0,6091, \quad y_{1(ч)} = 0,3057, \quad y_{2(ч)} = 0,0851, \\ y_{0(н)} &= 0,6260, \quad y_{1(н)} = 0,3381, \quad y_{2(н)} = 0,0359. \end{aligned}$$

При данных условиях $x = \delta$, где δ – степень заполняемости графика.

Необходимые для расчета участковой скорости параметры, изменившиеся в результате оптимизации графика γ_{n0} , γ_{n1} , вычисляются по формулам

$$\gamma_{n0} = \frac{x_{n0}}{x} = \frac{\delta_{n0} \cdot y_0}{\delta}, \quad (4.7)$$

$$\gamma_{n1} = \frac{x_{n1}}{x} = \frac{\delta - \delta_{n0} \cdot y_0}{\delta}. \quad (4.8)$$

Общая степень заполняемости графика в результате изменений будет соответствовать

$$\delta_n = \frac{x}{y_n} = \frac{x}{y_0 + y_{n1}} = \frac{x}{y_0 + (y_1 - x_{n0} + x_0 + x_2)}. \quad (4.9)$$

В качестве примера рассмотрены участки Инская – Барабинск и Барабинск – Московка.

Выполнен расчет для участка Инская – Барабинск.

Исходные данные:

$$L_{\text{уч}} = 313 \text{ км};$$

$$\gamma_{0(\text{ч})} = 60,91 \%, \gamma_{1(\text{ч})} = 30,57 \%, \gamma_{2(\text{ч})} = 8,51 \%;$$

$$t_{0(\text{ч})} = 299,8 \text{ мин}, t_{1(\text{ч})} = 326,4 \text{ мин}, t_{2(\text{ч})} = 354,0 \text{ мин};$$

$$\gamma_{0(\text{н})} = 62,60 \%, \gamma_{1(\text{н})} = 33,81 \%, \gamma_{2(\text{н})} = 3,59 \%;$$

$$t_{0(\text{н})} = 294,2 \text{ мин}, t_{1(\text{н})} = 332,4 \text{ мин}, t_{2(\text{н})} = 357,7 \text{ мин}.$$

Таким образом, заложенная нормативным графиком движения участковая скорость для четного и нечетного направлений соответствует:

$$V_{\text{уч}(\text{ч})} = 59,82 \text{ км/ч}, V_{\text{уч}(\text{н})} = 60,7 \text{ км/ч}.$$

На основании данных анализа, приведенного во второй главе работы, степень заполняемости графика принята равной:

$$\delta_{\text{ч}} = 65 \%, \delta_{\text{н}} = 78 \%.$$

При сокращении доли использования ниток с остановками на участке исполненный график движения имеет следующие характеристики:

$$\gamma_{0(\text{ч})} = 84,34 \%, \gamma_{1(\text{ч})} = 15,66 \%,$$

$$\gamma_{0(\text{н})} = 71,32\%, \gamma_{1(\text{н})} = 28,68\%.$$

Степень заполняемости графика:

$$\delta_{\text{ч}} = 79,48 \%, \delta_{\text{н}} = 85,53 \%$$

Участковая скорость приняла следующие значения:

$$V_{\text{уч(ч)}} = 61,79 \text{ км/ч}, V_{\text{уч(н)}} = 61,54 \text{ км/ч}.$$

В результате увеличения участковой скорости сокращается время работы локомотивных бригад. В среднем на одну бригаду время работы сократится в четном и нечетном направлениях соответственно на

$$\Delta T_{\text{ч}} = 0,167 \text{ ч}, \Delta T_{\text{н}} = 0,070 \text{ ч}.$$

Приведенное снижение времени работы локомотивной бригады на участке с размерами движения 60 пар поездов в сутки приведет к следующему сокращению эксплуатационных расходов:

$$\Delta P = e_{\text{бр}} \cdot (\Delta T_{\text{ч}} + \Delta T_{\text{н}}) \cdot N_{\text{п}}, \quad (4.10)$$

где $e_{\text{бр}}$ – единичная расходная ставка одного часа работы локомотивной бригады, принимается равной 1130,81 руб./ч;

$N_{\text{п}}$ – размеры движения, принимаются равными 60 пар поездов / сут.

$$\Delta P = 1130,81 \cdot (0,167 + 0,070) \cdot 60 = 16080 \text{ руб./сут.}$$

Выполнен расчет для участка Барабинск – Московка.

Исходные данные:

$$L_{\text{уч}} = 316 \text{ км};$$

$$\gamma_{0(\text{ч})} = 72,04 \%, \gamma_{1(\text{ч})} = 28,81 \%, \gamma_{2(\text{ч})} = 1,15 \%;$$

$$t_{0(\text{ч})} = 273,0 \text{ мин}, t_{1(\text{ч})} = 307,3 \text{ мин}, t_{2(\text{ч})} = 317,5 \text{ мин};$$

$$\gamma_{0(\text{н})} = 64,09 \%, \gamma_{1(\text{н})} = 33,82 \%, \gamma_{2(\text{н})} = 2,09 \%;$$

$$t_{0(\text{н})} = 279,7 \text{ мин}, t_{1(\text{н})} = 311,5 \text{ мин}, t_{2(\text{н})} = 327,8 \text{ мин}.$$

Таким образом, заложенная нормативным графиком движения участковая скорость для четного и нечетного направлений соответствует:

$$V_{\text{уч(ч)}} = 67,06 \text{ км/ч}, V_{\text{уч(н)}} = 65,04 \text{ км/ч}.$$

На основании данных анализа, приведенного в п. 2.2 гл. 2, степень заполняемости графика, принята равной:

$$\delta_{\text{ч}} = 67 \%, \delta_{\text{н}} = 79 \%$$

При сокращении доли использования ниток с остановками на участке исполненный график движения имеет следующие характеристики:

$$\gamma_{0(\text{ч})} = 96,77 \%, \gamma_{1(\text{ч})} = 3,23 \%;$$

$$\gamma_{0(\text{н})} = 73,01 \%, \gamma_{1(\text{н})} = 26,99 \%.$$

Степень заполняемости графика:

$$\delta_{\text{ч}} = 80,67 \%, \delta_{\text{н}} = 85,40 \%.$$

Участковая скорость приняла следующие значения:

$$V_{\text{уч}(\text{ч})} = 69,18 \text{ км/ч}, V_{\text{уч}(\text{н})} = 65,77 \text{ км/ч}.$$

В результате увеличения участковой скорости сокращается время работы локомотивных бригад. В среднем на одну бригаду время работы сократится в четном и нечетном направлениях соответственно на

$$\Delta T_{\text{ч}} = 0,144 \text{ ч}, \Delta T_{\text{н}} = 0,054 \text{ ч}.$$

Приведенное снижение времени работы локомотивной бригады на участке с размерами движения 60 пар поездов в сутки приведет к следующему сокращению эксплуатационных расходов:

$$\Delta P = 1130,81 \cdot (0,144 + 0,054) \cdot 60 = 13434 \text{ руб./сут.}$$

Суммарное сокращение эксплуатационных расходов по двум прилегающим к технической станции участкам, рассчитанное после увеличения участковой скорости, составит 29,5 тыс. руб. в сутки. Данный показатель соответствует сокращению эксплуатационных расходов в размере 10,8 млн руб. в год для участка с размерами движения в 60 пар поездов в сутки.

4.2 Оценка эффективности перевозочного процесса при рациональном распределении поездов

В п. 4.1 произведен расчет изменения основных эксплуатационных показателей работы железной дороги при использовании предложенного в работе способа планирования отправления поездов. Их улучшение играет большую роль в эксплуатационной работе, однако ключевым параметром, позволяющим определить целе-

сообразность того или иного варианта использования ниток графика, является величина эксплуатационных расходов. Две основные задачи, решаемые при использовании предлагаемого способа планирования, сводятся к расчету и сравнению расходов, возникающих при тех или иных вариантах использования ниток. Далее выполнен расчет эффективности предлагаемого решения отдельно для каждой из решаемых задач, после чего результаты объединены.

1 Расчет экономического эффекта при отказе от использования определенных ниток графика.

В п. 3.1 настоящего диссертационного исследования говорилось, что не всегда целесообразно использовать каждую имеющуюся нитку. Как правило, при небольших размерах движения бывает рациональнее исключить часть ниток, использование которых сопряжено с дополнительными расходами. Для определения таких ниток необходимо для каждой из них рассчитать эффективность использования, сравнить расходы, связанные со стоянками на промежуточных станциях участка, и расходы, связанные с увеличением стоянки на технических станциях в ожидании прямой нитки.

Для расчета используются формулы (3.4)–(3.14), приводившиеся ранее в гл. 3. При расчетах использовались единичные расходные ставки на основании распоряжения ОАО «РЖД» от 07.04.2017 № 675р «Единичные и укрупненные расходные ставки». Использовались следующие параметры:

$e_{бр}$ – единичная расходная ставка одного бригадо-часа, принимается равной 1191,44, руб.;

$e_{э}$ – единичная расходная ставка одного киловатт-часа, принимается равной 3,54 руб.;

$e_{лок}$ – единичная расходная ставка одного часа работы поездного локомотива, принимается равной 606,89 руб.;

$e_{п}$ – единичная расходная ставка одного часа занятия одного километра станционных путей, принимается равной 21,93 руб.;

V_x – ходовая скорость движения поезда, принимается равной 80 км/ч (установленная для большинства перегонов Западно-Сибирской железной дороги).

Для оценки экономического эффекта целесообразно провести расчет на основе уже имеющейся поездной обстановки. Рассмотрены отчетные сутки. Степень заполняемости по четному направлению – 63 % (принято среднее значение на основании данных из п. 2.2). Произведены расчет, последующее рассмотрение и снятие непригодных ниток по четному направлению в течение отчетных суток. Результаты приведены в таблице В.1 приложения В.

Согласно представленному расчету, общие эксплуатационные расходы, связанные со стоянками на промежуточных станциях, составляют 52,8 тыс. руб.

Используя предложенный способ планирования и учитывая фактические размеры движения, определены непригодные нитки для их последующего исключения и планирования поездов. Расчет и новый вариант распределения поездов между нитками графика приведен в таблице В.2 приложения В.

В результате проведенного расчета принято решение об исключении из использования 11 ниток: 19:47; 19:56; 4:03; 5:36; 5:45; 5:54; 6:38; 6:47; 7:10; 10:14; 15:54.

Расходы от стоянок на промежуточных станциях составили 35,9 тыс. руб. Расходы, связанные с дополнительным сверхнормативным простоем поездов на технической станции в результате снятия ниток, составили 8,3 тыс. руб.

Суммарные расходы по предлагаемому варианту распределения поездов – 44,2 тыс. руб. Сокращение эксплуатационных расходов по сравнению с исполненным вариантом составило 8,6 тыс. руб. в рамках расчетных суток, что соответствует 3,12 млн руб. в год.

Следующим шагом оптимизации в вопросе планирования отправления поездов является определение наиболее рационального варианта распределения поездов между использованными нитками графика исходя из следующего принципа: наиболее тяжелые поезда назначаются на нитки с наименьшими эксплуатационными расходами на разгон и замедление. Для расчета используются формулы, приведенные в п. 4.2 текущей главы. Используя имеющийся вариант распределения, представленный в таблице В.2 приложения В, произведен расчет расходов, после

чего выполнено перепланирование поездов между нитками графика. Результаты приведены в таблице В.3 приложения В.

В таблице В.3 темно-серым цветом выделены нитки, которые были затронуты в перераспределении поездов. Из расчетов видно, что эксплуатационные расходы составили 33,2 тыс. руб. Их сокращение, связанное с уменьшением количества стоянок на промежуточных станциях, составило 2,7 тыс. руб. в сутки.

В результате планирования отправления поездов с помощью предложенного способа суммарные расходы сократились на 11,3 тыс. руб. за сутки, или 4,12 млн руб. за год, что составляет 21,4 % от первоначальных расходов. На рисунке 4.1 представлена диаграмма распределения расходов после использования рационального способа планирования для четных ниток графика.



Рисунок 4.1 – Диаграмма распределения расходов после использования рационального способа планирования для четных ниток графика

Представленные на рисунке 4.1 группы расходов и их процентные распределения будут значительно колебаться в зависимости от степени заполняемости графика, размеров и плотности движения в отдельные промежутки времени, а также от специфики того или иного направления, связанной со средней массой поезда. Так, особен-

ность рассматриваемого примера состоит в относительно небольшой средней массе поезда. Большую долю в общем числе поездов составляют порожние поезда назначением на Кузбасс. Кроме того, в рассматриваемый период была низкая степень заполняемости графика – 63 %. Для всестороннего рассмотрения и определения эффективности использования предложенного способа планирования проанализирована ситуация, отличающаяся от рассмотренной ранее.

Рассмотрено движение в нечетном направлении в течение 12 ч. Это направление характеризуется большей массой поездов по сравнению с четным (в среднем около 6000 т). Степень заполняемости графика в рассматриваемый период составила 100 % (за сутки 75 %).

В результате расчета и перераспределения поездов получены следующие данные:

- эксплуатационные расходы, связанные со стоянками на промежуточных станциях, составили 47,9 тыс. руб., в первоначальном варианте – 59,2 тыс. руб.;

- эксплуатационные расходы, связанные с дополнительным простоем поездов на технической станции, отсутствуют, так как при рассматриваемых размерах движения нецелесообразно снимать нитки (степень заполняемости графика составляет 100 %);

- сокращение эксплуатационных расходов, связанных с движением поездов, по сравнению с исполненным вариантом составило 11,3 тыс. руб., что соответствует 19,1 % от первоначальных расходов.

На рисунке 4.2 представлена диаграмма распределения расходов после использования рационального способа планирования для нечетных ниток графика.

На основании представленных расчетов сделан ряд выводов:

- предложенный способ планирования отправления поездов является эффективным, так как он обеспечивает минимизацию эксплуатационных расходов;

- при оптимальном планировании отправления поездов сокращение расходов составит около 20 %;

- ежесуточное уменьшение расходов по одной технической станции составит около 28,0 тыс. руб./сут, или 10,22 млн руб. в год, что соответствует снижению эксплуатационных расходов в размере 900 руб. на поезд в сутки.



Рисунок 4.2 – Диаграмма распределения средств после использования рационального способа планирования для нечетных ниток графика

Данные показатели соответствуют эксплуатационным расходам, рассчитанным в п. 4.1 гл. 4 по методу, основанному на изменении участковой скорости движения, что подтверждает достоверность результатов.

Для повышения достоверности полученных результатов применен метод математического моделирования при помощи ЭВМ, рассмотренный ранее в п. 2.2 гл. 2. Параметры, используемые при построении модели, соответствуют приведенным в п. 2.2. Степень заполняемости графика принята в диапазоне от 50 % до 97 %. Всего в рассматриваемые сутки графиком «Эльбрус» заложена 81 четная нитка. Моделирование проводилось с шагом 1 %. На каждом шаге рассматривалась выборка из 100 различных вариантов прибытия поездов. Всего рассмотрено 4700 случаев.

Для каждого из рассмотренных случаев по формулам (3.4)–(3.12) рассчитаны расходы, возникающие на промежуточных станциях при использовании нитки, расходы, связанные с простоем на технической станции, и их суммарное значение. Аналогичные вычисления выполнены и для оптимального варианта распределения поездов, полученного по авторскому способу планирования для каждого из 4700 испытаний. Значение эксплуатационных расходов в рамках расчетных суток для

каждого примера отмечено точкой на рисунках 4.3–4.5. Цветовая градация на рисунке соответствует каждому 10 % степени заполняемости графика.

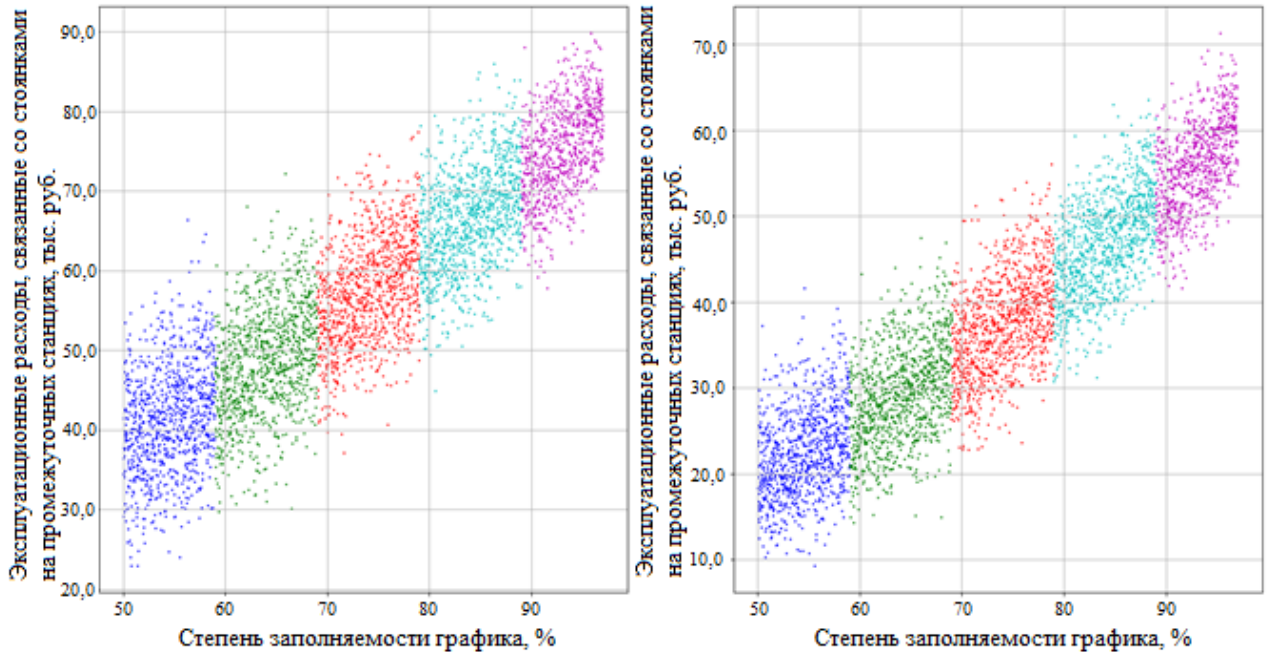


Рисунок 4.3 – Расходы, возникающих на промежуточных станциях при использовании нитки графика для существующего и оптимального вариантов распределения

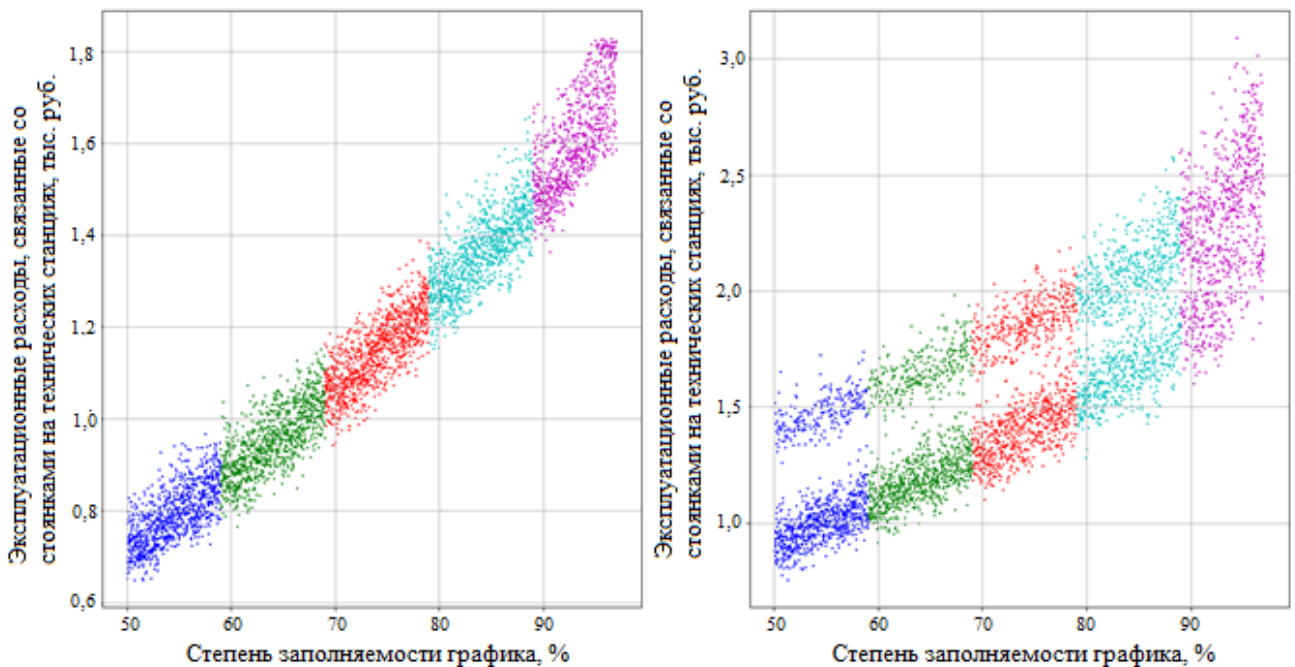


Рисунок 4.4 – Расходы, возникающие на технической станции в ожидании нитки графика для существующего и оптимального вариантов распределения

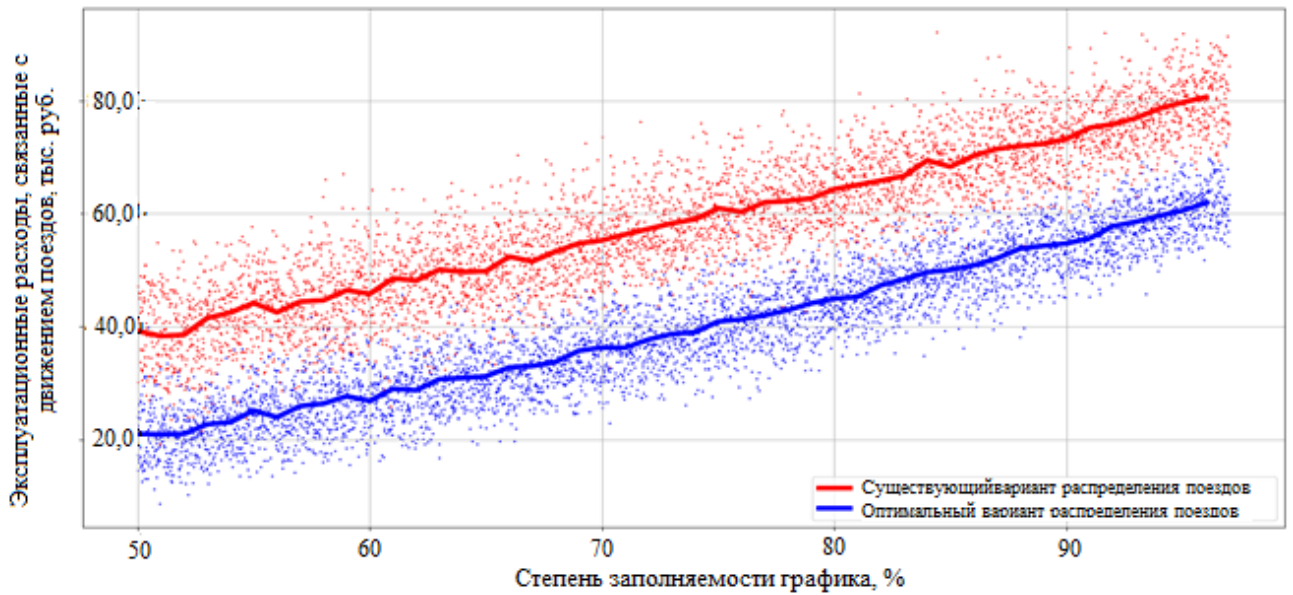


Рисунок 4.5 – Суммарные расходы, связанные с движением поездов, для существующего и оптимального вариантов распределения

Из рисунка 4.5 видно, что суммарные расходы, связанные с движением поездов, у существующего варианта распределения в среднем на 20,0 тыс. руб. в сутки больше, чем у оптимального. Данная зависимость сохраняется при различных значениях степени заполняемости графика. Суммарное сокращение эксплуатационных расходов при использовании нитки графика достигается за счет их уменьшения на промежуточных станциях (см. рисунок 4.3). При использовании авторского способа планирования происходит увеличение расходов, возникающих на технической станции в ожидании нитки графика, в среднем на 500 руб. в сутки (см. рисунок 4.4).

Полученные в результате моделирования значения изменения эксплуатационных расходов отличаются от рассчитанных ранее в пп. 4.1 и 4.2 не более, чем на 32 %. Такое расхождение указывает на различную степень достоверности приведенных методов расчета эксплуатационных расходов, возникающих при использовании ниток графика. При этом полученные результаты свидетельствуют об эффективности предложенного в работе способа планирования отправления поездов.

Рассчитаны риски нарушения сроков доставки в связи с возможным увеличением простоя поездов на технических станциях с помощью инструментов, приведенных в п. 3.2.3. Для расчета использовались формула (3.17) и рисунок 3.15, с помощью которых установлено, что использование рационального способа планирования не может привести к нарушению срока доставки. Так, при тарифном расстоянии в 9184 км (Москва – Владивосток) максимально возможное увеличение времени доставки вагона (груза) составит 15,3 ч, что составляет 2,9 % от нормативного срока для отправок, следующих грузовой скоростью (22 суток), и не ухудшает перевозочный процесс.

Похожие выводы делаются и европейскими исследователями, занимающимися вопросами сроков доставки. Опытным путем установлено, что если при движении грузового поезда по маршруту длиной от 500 до 1000 км будет допущено опоздание, например, в 45 мин, то в большинстве случаев это опоздание компенсируется в ходе дальнейшего движения по маршруту. Реальное отклонение от времени прибытия груза в пункт назначения не обязательно может замедлить процедуру передачи груза получателю или его перевалки для продолжения транспортировки [149].

При внедрении предложенного способа планирования и автоматизации этого процесса высвободится часть времени дежурно-диспетчерского персонала. В некоторых случаях возможна оптимизация рабочего времени.

Выводы по главе 4

1 Произведен расчет эффективности применения предложенного способа планирования отправления поездов. Данная задача решена двумя способами. Рассчитано изменение эксплуатационных расходов за счет изменения качественных параметров, таких как участковая скорость, и зависящее от нее время использования локомотивов и бригад. Эмпирическим путем определено изменение эксплуатационных расходов в результате применения предложенного способа планирования. Расчеты производились на основе исполненного графика движения поездов в рамках суток со средними размерами движения.

2 Расчет изменения расходов произведен отдельно для четного и нечетного направлений движения с учетом особенностей и характеристик рассматриваемого участка/полигона. В результате вычислений установлено, что характер изменения расходов значительно отличается для различных параметров движения и зависит в том числе от средней массы поезда на участке.

3 Расчет экономического эффекта от использования рационального способа планирования произведен в два этапа:

- 1) рассчитан эффект от исключения непригодных ниток;
- 2) определена эффективность перераспределения поездов на основе принципов минимизации эксплуатационных расходов, связанных с движением поездов.

4 Годовая экономия при исключении использования неэффективных ниток составит 3,12 млн руб. в год, от рационального распределения поездов между нитками графика – 7,10 млн руб. в год. Общее годовое сокращение эксплуатационных расходов при использовании предложенного способа планирования для рассматриваемого двухпутного участка превышает 10 млн руб. в год по одной технической станции. Доказана эффективность применения предложенного способа планирования отправления грузовых поездов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Анализ научных работ отечественных и зарубежных авторов показал недостаточный уровень исследования вопроса оптимизации порядка использования нормативных ниток графика, а также влияния данного порядка на эксплуатационные расходы железнодорожного транспорта, связанные с движением поездов.

2 Определено, что на время простоя поездов оказывают систематическое влияние следующие факторы: степень заполняемости графика, уровень выполнения графика по прибытию и взаимоувязка числа ниток графика по прибытию и отправлению. Установлена прямая зависимость продолжительности простоя поездов от соотношения числа ниток прибытия и отправления и их взаимного расположения в нормативном графике в течение суток относительно друг друга. Указанные зависимости применены при разработке алгоритма планирования отправления поездов.

3 Выявлено, что зависимость времени простоя поездов от степени заполняемости графика имеет экспоненциальный характер. Теоретическим и эмпирическим путем установлено, что наибольшие темпы роста времени простоя приходятся на превышение порога степени заполняемости графика в 90 %.

4 Расчетным путем доказано, что решение об использовании нитки графика должно приниматься с учетом массы поезда. Регулирование степени заполняемости графика движения поездов на основе баланса между временем стоянок на технических и промежуточных станциях и количеством используемых ниток приведет к улучшению качественных показателей (увеличение участковой скорости от 0,5 до 3 км/ч, сокращение времени работы локомотивных бригад на 26 бригадо-часов для участка протяженностью 300 км с размерами движения 60 пар поездов в сутки) и сокращению эксплуатационных расходов, связанных с движением поездов.

5 Предложен способ планирования, усовершенствующий существующую технологию отправления грузовых поездов с технических станций, ограничивающих двухпутные участки, и повышающий эффективность использования ниток графика. Разработаны принципы автоматизации процесса планирования. Данный способ обеспечивает рациональное использование ниток графика при движении

поездов и заключается в последовательном принятии решения об уменьшении степени использования ниток со стоянками на участке и поиске оптимального варианта распределения поездов между нитками графика. Доказано, что оптимальным вариант будет при назначении поездов, обладающих наибольшей массой, на нитки с наименьшим числом остановок на участке. Определены исходные параметры, влияющие на оптимальность использования ниток графика, такие как число остановок на промежуточных станциях участка и их продолжительность. Оптимальность применения предложенного способа планирования доказана при помощи математического аппарата.

6 Предложен алгоритм, позволяющий использовать разработанный способ планирования без специальных вычислительных средств, – созданы графики распределения эксплуатационных расходов, связанных с использованием нитки и возникающих в результате отказа от нее. Алгоритм позволяет определить целесообразность использования рассматриваемой нитки с помощью разработанных графиков и не требует выполнения дополнительных расчетов.

7 Определено сокращение расходов с помощью предложенных алгоритмов, которое составило 10,2 и 10,8 млн руб. в год соответственно для двух приведенных методов расчета.

8 Перспективными направлениями дальнейшего исследования рассматриваемой в работе темы является автоматизация планирования явок локомотивных бригад. Кроме того, разработка способов интеграции технологии планирования отправления грузовых поездов своего формирования с сортировочных станций с предложенными алгоритмами позволит еще больше повысить эффективность использования ниток графика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация планирования и управления перевозочным процессом на Канадских национальных железных дорогах // Ж.-д. транспорт. Сер. Ж.-д. транспорт за рубежом: ЭИ/ЦНИИТЭИ. – 1993. – Вып. 3 – С. 13–23.
2. Автоматизация управления эксплуатационным процессом на высокоскоростной сети «СИНКАНСЭН» (Япония) // Ж.-д.-транспорт. Сер. Ж.-д. транспорт за рубежом: ЭИ/ЦНИИТЭИ. – 1992. – Вып. 11 – С. 16–18.
3. Автоматизированная система управления движением поездов на линиях узкой колеи в Японии // Железные дороги мира. – 1996. - № 12. – С. 42-47. (Т. Yoshida. Japaness Railway Engineering. –1995. – № 135. P. 5–9).
4. Автоматизированное построение оперативных графиков движения поездов с учетом данных спутникового позиционирования / И. Н. Розенберг, В. И. Уманский, С. К. Дулин [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 11. – С. 68–70. – ISSN 0044-4448.
5. Авторское свидетельство № 2008615232. Имитационная модель перемещения поезда по диспетчерскому участку с учетом предупреждений и обгонов : опубл. 31.10.2008 / С. А. Никищенков, А. Н. Черемухин, А. Ю. Павлов, М. В. Додонов.
6. Авторское свидетельство № 2009610264. Имитационная модель обработки поездов в парке прибытия : опубл. 11.01.2009 / С. А. Никищенков, А. Н. Черемухин, А. Ю. Павлов, М. В. Додонов.
7. Ададулов, С. Е. Оптимизация управления инфраструктурой и безопасностью движения / С. Е. Ададулов, Е. Н. Розенберг, И. Н. Розенберг // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 9. – С. 25–30. – ISSN 0044-4448.
8. Александров, А. Э. Автоматизация построения прогнозного графика движения поездов / А. Э. Александров, А. В. Шипулин // Вестник Урал. гос. ун-та путей сообщения. – 2013. – № 3 (19). – С. 34–44. – ISSN 2079-0392.
9. Александров, А. Э. Применение системы имитационного моделирования для расчета рациональной технической структуры и технологии промышленных

транспортных систем / А. Э. Александров, П. А. Новиков // Вестник Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – 2008. – № 2. – С. 31–37. – ISSN 0201–727X.

10. Бадажков, М. А. Автоматизация планирования отправления поездов по твердым ниткам графика / М. А. Бадажков // Вестник Сиб. гос. ун-та путей сообщения. – 2017. – № 2 (41). – С. 14–21. – ISSN 1815-9265.

11. Бадажков, М. А. Влияние заполняемости графика движения поездов и его выполнения на вероятность возникновения сверхнормативного простоя / М. А. Бадажков, С. А. Бессоненко // Транспорт Урала. – 2018. – № 3 (58). – С. 40–43. – ISSN 1815-9400.

12. Бадажков, М. А. Методика планирования отправления поездов с технических станций при сбоях и отказах / М. А. Бадажков // Молодежь. Наука. Технологии (МНТК-2017) : сб. науч. тр. междунар. науч.-тех. конф. (18–20 апр. 2017). – Новосибирск : Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2017. – Ч. 3. – С. 8–14. – ISBN 978-5-7782-3199-3.

13. Бадажков, М. А. Повышение эффективности использования ниток графика движения поездов / М. А. Бадажков // Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика : материалы междунар. науч. практ. конф. (Новосибирск, 19–20 окт. 2017) : в 3 ч. – Новосибирск : Изд-во Сиб. гос. ун-та путей сообщения, 2018. – Ч. 2. – С. 3–12. – ISBN 978-5-93461-951-1.

14. Бадажков, М. А. Простой поездов на технических станциях. Влияющие факторы / М. А. Бадажков // Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. (Донецк, 22–25 мая 2018 г.). – Донецк : Донецк. ин-т ж.-д. транспорта, 2018. – С. 76–81.

15. Бадажков, М. А. Совершенствование простоя поездов на технических станциях за счет регулирования влияющих факторов / М. А. Бадажков // Вестник Сиб. гос. ун-та путей сообщения. – 2019. – № 1 (48). – С. 44–49. – ISSN 1815-9265.

16. Бадажков, М. А. Технология энергоэффективной организации движения поездов / М. А. Бадажков // Политранспортные системы : материалы X Междунар.

науч.-техн. конференции. – Новосибирск : Изд-во Сиб. гос. ун-та путей сообщения. – С. 142–146. – ISBN 978-5-00148-046-4.

17. Бадажков, М. А. Энергоэффективная технология отправления поездов / М. А. Бадажков // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика. Т. 1 : материалы XLI Междунар. науч.-практ. Конференции (Алматы, 3–4 апр. 2017 г.). – Алматы : Казах. акад. транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2017. – С. 160–164.

18. Бадажков, М. А. Энергоэффективное использование ниток графика в организации движения поездов / М. А. Бадажков // Вестник Урал. гос. ун-та путей сообщения. – 2017. – № 2 (34). – С. 111–119. – ISSN 2079–0392.

19. Бадажков, М. А. Энергоэффективное планирование отправления поездов / М. А. Бадажков, С. А. Бессоненко // Транспорт: наука, техника, управление. – М. : ВИНТИ, 2019. – № 5. – С. 11–15. – ISSN 1815-9400.

20. Бадажков, М. А. Энергоэффективность существующего графика движения поездов. Решения по оптимизации / М. А. Бадажков // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Иркутск, 2017. – Т. 1. – С. 134–138. – ISBN 978-598710-334-0.

21. Биленко, Г. М. График оборота локомотивов как основа движения грузовых поездов / Г. М. Биленко, В. С. Волков // Наука и техника транспорта. – 2016. – № 2. – С. 79–86.

22. Богачев, А. И. Расчет оптимальной продолжительности «окон» в графике движения поездов на двухпутных участках с помощью ЭВМ / А. И. Богачев // Труды Ростов. ин-та инженеров ж.-д. транспорта. – Ростов н/Д : РИИЖТ, 1977. – С. 22–34.

23. Богачев, А. И. Увеличение пропускной способности двухпутных участков и станций при ремонте и реконструкции / А. И. Богачев // Труды РИИЖТа. – 1961. – Вып. 30. – С. 144–172.

24. Бородин, А. Ф. Комплексная система организации эксплуатационной работы железнодорожных направлений : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08 / Бородин Андрей Федорович. – М., 2000. – 50 с.

25. Бородин, А. Ф. Комплексная система организации эксплуатационной работы железнодорожных направлений : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08 / Бородин Андрей Федорович ; Всерос. науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта. – М., 2000. – 491 с.
26. Бородин, А. Ф. Технология работы железнодорожных направлений и система организации вагонопотоков : учеб. пособие / А. Ф. Бородин, А. П. Батулин, В. В. Панин ; под ред. А. Ф. Бородина ; Учеб.-метод. центр по обр. на ж.-д. транспорте. – М. : УМЦ ЖДТ, 2018. – 366 с. – ISBN 978-5-906938-80-0.
27. Бухтеев, В. Ф. Оптимальный перевозочный процесс / В. Ф. Бухтеев // Проблемы безопасности российского общества. – 2015. – № 2. – С. 53–57.
28. Бучин, И. А. Договорные тарифы в условиях перехода к рыночной экономике / И. А. Бучин, Л. А. Мазо // Железнодорожный транспорт. – 1991. – № 2. – С. 63–67.
29. Верлан, А. И. Совершенствование методов стимулирования отправительской маршрутизации на железнодорожном транспорте / А. И. Верлан // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 1 (49). – С. 75–85.
30. Виноградов, С. А. Прогнозные энергосберегающие графики движения поездов / С. А. Виноградов, В. Ю. Кирякин, А. Ю. Анфиногенов // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 8. – С. 22–25. – ISSN 0044-4448.
31. Гавзов, Д. В. Стокгольмский центр диспетчерского управления движением поездов / Д. В. Гавзов, Н. Н. Саенко, А. С. Павлов // Автоматика, телемеханика и связь. – 1995. – № 9. – С. 38–39.
32. Гершвальд, А. С. Методы и алгоритмы оперативного планирования поездной работы на полигоне / А. С. Гершвальд // Наука и техника транспорта. – 2016. – № 2. – С. 74–78.
33. Гершвальд, А. С. Системы оперативного управления грузовыми перевозками на железнодорожном транспорте / А. С. Гершвальд, С. А. Филиппченко // Труды ВНИИАС. – 2008. – Вып. 8. – С. 316–324.

34. ГИД «Урал-ВНИИЖТ»: аналитические функции и автоматизация труда диспетчеров / Г. А. Кузнецов [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 3. – С. 21–25. – ISSN 0044-4448.

35. ГИД «Урал-ВНИИЖТ»: опыт внедрения и перспективы развития / Г. А. Кузнецов, В. П. Крайсвитный, С. В. Крашенинников, Н. Ф. Слободенюк // Железнодорожный транспорт. – 2006. – № 5. – С. 38–42. – ISSN 0044-4448.

36. Грунтов, П. С. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте : учеб. пособие / П. С. Грунтов – М. : Транспорт, 1994. – 544 с. – ISBN 5-277-01418-7.

37. Губарь, Л. Н. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие / Л. Н. Губарь, А. В. Ермоленко ; Сыктывкар. гос. ун-т им. Питирина Сорокина. – Сыктывкар : СГУ им. П. Сорокина, 2015. – 120 с. – ISBN 978-5-906810-13-7.

38. Давыдов, А. В. Актуальные аспекты совершенствования труда поездного диспетчера / А. В. Давыдов, В. В. Аксенов. – Новосибирск : Советская Сибирь, 2010. – 124 с. – ISBN 5-93-461-349-9.

39. Давыдов, А. В. Методология диспетчерского управления перевозочным комплексом железнодорожного транспорта / А. В. Давыдов. – Новосибирск : Lambert Academic Publishing, 2016. – 192 с. – ISBN 978-3-659-87976-0.

40. Державец, Г. И. Разработка и применение алгоритмических и программных средств автоматизации составления графиков движения поездов для однопутных линий: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Державец Геннадий Ильич. – М., 1984. – 24 с.

41. Детмолд, П. Цели перспективной системы управления движением поездов / П. Детмолд // Железные дороги мира. – 1988. – № 12. – С. 2-6.

42. Диспетчерский центр управления движением поездов по тоннелю под Ламаншем // Железные дороги мира. – 1997. – № 6. – С. 54–56 (J. Heator. Madems. – № 570. – P. 178–181).

43. Дьяков, Ю. В. Повышение уровня использования и комплексное развитие пропускной способности железнодорожных направлений : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08 / Дьяков Юрий Вячеславович. – М., 1984. – 475 с.

44. Елисеева, И. И. Общая теория статистики : учебник / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев ; под ред. И. И. Елисеевой. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Финансы и Статистика, 2002. – 480 с. – ISBN 5–279–01956–9.

45. Ерош, И. Л. Дискретная математика. Комбинаторика : учеб. пособие / И. Л. Ерош ; Санкт-Петерб. гос. ун-т аэрокосм. Приборостроения. – СПб. : Изд-во СПбГУАП, 2001. – 37с.

46. Зябиров, Х. Ш. Современные технологии в управлении перевозочным процессом на железнодорожном транспорте / Х. Ш. Зябиров, И. Н. Шапкин. – М. : Финансы и статистика ; Транспорт, 2016. – 480 с. – ISBN 978-5-279-03576-2.

47. Иванов, П. А. График движения поездов как основа качества перевозочного процесса / П. А. Иванов // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 2. – С. 21–23. – ISSN 0044-4448.

48. Инновационные технологии развития сортировочных станций / М. И. Глушко, Е. Н. Тимухина, И. А. Ковалев, Е. В. Федоров // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 2. – С. 3–8. – ISSN 0044-4448.

49. Инструкция по организации поездной работы при отправлении грузовых поездов по твердым ниткам графика : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 19 дек. 2006 г. № 3201р / ОАО «Рос. ж. д.». – М. : РЖД, 2011. – 198 с.

50. Инструкция по разработке графика движения поездов в ОАО «РЖД»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 31 дек. 2015 г. № 3201р. – М. : РЖД, 2015.

51. Инструкция по учету выполнения графика движения грузовых поездов в условиях отправления в течение месяца постоянного числа локомотивов с составами поездов нефиксированной длины и массы / Министерство путей сообщения. – М. : МПС, 1991. –16 с.

52. Интегрированная система управления железной дорогой / И. Н. Розенберг, В. Я. Цветков, С. И. Матвеев [и др.] ; под ред. В. И. Якунина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Дизайн. Информация. Картография, 2008. – 144 с. – ISBN 978-5-287-00645-7.

53. Калашников, К. А. Модернизированный метод составления графика движения поездов с учетом потерь электроэнергии / К. А. Калашников // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 62. – С. 4–8. – ISSN 1729-3774.

54. Карась, А. В. Создание и применение алгоритмических и программных средств для проектирования интенсивных технологий поездной работы двухпутных линий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Карась Александр Владимирович. – М., 1990. – 24 с.

55. Каретников, А. Д. График движения поездов / А. Д. Каретников, Н. А. Воробьев. – М. : Транспорт, 1979. – 301 с.

56. Като, С. Новый главный центр управления на линии Токайдо (Япония) / С. Като // Железнодорожный транспорт за рубежом. Сер.: Электрификация. Автоматика и связь. Вычислительная техника. – 1988. – № 11. – С. 12–17.

57. Кирякин, В. Ю. Полигонная технология формирования прогнозных вариантов графиков с использованием АПК «ЭЛЬБРУС» / В. Ю. Кирякин, А. В. Новгородцева // Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2014. – № 1. – С. 16–20.

58. Кисилева, М. Просрочка доставки грузов обойдется РЖД дешевле / М. Кисилева // Известия. – 2013. – 11 февр.

59. Климов, М. Ф. Исследование методов организации движения поездов при производстве капитальных путевых работ на двухпутных линиях : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Климов Михаил Федорович. – М., 1962. – 151 с.

60. Климович, А. В. Метод поиска оптимального по энергозатратам графика движения поезда / А. В. Климович // Вестник Томского государственного университета. Общенаучный периодический журнал. Бюллетень оперативной научной информации. – 2004. – № 32. – С. 78–83.

61. Климович, А. В. Модификация метода динамического программирования Беллмана при решении задач оптимизации управления движением поезда / А. В. Климович // Вестник Томского государственного университета. – 2004. – № 32. – С. 71–77.
62. Климович, А. В. Оптимизация графика движения поезда для всего направления перевозки груза / А.В. Климович // Вестник РГУПС. – 2006. – № 32. – С. 53–55.
63. Козаченко, Д. Н. Исследование потребности в вагонном парке для обеспечения перевозок массовых грузов по расписанию / Д. Н. Козаченко // Зб. наук. пр. ДонІЗТ. – Донецьк, 2013. – № 35. – С. 11–16.
64. Козлов, П. А. Автоматизированное управление процессами в транспортном узле / П. А. Козлов, О. В. Осокин, В. Ю. Пермикин // Вестник РГУПС. – 2013. – № 2. – С. 118–122. – ISSN 0201-727X
65. Козлов, П. А. Информационные технологии на транспорте. Современный этап / П. А. Козлов // Транспорт Российской Федерации. – 2007. – № 10. – С. 38–41.
66. Козлов, П. А. Методы оптимизации взаимодействия железнодорожного и морского транспорта / П. А. Козлов, И. П. Владимирская // Транспорт Российской Федерации. – 2009. – № 1 (20). – С. 53–55.
67. Козлов, П. А. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей / П. А. Козлов, С. П. Миловидов // Экономика и математические методы. – 1982. – Т. XVIII, вып. 3. – С. 521–531.
68. Козлов, П. А. Оценка инфраструктурных транспортных проектов методом моделирования / П. А. Козлов, А. Э. Александров // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 5. – С. 43–44.
69. Козлов, П. А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.12. – Липецк., 1986. – 393 с.
70. Комплексная интегрированная технология управления движением грузовых поездов по расписанию : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 09 июля 2012 г. № 1360р. – М. : РЖД, 2021. – 475 с.

71. Координированное управление движением поездов (Канада) // Железнодорожный транспорт. Сер.: Железнодорожный транспорт за рубежом: ЭИ/ЦНИИТЭИ. – 1992. – Вып. 11 – С. 19–22.

72. Кострома, Т. В. Исследование принципов построения и эффективности системы интервального регулирования, предназначенных для применения в период ремонтно-восстановительных работ на железнодорожном транспорте : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Кострома Татьяна Валентиновна. – М., 1980. – 199 с.

73. Кудрявцев, В. А. Управление движением на железнодорожном транспорте / В. А. Кудрявцев. – М. : Маршрут, 2003. – 199 с.

74. Кузнецов, Г. А. График движения пассажирских поездов: ориентир на своевременное прибытие / Г. А. Кузнецов // Железнодорожный транспорт. – 1989. – № 2. – С. 16–17.

75. Лизунов, А. И. Диспетчерское планирование и регулирование движения поездов на двухпутных участках с применением прогнозных графиков : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Лизунов Александр Иванович. – М., 1994. – 26 с.

76. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.

77. Матвеев, С. И. Высокоточные цифровые модели пути и спутниковая навигация железнодорожного транспорта / С. И. Матвеев, В. А. Коугия. – М. : Маршрут, 2005. – 290 с. – ISBN 5-89035-227-X.

78. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / [Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов и др.] ; под ред. Л. А. Баранова. – М. : Транспорт, 1990. – 328 с. – ISBN 5-277-00964-7.

79. Морозов, В. Н. Комплексное решение ради общей цели / В. Н. Морозов // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 10. – С. 12–15. – ISSN 0044-4448.

80. Мугинштейн, Л. А. Энергооптимальный тяговый расчет движения поездов / Л. А. Мугинштейн, С. А. Виноградов, И. А. Ябко // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 2. – С. 24–29. – ISSN 0044-4448.

81. Некрашевич, В. И. Проблема адаптации графика движения грузовых поездов колебаниями вагонопотоков / В. И. Некрашевич // Вестник ВНИИЖТ. – 2006. – № 4. – С. 8–15.

82. Никищенков, С. А. Автоматизированная система комплексной эмуляции работы диспетчерского участка с совмещенными исполненными и прогнозными графиками движения поездов и работы станций / С. А. Никищенков, А. Н. Черемухин, А. Ю. Павлов // Вестник СамГУПС. – 2012. – № 1. – С. 121–126.

83. Никищенков, С. А. Комплексная эмуляция работы железнодорожного полигона с совмещенными исполненными и прогнозными графиками движения поездов и работы станций / С. А. Никищенков, А. Н. Черемухин, А. Ю. Павлов // Информационные и математические технологии в науке и управлении : тр. Байкальской Всероссийской конференции. Ч. 1. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 79–85.

84. Об автоматизации разработки графика движения / А. Т. Осьминин, В. А. Анисимов, Н. А. Ключев и др. // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 4. – С. 19–24. – ISSN 0044-4448.

85. Осокин, О. В. Автоматизированная экспертиза проектов развития транспортной инфраструктуры / О. В. Осокин, И. М. Яриков // Вестник РГУПС. – 2012. – № 4 (48). – С. 111–115.

86. Осьминин, А. Т. Анализ показателей работы сортировочных станций в современных условиях / А. Т. Осьминин, С. Ю. Панфилова // Вестник РГУПС. – 2015. – № 3 (59). – С. 78–82.

87. Осьминин, А. Т. Совершенствование системы планирования перевозок грузов / А. Т. Осьминин, И. Г. Белозерова // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 3. – С. 17–21. – ISSN 0044-4448.

88. Папахов, А. Ю. Обоснование движения поездов на направлениях по согласованным расписаниям / А. Ю. Папахов, В. В. Хлонникова // Труды Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – 2013. – № 2 (23). – С. 76–80.

89. Парамонова, Н. В. Рациональная технология пропуска поездов во время «окна» для проведения ремонтно-строительных работ : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.22.08 / Парамонова Наталья Владимировна. – М., 2007. – 24 с.

90. Патент на изобретение № 2487036 Российская Федерация, МПК В64L 27/00, G06F 17/50. Устройство построения энергосберегающих графиков движения поездов : № 2011153812/11 / Л. А. Мугинштейн, О. В. Ляшков, С. А. Виноградов ; патентообладатель ОАО «Российские железные дороги».

91. Первин, Л. Психология личности: Теория и исследования / Л. Первин, О. Джон. – М. : Аспект Пресс, 2000. – 607 с. – ISBN 5-7567-0237-7.

92. Поездная работа при постоянных размерах грузового движения и нефиксированной массе, и длине составов / В. И. Некрашевич, В. Е. Козлов, В. И. Бодюл, А. Ф. Бородин // Вестник ВНИИЖТ. – 1991. – № 8. – С. 12–17.

93. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Минтранса России от 21.12.2010 № 286. – М. : ТРАНСИНФО ЛТД, 2016. – 388 с. – ISBN 978-5-93647-038-7.

94. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 289 с.

95. Реализация полигонной технологии с использованием АПК «Эльбрус» / В. Ю. Кирякин [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 6. – С. 18–24. – ISSN 0044-4448.

96. Резервы времени при организации движения грузовых поездов по расписанию / Д. Н. Козаченко, Н. И. Березовой, В. О. Баланов, В. В. Журавель // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 2. – С. 105–112.

97. Рио дел, Б. Автоматизация диспетчерского управления (Применительно к железнодорожному транспорту) / Б. дел Рио ; АН УССР, Ин-т кибернетики. – Киев : Наукова думка, 1965. – 172 с.

98. Рожков, А. Н. Сложность и эффективность труда поездного диспетчера / А. Н. Рожков // Транспорт Урала. – 2007. – № 2. – С. 69–74.

99. Розенберг, Е. Н. Интеллектуальные системы интервального регулирования / Е. Н. Розенберг, В. А. Воронин // Автоматика, связь, информатика (АСИ). – 2011. – № 2. – С. 23–24.

100. Розенберг, Е. Н. Определение железнодорожной координаты в координатной системе интервального регулирования движения поездов / Е. Н. Розенберг, В. Г. Новиков // Проблемы железнодорожного транспорта / под ред. д-ра техн. наук Гогричиане Г. В. – М. : Интекст, 2011. – С. 56–61.

101. Розенберг, И. Н. Автоматизированная система разработки и контроля оперативного графика движения поездов в период предоставления «окон» (АС ОГДПО) / И. Н. Розенберг, В. И. Уманский, С. К. Дулин // Системы и средства информатики. – 2014. – № 1. – С. 93–115.

102. Розенберг, Е. Н. Интервальное регулирование движения поездов / Е. Н. Розенберг, А. А. Абрамов, В. В. Батраев // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 9. – С. 19–24. – ISSN 0044-4448.

103. Рязанова, Е. В. К вопросу о совершенствовании технологии формирования и организации движения поездов по расписанию на полигонах дорог ОАО «РЖД» / Е. В. Рязанова, В. Н. Зубков // Труды Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – 2015. – № 4. – С. 86–94.

104. Светлакова, Е. Н. Интенсификация пропуска поездов в период производства капитального ремонта пути : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Светлакова Елена Николаевна. – Иркутск, 2005. – 173 с.

105. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 20096100971. Имитационная модель расформирования и формирования поездов : опублик. 13.02.2009 / С. А. Никищенков, А. Н. Черемухин, А. Ю. Павлов.

106. Семенов, В. А. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие / В. А. Семенов. – СПб. : Питер, 2013. – 192 с. – ISBN 978-5-496-00120-5.

107. Система ГИД «Урал-ВНИИЖТ»: внедрение, модернизация, перспективы развития / Г. А. Кузнецов [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 2. – С. 15–21. – ISSN 0044-4448.

108. Системы управления движением поездов на базе радиосвязи в США // Железные дороги мира. – 1998. – № 12. – С. 53–57. (печ. по: Foran, P. Progressive Railroading. – 1997. – № 6. – P. 32–40).

109. Современная техника и технология контроля и управления движением поездов (США) // Железнодорожный транспорт. Сер.: Железнодорожный транспорт за рубежом: ЭИ/ЦНИИТЭИ. – 1992. – Вып. 8 – С. 7–11.

110. Сотников, Е. А. Эксплуатационная работа железных дорог / Е. А. Сотников. – М. : Транспорт, 1986. – 256 с.

111. Сотников, Е. А. Эксплуатационная работа на железных дорогах мира / Е. А. Сотников, И. Н. Шапкин // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 1. – С. 72–77. – ISSN 0044-4448.

112. Сотников, И. Б. Вопросы составления сквозных графиков движения поездов при длинных тяговых плечах / И. Б. Сотников // Тр. Моск. ин-та инж. ж.-д. трансп. – 1963. – Вып. 161. – С. 92–113.

113. Стратегическая программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» (июнь 2004 г.). – М. : РЖД, 2004. – 81 с.

114. Таха, Х. Введение в исследование операций. В 2 кн. Кн. 1 : пер. с англ. / Х. Таха. – М. : Мир, 1985. – 479 с.

115. Тимошек, И. Н. Поиск и реализация практических рекомендаций, обеспечивающих наименьшие энергозатраты на тягу поездов / И. Н. Тимошек, В. Н. Зубков // Вестник ВНИИЖТа. – 1997. – № 4. – С. 40–43.

116. Типовые требования к регистрации, отображению, прогнозированию, учету и анализу движения поездов в автоматизированных системах диспетчерского контроля и управления на диспетчерских участках и в железнодорожных узлах : утв. МПС РФ 25.06.99 / Г. М. Грошев, А. С. Башилов, В. В. Ипатов ; Мин-во путей сообщения. – СПб. : МПС РФ, 1999. – 78 с.

117. Тишкин, Е. М. Автоматизация разработки графика движения / Е. М. Тишкин. – М. : Транспорт, 1990. – 423 с.

118. Толкачев, А. В. О выборе оптимального времени хода грузовых поездов / А. В. Толкачев ; Депон. ЦНИИТЭИ МПС, № 4274. – М., 1988. – 20 с.

119. Толкачев, А. В. Повышение эффективности перевозочной работы на участках при оптимизации времени хода и массы составов / А. В. Толкачев ; Депон. ЦНИИТЭИ МПС, № 4714. – М., 1988. – 13 с.

120. Толмачев, В. Н. Анализ вариантов схем участков ремонтно-путевых работ / В. Н. Толмачев // Транспорт, наука, техника, управление. – 2003. – № 5.

121. Толмачев, В. Н. Оперативное управление пропуском поездов на двухпутных участках в периоды проведения ремонтно-путевых работ : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.22.08 / Толмачев Вадим Николаевич. – М., 2004. – 195 с.

122. Упырь, Р. Ю. Тяжеловесное движение – резерв увеличения провозной способности / Р. Ю. Упырь, Н. Ю. Гончарова, М. Н. Еременко // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 7. – С. 10–13. – ISSN 0044-4448.

123. Упырь, Р. Ю. Эффективность внедрения интервального регулирования движения поездов по системе «Виртуальная сцепка на участке» / Р. Ю. Упырь, В. А. Оленцевич, А. А. Антипина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 2 (66). – С. 182–189.

124. Усовершенствованная система управления движением поездов ASTREE национального общества французских железных дорог // Железнодорожный транспорт. Сер.: Автоматика и связь (АСУ: ЭИ/ЦНИИТЭИ). – 1992. – Вып. 6. – С. 1–8.

125. Учет выполнения графика движения грузовых поездов / Г. А. Кузнецов [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 3. – С. 20 – 25. – ISSN 0044-4448.

126. Фаминский, Г. В. Автоматические устройства для вождения поездов / Г. В. Фаминский, Е. В. Ерофеев. – М. : Транспорт, 1978. – 103 с.

127. Чеботников, В. А. Анализ простоя транзитных вагонов по станции / В. А. Чеботников, Е. В. Белов // Труды РГУПС. – 2015. – № 4. – С. 135–140. – ISSN 1818-5509.

128. Чернюгов, А. Д. Организация эксплуатационной работы на железных дорогах ГДР / А. Д. Чернюгов, В. И. Некрашевич, А. С. Перминов // Бюллетень ЦНИИТЭИ МПС. – 1971. – Вып. 8. – С. 54–67.

129. Шапкин, И. Н. Организация железнодорожных перевозок на основе информационных технологий : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08 / Шапкина Игорь Николаевич. – М., 2009. – 48 с.
130. Шапкин, И. Н. Организация железнодорожных перевозок на основе информационных технологий : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08 / Шапкина Игорь Николаевич. – М., 2009. – 329 с.
131. Шаров, В. А. Интегрированная технология управления движением грузовых поездов по расписанию / В. А. Шаров, А. Ф. Бородин // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 8. – С. 11–22. – ISSN 0044-4448.
132. Шипулин, А. В. Использование имитационной системы ИСТРА для моделирования графика движения поездов / А. В. Шипулин, А. Э. Александров // Транспорт Урала. – 2011. – № 4. – С. 67–72. – ISSN 1815–9400.
133. Шубко, В. Г. Совершенствование пассажирских перевозок / В. Г. Шубко, В. С. Колпаков. – М. : Транспорт, 1983. – 191 с.
134. Яновский, П. А. Исследование влияния стабильности грузового движения на работу сортировочных станций : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Яновский Петр Александрович. – Куйбышев, 1981. – 312 с.
135. Barner, D. Das proNetz-Projekt «Zukunft Betrieb» / D. Barner // Deine Bahn. – 2014. – № 11. – P. 33–37, 44–48.
136. Beck, M. Der Fahrplan als kritischer Erfolgsfaktor / M. Beck // Deine Bahn. – 2010. – № 11. – P. 3–16.
137. Beck, M. Zukünftige Entwicklung des Fahrplans bei der DB Netz AG / M. Beck // Der Eisenbahningenieur. – 2015. – № 12. – P. 6–8, 10–11.
138. Belitz, A. Automatic Transfer of Train-Tracking Information in Cross-Border Railway Traffic / A. Belitz // Eisenbahntechnische Rundschau. – 2015. – № 3. – p. 16–19.
139. Bessonenko, S. Issues of Regulation of Fillability of a Train Traffic Schedule / S. Bessonenko, M. Badazhkov // MATEC Web of Conferences 239, 02004 (2018) – TransSiberia. – 2018. – P. 1–11.
140. Burgel, W. D. Computerized Dispatching on the Union Pacific Railroad / W. D. Burgel // Bull Amer. Railway. Eng. Assoc. – 1987-88. – № 713. – P. 378–383.

141. Fachinformation Bahn. Fachverlag Herausforderungen der Zukunft // Deine Bahn. – 2015. – №4. – P. 7–11.
142. Forstmeyer, J. Zweiwegebagger – Einsatzbedingungen bei der DB Netz AG / J. Forstmeyer // Der Eisenbahningenieur. – 2010. – № 6. – P. 48–51.
143. Gang, Z. A DC Traction Power Supply Converter System with Very Low Harmonics for Railway Vehicles / Z. Gang, L. Zhigang, W. Lei, D. Lijun // Vehicle Power and Propulsion Conf., 2008. VPPC '08. IEEE. – 3-9-2008. – P. 1–6.
144. Gonzalez, D. Optimal Design of a D. C. Railway Power Supply System / D. Gonzalez, F. Manzanedo // Electric Power Conference, 2008. EPEC 2008. IEEE Canada. – 6-10-2008. – P. 1–6.
145. He, W. The significance and technical-economic benefits of developing railway electrification in China / W. He // Main Line Railway Electrification, 1989., Intern. Conf. on. – 1989. – P. 27–30.
146. Landex, A. Reliability of Railway Operation / A. Landex // Proc. from the Annual Transport Conference at Aalborg University. – Denmark, 2013. – P. 63–81.
147. Liebchen, C. Quo vadis Taktfahrplanoptimierung im Eisenbahnverkehr? / C. Liebchen // Eisenbahntechnische Rundschau. – 2017. – № 1/2. – P. 31–35.
148. Lupo, P. La Replanification en Temps Réel de L'exploitation D'une Ligne Transilien / P. Lupo // Revue Générale des Chemins de Fer. – 2018. – № 284(7/8). – P. 50–56.
149. Miyatake, M. Numerical Analyses of Minimum Energy Operation of Multiple Trains under DC Power Feeding Circuit / M. Miyatake, H. Ko // Power Electronics and Applications, 2007 European Conf. on. – 2-9-2007. – P. 1–10.
150. One Control Center for the Rio Grande // Progr. Railroad. – 1986. – № 5. – P. 39–40.
151. Rees, D. Unser Ziel: Eine einfache Bahn / D. Rees // Eisenbahntechnische Rundschau. – 2016. – № 12. – P. 28–31.
152. Rothwell, G. Electricity Economics: Regulation and Deregulation / G. Rothwell, T. Gomez. – NY : Wiley-IEEE Press, 2003. – 304 p. – ISBN: 978-0-471-23437-1.
153. Schittenhelm, B. Planning with Timetable Supplements in Railway Timetables / B. Schittenhelm // Proc. from the Annual Transport Conference at Aalborg University. – Denmark, 2011. – P. 47– 61.

154. Streitig, C. Anforderungsgerechte Algorithmen zur effizienten marktgeeigneten Trassenbelegung / C. Streitig // Eisenbahntechnische Rundschau. – 2016. – № 7/8. – P. 24–29.
155. Weigand, W. Vom ITF zum Deutschland-Takt bei Verdoppelung der Fahrgastzahl / W. Weigand // Eisenbahntechnische Rundschau. – 2020. – № 1/2. – P. 32–39.
156. White, R. D. AC/DC Railway Electrification and Protection / R. D. White // Electric Traction Systems, 2008 IET Professional Development course on. – 3-11-2008. – P. 258–305.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Изменение приема и сдачи поездов по стыкам Западно-Сибирской железной дороги

Таблица А.1 – Размеры приема и сдачи поездов по стыкам, шт.

Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Прием	161	164	166	167	174	172	174	184	188	190	185
Сдача	169	172	176	175	187	184	185	197	203	200	192

Таблица А.2 – Изменение размеров приема и сдачи поездов по стыкам Западно-Сибирской железной дороги относительно уровня 2010 г., %

Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Прием	0,00	1,86	3,11	3,73	8,07	6,83	8,07	14,29	16,77	18,01	14,91
Сдача	0,00	1,78	4,14	3,55	10,65	8,88	9,47	16,57	20,12	18,34	13,61

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Статистические данные о погрузке Западно-Сибирской железной дороги

Таблица Б.1 – Размеры погрузки

Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Млн ваг.	3,86	4,01	4,16	4,16	4,27	4,22	4,29	4,54	4,64	4,61	1,80
Млн т	251,58	261,61	268,30	272,92	281,24	279,12	286,74	307,00	314,30	312,24	121,38

Таблица Б.2 – Изменение размеров погрузки относительно уровня 2010 г., %

Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Млн ваг.	0,00	3,87	7,78	7,78	10,61	9,22	11,09	17,75	20,16	19,44	19,22
Млн т	0,00	3,99	6,65	8,48	11,79	10,95	13,98	22,03	24,93	24,11	23,03

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Расчет сокращения эксплуатационных расходов при рациональном распределении поездов между нитками графика за счет применения рационального способа планирования

Таблица В.1 – Расчет эксплуатационных расходов, связанных с остановками поездов на промежуточных станциях, в соответствии с исполненным графиком движения поездов

Время нити	Номер поезда	Время при- бытия, ч:мин	Масса по- езда, т	Количество остановок	$P_{\text{пром}}$, руб.	$\sum P_{\text{лв}}$, руб.
1	2	3	4	5	6	7
18:05	1002	16:55	2431	0	0	0
18:14	2372	16:23	1840	0	0	0
18:23	2112	16:51	1650	0	0	0
18:32	2376	17:08	1656	1	989,6664	0
18:43	–	–	–	1	0	0
18:53	2114	18:17	4505	1	1935,027	0
19:06	2380	18:27	2901	2	3013,355	0
19:47	2116	18:34	4385	2	4557,083	0
19:56	2118	18:44	2667	2	3373,527	0
20:43	2382	19:54	1487	2	2030,252	0
21:15	–	–	–	1	0	0
21:41	9226	19:43	3447	0	0	0
21:50	2158	Сф	2852	1	1386,526	0
22:06	2182	21:26	1933	1	1052,637	0
22:16	–	–	–	1	0	0
23:10	2184	22:08	1887	0	0	0
23:57	2388	22:26	1867	0	0	0
0:06	1940	23:32	5900	0	0	0
0:15	2188	22:25	2228	0	0	0

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6	7
0:28	1402	23:47	2864	0	0	0
0:48	2350	22:58	5056	0	0	0
0:57	2164	0:02	5112	0	0	0
1:06	2352	0:18	5988	0	0	0
1:15	2166	0:26	4138	0	0	0
1:37	2354	0:33	2971	0	0	0
1:46	2356	0:39	1707	0	0	0
1:55	2168	0:48	5925	0	0	0
2:04	2358	1:06	5503	0	0	0
2:13	2948	1:29	1673	0	0	0
2:40	4902	–	0	0	0	0
2:51	2360	1:50	2279	0	0	0
3:03	2362	2:14	3488	0	0	0
3:36	2176	2:54	4410	1	2098,112	0
3:45	2178	2:49	6058	1	2539,768	0
3:54	3070	3:09	2722	1	1424,926	0
4:03	2180	3:16	1658	1	1317,775	0
4:42	9236	–	–	0	0	0
4:51	–	–	–	0	0	0
5:00	2102	3:52	5640	0	0	0
5:09	–	–	–	0	0	0
5:18	–	–	–	1	0	0
5:27	–	–	–	1	0	0
5:36	2128	4:52	4887	1	2389,228	0
5:45	2130	5:10	1812	1	1346,52	0
5:54	2962	5:12	1658	1	1228,354	0
6:29	2132	5:26	5056	0	0	0
6:38	–	–	–	1	0	0
6:47	–	–	–	1	0	0
7:10	2904	6:28	2815	1	1344,01	0
7:32	–	–	–	0	0	0

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6	7
7:56	–	–	–	0	0	0
8:05	–	–	–	0	0	0
8:20	–	–	–	0	0	0
8:32	2318	7:59	3778	0	0	0
8:42	–	–	–	0	0	0
8:52	2906	8:12	1786	0	0	0
9:19	2908	8:20	1729	0	0	0
9:28	–	–	–	0	0	0
9:38	–	–	–	1	0	0
9:47	–	–	–	1	0	0
9:56	–	–	–	1	0	0
10:05	–	–	–	1	0	0
10:14	2330	9:28	2981	1	1644,999	0
10:23	–	–	–	1	0	0
10:56	–	–	–	1	0	0
11:06	–	–	–	1	0	0
11:16	–	–	–	1	0	0
11:40	–	–	–	1	0	0
12:47	–	–	–	0	0	0
12:56	–	–	–	0	0	0
13:05	1296	12:34	2056	0	0	0
13:16	–	–	–	0	0	0
13:25	–	–	–	0	0	0
13:48	2154	13:06	3782	1	1664,882	0
14:23	2156	13:33	1672	1	1233	0
14:48	1398	14:19	2318	1	1180,389	0
14:57	8902	–	0	2	1468,162	0
15:06	2344	13:51	1684	2	2542,323	0
15:45	2346	14:10	1714	2	2457,045	0
15:54	2160	14:43	5969	2	5295,323	0
16:35	2348	13:42	1897	1	1374,725	0

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6	7
16:44	2162	14:52	3454	1	1869,017	0
17:24	2190	14:53	1703	0	0	0
17:45	3044	17:06	1747	0	0	0
17:54	2192	17:20	6020	0	0	0
18:03	–	–	–	0	0	0
Итого					52756,6	0

Таблица В.2 – Расчет эксплуатационных расходов, при исключении неэффективных ниток графика

Время нитки	Номер поезда	Время при- бытия	Масса по- езда, т	Количество остановок	$P_{\text{пром}}$, руб.	$\Sigma P_{\text{лв}}$, руб.
1	2	3	4	5	6	7
18:05	1002	16:55	2431	0	0	0
18:14	2372	16:23	1840	0	0	0
18:23	2112	16:51	1650	0	0	0
18:32	2376	17:08	1656	1	989,6664	0
18:43	–	–	–	1	0	0
18:53	2114	18:17	4505	1	1935,027	0
19:06	2380	18:27	2901	2	3013,355	0
19:47	–	–	–	2	0	809,292
19:56	–	–	–	2	0	726,5235
20:43	2116	18:34	4385	2	3953,493	0
21:15	2118	18:44	2667	1	1339,611	0
21:41	9226	19:54	3447	0	0	0
21:50	2382	19:43	1487	1	933,5885	0
22:06	2158	Сф	2852	1	1357,582	0
22:16	2182	21:26	1933	1	1721,999	0
23:10	2184	22:08	1887	0	0	0
23:57	2388	22:26	1867	0	0	0
0:06	1940	23:32	5900	0	0	0
0:15	2188	22:25	2228	0	0	0

Продолжение таблицы В.2

1	2	3	4	5	6	7
0:28	1402	23:47	2864	0	0	0
0:48	2350	22:58	5056	0	0	0
0:57	2164	0:02	5112	0	0	0
1:06	2352	0:18	5988	0	0	0
1:15	2166	0:26	4138	0	0	0
1:37	2354	0:33	2971	0	0	0
1:46	2356	0:39	1707	0	0	0
1:55	2168	0:48	5925	0	0	0
2:04	2358	1:06	5503	0	0	0
2:13	2948	1:29	1673	0	0	0
2:40	4902	–	0	0	0	0
2:51	2360	1:50	2279	0	0	0
3:03	2362	2:14	3488	0	0	0
3:36	2176	2:54	4410	1	2098,112	0
3:45	2178	2:49	6058	1	2539,768	0
3:54	3070	3:09	2722	1	1424,926	0
4:03	–	–	–	1	0	441,432
4:42	9236	–	–	0	0	0
4:51	2180	3:16	1658	0	0	0
5:00	2102	3:52	5640	0	0	0
5:09	–	–	–	0	0	0
5:18	–	–	–	1	0	0
5:27	–	–	–	1	0	0
5:36	–	–	–	1	0	570,183
5:45	–	–	–	1	0	570,183
5:54	–	–	–	1	0	698,934
6:29	2128	4:52	4887	0	0	0
6:38	–	–	–	1	0	496,611
6:47	–	–	–	1	0	717,327
7:10	–	–	–	1	0	643,755
7:32	2130	5:10	1812	0	0	0

Продолжение таблицы В.2

1	2	3	4	5	6	7
7:56	2962	5:12	1658	0	0	0
8:05	2132	5:26	5056	0	0	0
8:20	2904	6:28	2815	0	0	0
8:32	2318	7:59	3778	0	0	0
8:42	–	–	–	0	0	0
8:52	2906	8:12	1786	0	0	0
9:19	2908	8:20	1729	0	0	0
9:28	–	–	–	0	0	0
9:38	–	–	–	1	0	0
9:47	–	–	–	1	0	0
9:56	–	–	–	1	0	0
10:05	–	–	–	1	0	0
10:14	–	–	–	1	0	1407,065
10:23	–	–	–	1	0	0
10:56	–	–	–	1	0	0
11:06	–	–	–	1	0	0
11:16	–	–	–	1	0	0
11:40	–	–	–	1	0	0
12:47	2330	9:28	2981	0	0	0
12:56				0	0	0
13:05	1296	12:34	2056	0	0	0
13:16	–	–	–	0	0	0
13:25	–	–	–	0	0	0
13:48	2154	13:06	3782	1	1664,882	0
14:23	2156	13:33	1672	1	1233	0
14:48	1398	14:19	2318	1	1180,389	0
14:57	8902	–	0	2	1468,162	0
15:06	2344	13:51	1684	2	2542,323	0
15:45	2346	14:10	1714	2	2457,045	0
15:54	–	–	–	2	0	1186,349
16:35	2160	14:43	5969	1	2725,905	0

Продолжение таблицы В.2

1	2	3	4	5	6	7
16:44	2348	13:42	1897	1	1352,37	0
17:24	2162	14:52	3454	0	0	0
17:45	2190	14:53	1703	0	0	0
17:54	3044	17:06	1747	0	0	0
18:03	2192	17:20	6020	0	0	0
Итого					35931,2	8267,654

Таблица В.3 – Расчет эксплуатационных расходов при рациональном варианте распределения поездов

Время нитки	Номер поезда	Время при- бытия	Масса по- езда, т	Количество остановок	$P_{\text{пром}}$, руб.	$\Sigma P_{\text{лв}}$, руб.
1	2	3	4	5	6	7
18:05	1002	16:55	2431	0	0	0
18:14	2372	16:23	1840	0	0	0
18:23	2376	17:08	1656	0	0	0
18:32	2112	16:51	1650	1	987,6755	0
18:43	–	–	–	1	0	0
18:53	2114	18:17	4505	1	1935,027	0
19:06	2380	18:27	2901	2	3013,355	0
19:47	–	–	–	2	0	809,292
19:56	–	–	–	2	0	726,5235
20:43	2382	19:43	1487	2	2030,252	0
21:15	2116	18:34	4385	1	1909,681	0
21:41	9226	19:54	3447	0	0	0
21:50	2118	18:44	2667	1	1325,139	0
22:06	2158	Сф	2852	1	1357,582	0
22:16	2182	21:26	1933	1	1721,999	0
23:10	2184	22:08	1887	0	0	0
23:57	2388	22:26	1867	0	0	0
0:06	1940	23:32	5900	0	0	0

Продолжение таблицы В.3

1	2	3	4	5	6	7
0:15	2188	22:25	2228	0	0	0
0:28	1402	23:47	2864	0	0	0
0:48	2350	22:58	5056	0	0	0
0:57	2164	0:02	5112	0	0	0
1:06	2352	0:18	5988	0	0	0
1:15	2166	0:26	4138	0	0	0
1:37	2354	0:33	2971	0	0	0
1:46	2356	0:39	1707	0	0	0
1:55	2168	0:48	5925	0	0	0
2:04	2358	1:06	5503	0	0	0
2:13	2948	1:29	1673	0	0	0
2:40	4902	–	0	0	0	0
2:51	2360	1:50	2279	0	0	0
3:03	2362	2:14	3488	0	0	0
3:36	2176	2:54	4410	1	2098,112	0
3:45	2178	2:49	6058	1	2539,768	0
3:54	2180	3:16	1658	1	1071,868	0
4:03	–	–	–	1	0	441,432
4:42	9236	–	–	0	0	0
4:51	3070	3:09	2722	0	0	0
5:00	2102	3:52	5640	0	0	0
5:09	–	–	–	0	0	0
5:18	–	–	–	1	0	0
5:27	–	–	–	1	0	0
5:36	–	–	–	1	0	570,183
5:45	–	–	–	1	0	570,183
5:54	–	–	–	1	0	698,934
6:29	2128	4:52	4887	0	0	0
6:38	–	–	–	1	0	496,611
6:47	–	–	–	1	0	717,327
7:10	–	–	–	1	0	643,755

Продолжение таблицы В.3

1	2	3	4	5	6	7
7:32	2130	5:10	1812	0	0	0
7:56	2962	5:12	1658	0	0	0
8:05	2132	5:26	5056	0	0	0
8:20	2904	6:28	2815	0	0	0
8:32	2318	7:59	3778	0	0	0
8:42	–	–	–	0	0	0
8:52	2906	8:12	1786	0	0	0
9:19	2908	8:20	1729	0	0	0
9:28	–	–	–	0	0	0
9:38	–	–	–	1	0	0
9:47	–	–	–	1	0	0
9:56	–	–	–	1	0	0
10:05	–	–	–	1	0	0
10:14	–	–	–	1	0	1407,065
10:23	–	–	–	1	0	0
10:56	–	–	–	1	0	0
11:06	–	–	–	1	0	0
11:16	–	–	–	1	0	0
11:40	–	–	–	1	0	0
12:47	2330	9:28	2981	0	0	0
12:56	–	–	–	0	0	0
13:05	1296	12:34	2056	0	0	0
13:16	–	–	–	0	0	0
13:25	–	–	–	0	0	0
13:48	2154	13:06	3782	1	1664,882	0
14:23	2156	13:33	1672	1	1233	0
14:48	1398	14:19	2318	1	1180,389	0
14:57	8902	–	0	2	1468,162	0
15:06	2344	13:51	1684	2	2542,323	0
15:45	2346	14:10	1714	2	2457,045	0
15:54	–	–	–	2	0	1186,349

Продолжение таблицы В.3

1	2	3	4	5	6	7
<i>16:35</i>	<i>2348</i>	<i>13:42</i>	<i>1897</i>	<i>1</i>	<i>1374,725</i>	<i>0</i>
<i>16:44</i>	<i>2190</i>	<i>14:53</i>	<i>1703</i>	<i>1</i>	<i>1287,996</i>	<i>0</i>
<i>17:24</i>	<i>2160</i>	<i>14:43</i>	<i>5969</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>17:45</i>	<i>2162</i>	<i>14:52</i>	<i>3454</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
17:54	3044	17:06	1747	0	0	0
18:03	2192	17:20	6020	0	0	0
Итого					33199,0	8267,654

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Справка о внедрении результатов диссертационного исследования



СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы Бадажкова Михаила Александровича

Результаты, полученные Бадажковым М.А. при выполнении диссертационной работы на тему «Повышение эффективности использования графика движения грузовых поездов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «Управление процессами перевозок» (технические науки), имеют прикладное значение для планирования отправления поездов.

На Западно-Сибирской железной дороге – филиале ОАО «РЖД» проводятся мероприятия по совершенствованию планирования отправления поездов с технических станций. Работа М.А. Бадажкова представляет практический интерес в рамках проводимых мероприятий.

Применение разработанной технологии планирования позволит повысить эффективность выполнения графика движения поездов.

Результаты работы Бадажкова М.А. представляют практическую ценность и приняты к использованию при планировании отправления поездов с технических станций ОАО «РЖД».

Первый заместитель начальника
Западно-Сибирской дирекции
управления движением



-А.А. Сибилев

16.02.2022