

На правах рукописи



Эсаулов Вячеслав Александрович

**МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОПУСКА
ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ НА ГРУЗОНАПРЯЖЕННОМ НАПРАВЛЕНИИ
ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

2.9.4. Управление процессами перевозок

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2022

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

Научный руководитель: кандидат технических наук
Давыдов Борис Израильевич

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

Максимова Евгения Сергеевна
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», кафедра «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте», доцент

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

Захита состоится 01 марта 2023 г., в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 40.2.002.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ) www.miit.ru.

Автореферат разослан «___» 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сидоренко Валентина Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важнейшие задачи национального перевозчика – ОАО «Российские железные дороги» – это поддержание высокого качества транспортной услуги и повышение эффективности перевозочного процесса. Требованием грузовладельца к компании-перевозчику является точность доставки, что обеспечивает реализацию глобальных логистических цепочек. Движение поездов по графику выполнить сложно вследствие наличия случайных влияний, приводящих к возникновению нарушений скоростного режима и неграфиковых остановок. Отклонения сопровождаются экономическими потерями – штрафами за просрочку доставки грузов и ростом эксплуатационных расходов, в первую очередь, затрат на топливо (энергию).

Указанные трудности устраняются путем оптимизации управления ходом перевозочного процесса, построения отказоустойчивого графика движения. Вопросы совершенствования управления движением пассажирских поездов исследователями усиленно решаются с использованием методов и средств интеллектуальной поддержки работы диспетчерского персонала. В то же время, существуют значительные проблемы в области управления потоком грузовых поездов. Это делает решение вопросов построения эффективного графика движения, нацеленного на достижение высокого уровня надежности и экономичности, весьма актуальным. Своевременность рассмотрения задач совершенствования управления грузовым движением также определяется возросшим требованием увеличения пропускной способности основных магистральных направлений железных дорог. В перспективе до 2025 г. протяженность «узких мест» Восточного полигона сети ОАО «РЖД» (участков с заполнением пропускной способности выше допустимого уровня) составит 10 000 км, или 90 проц. общей протяженности.

Ведущими исследователями транспортной отрасли изыскиваются пути совершенствования железнодорожного перевозочного процесса посредством ускорения доставки, повышения уровня маршрутизации вагонопотока, специализации пакетов графика по видам отправок и назначений при обеспечении перевозок устойчивыми маршрутными отправками и ускоренными грузовыми поездами, оптимизации плана формирования, повышения уровня транзитных, одногрупных поездов. Процесс также

moderniziruyetsya posredstvom razrabotki nauchno-metodicheskikh i organizatsionno-tekhnicheskikh reshenii po predotvrazeniiu затруднений v eksploatatsionnoy работе za chet primeneniya poligonnykh principov upravleniya, variantskikh tekhnologicheskikh rezhimov, kompleksnykh tekhnologiy transportnykh uzlov. V chastyoti, verysma effektivnym оказывается racionallnoe raspredelenie sredstv lokomotivnoy tigli na poligone. Vaznym elementom povysheniya kachestva pervezokявляется развитие sistemy dipyastchereskogo rukovodstva.

V nastoiajshoy работе основное внимание сфокусировано na разработke ustojchivogo grafika dvizheniya poezdov – создание v nem opredelennykh rezervov, pозволяющих likvidirovat' sboi v usloviyah povysheniya intenzivnosti poezdonotoka. Sladust otmetit', chto voipros sobлюдения raspisaniya v gрузovom segmente pervezok osobenno aktualen v nastoiajshem vremya, kogda rastet ob'ym kontejnernykh pervezok. Zadacha sobлюдения grafika усложняется pri poptykakh intenzifikasirovat' dvizhenie poezdov putem vnesdreniya tekhnologiy sdvochnogo propuska. Esto trebuetуглublennogo issledowania voprosov racionallnogo postroeniya i vyipolneniya grafika dvizheniya.

Степень разработанности. Voprosy organizatsii i upravleniya dvizheniem poezdov issleduyutsya uchenymi Rossii i drugih vедущих stran mira. Strategicheskie metody sovershenstvovaniya tekhnologiy eksploatatsionnoy работыжелезнодорожnogo transporta раскрыты v trudakh Anatzeva V.I., Baranova L.L., Borodina A.F., Gordeika B.YO., Sharova V.A i drugix uchenykh.

Probleme razrabotki grafika dvizheniya poezdov uделено bol'shoye внимание v trudakh Abramova A.L., Davydova B.I., Elyseeva S.YO., Karetnikova A.D., Klimanova V.C., Kozyrева C.V., Kochneva F.P., Lsvina D.YO., Sidorenko V.G., Sotnikova E.A., Uman'skogo V.I., Goverde R., Huisman T. i ryada drugix issledovateley.

Voprosy interval'nogo regulirovaniya, v tom chisle, s ispolzovaniem sovremenennykh tekhnologiy avtomatizatsii, рассмотривали Bestem'yanov P.F., Bushuev C.B., Klimova E.B., Olen'evich V.A., Rosenberg E.N., Shabalin N.G. i ryad drugix issledovateley.

Problemu povysheniya ergoeffektivnosti путем улучshения organizatsii dvizheniya, postroeniya optimallnogo grafika issledovali

Баранов Л.А., Горелик В.Ю., Давыдов Б.И., Дубровин И.Н., Кузнецов В.Г., Розенберг Е.Н., Юрчико К.И., Roberts K. и другие ученье.

На основании анализа научной литературы можно сделать вывод: проблема формирования нормативного (сводного) и вариантового (оперативного) графиков движения, нацеленных на повышение точности прибытия поездов грузового вида движения на станции, ограничивающие участок, остается недостаточно изученной. В диссертационном исследовании основное внимание уделено разработке методических вопросов корректировки движения путем изменения графиковых нормативов и рационального использования технологии спаренного пропуска поездов. Это позволяет повысить пунктуальность движения и улучшить экономические показатели компании-перевозчика.

Объектом исследования служат транспортные и информационные потоки, системы управления на железнодорожном транспорте.

Предметом исследования является планирование (долгосрочное и оперативное), управление потоками транспортных средств; технология организации транспортных процессов.

Целью работы является поиск путей повышения экономической эффективности в сегменте грузового движения при организации перевозок на грузонапряженных двухпутных линиях посредством корректировки нормативов графика движения, использования технологий спаренного пропуска поездов, а также исключения взыскания пени за нарушение нормативных сроков доставки.

Указанная цель предопределила постановку следующих основных задач диссертационной работы:

- проведение анализа существующих отечественных и зарубежных научных работ, связанных с разработкой графика движения поездов, использованием методов интервального регулирования, а также повышением энергоэффективности перевозочного процесса;
- исследование влияния интенсивности грузового потока на показатель точности соблюдения графика при реализации режимов одиночного следования, движения жестко-цепленных и виртуально-цепленных грузовых поездов (ВСЦ);

- проведение анализа энергопотребления при использовании различных режимов пропуска поездов грузового вида движения, в том числе, при режимах спаренного пропуска;
- разработка и обоснование методики формирования перегонных, участковых времен хода с учетом реальной ситуации посредством вероятностного подхода;
- оценка влияния межпоездных интервалов по отправлению с технической станции на элемент времени хода грузовых поездов, в том числе, с применением технологии виртуального сцепления поездов;
- оценка эффективности, предложение условий реализации спаренного пропуска грузовых поездов по линии с высоким заполнением пропускной способности;
- разработка показателя и методики оценки экономической эффективности графика исполненного движения грузовых поездов с учетом соблюдения нормативных сроков доставки.

Таким образом, диссертационное исследование направлено на повышение итоговой результативности процесса перевозок посредством использования экономически эффективного графика движения поездов, обоснования способов, вариантов и условий спаренного пропуска грузовых поездов, а также повышения уровня надежности выполнения сроков доставки. Корректировка элементов графика производится на основе статистической обработки массивов данных о реальном движении поездов.

Научная новизна заключается в следующем:

- обоснован математический подход к разработке базовых элементов графика движения в условиях повышения интенсивности потока, а также применения современных технологий интервального регулирования;
- определены сферы применения технологий спаренного пропуска грузовых поездов, а также объединения контейнерных поездов в условиях интенсивного потока;
- обосновано отсутствие технологических и экономических преимуществ одних технологий сдвоивания поездов перед другими;
- сформирована методика математического расчета базовых элементов графика движения на грузонапряженном направлении железной дороги;
- исследованы характеристики исполненного движения виртуально- и жестко-сцепленными поездами;

- разработаны предложения по повышению эффективности использования современной технологии интервального регулирования «виртуальная сцепка» в условиях высокого заполнения пропускной способности участков;
- разработан экономический показатель оценки качества перевозочного процесса, основанный на соблюдении нормативных сроков доставки грузов, характеризующий регулировочные решения, принятые на отдельно взятом диспетчерском участке, районе управления или дороге в целом.

Теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования:

- определены закономерности влияния интенсивности потока на показатели качества перевозочной деятельности, которые необходимо учитывать при разработке графика движения поездов и применении методов повышения пропускной способности грузонапряженных участков;
- исследованы характеристики энергопотребления при различных режимах пропуска грузовых поездов по участку, что позволяет обосновывать необходимость корректировки элементов графика движения поездов с учетом энергоэффективности процесса движения;
- проведен анализ научных источников, позволяющий сделать вывод о существовании разных подходов к организации движения грузовых поездов и формированию графика движения поездов; в настоящей работе существующий эвристический подход к разработке графика совершенствуется путем использования методов вероятностного моделирования. Разработанная методика расчета элементов графика с учетом вероятностных характеристик обеспечивает высокую эффективность движения в условиях повышения грузонапряженности железной дороги;
- сформулирован показатель экономического результата регулировочных действий, позволяющий оценить качество движения на диспетчерском участке, районе управления и дороге в целом с учетом соблюдения нормативных сроков доставки грузов;
- предложен комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на совершенствование перспективной технологии организации движения виртуально-сцепленных поездов.

Методология и методы исследования. В основу диссертационного исследования положены методы моделирования транспортных процессов,

спаренного пропуска грузовых поездов, статистического анализа больших массивов данных, а также экономического оценивания результатов деятельности субъекта перевозочной деятельности.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты теоретического обоснования вероятностного подхода к разработке базовых элементов графика движения на основе российского и зарубежного опыта;
- методика формирования межпоездных интервалов в условиях применения технологий интервального регулирования;
- условия применения современных технологий спаренного пропуска грузовых поездов;
- методика определения перегонных, участковых времен хода с учетом реальной эксплуатационной ситуации;
- обоснование наличия корреляционной связи между межпоездными интервалами при отправлении с начальной станции участка и временами хода поездов в условиях интенсивного потока, в том числе, в ходе применения технологии организации движения ВСЦ поездов;
- предложения по совершенствованию технологий спаренного пропуска грузовых поездов, в том числе, технологии организации пропуска ВСЦ поездов;
- методика оценки графика исполненного движения по критерию точности соблюдения расписания.

Достоверность результатов исследований подтверждается соответствием общих выводов, полученных в диссертации, частным выводам, которые содержатся в предшествующих работах. Кроме того, присутствует хорошее совпадение результатов, полученных в ходе моделирования движения поездов, с показателями, которые характеризуют реальное движение.

Апробация результатов исследования. Основные идеи, положения и предложения, раскрытие в диссертации, представлялись, обговаривались и получили положительную оценку на следующих международных и всероссийских научных конференциях:

- VII научная конференция «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ)», г. Москва, 2018 г.;

- Международная научная конференция ICCSA-2019, г. Санкт-Петербург, 2019 г.;
- Международная научно-практическая конференция FarEastCon-2019, г. Владивосток, 2019 г.;
- Восьмая научная конференция «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ)», г. Москва, 2019 г.;
- Международная научная конференция «Открытые эволюционирующие системы: цифровая трансформация», г. Хабаровск, 2022

Результаты исследований представлены на соискание гранта ОАО «РЖД» в рамках конкурса молодых ученых в 2019 г., а также на XXIII красной конкурс молодых ученых, г. Хабаровск, 2021 г. Вопросы, разрабатываемые в диссертации, обсуждались на заседаниях кафедр «Организация перевозок и безопасность на транспорте» и «Автоматика, телемеханика и связь» ДВГУПС в течение 2019-2022 гг.

Ряд результатов диссертационного исследования используется на Восточном полигоне сети дорог ОАО «РЖД» при совершенствовании организации движения. В частности, реализуется процесс гибкого присвоение нитки графика в зависимости от эксплуатационной обстановки, что позволяет существенно улучшить показатели пропуска в периоды длительных «окон» для плановых видов ремонта инфраструктуры.

Структура и объем диссертации. Работа включает в себя введение, пять глав, заключение, список используемой литературы, включающий 107 наименований, 2 приложения, 18 рисунков, 12 таблиц. Общий объем рукописи – 138 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, ее теоретическая и практическая значимость, цели и задачи исследования, а также методология решения поставленных задач. Определено, что при анализе интенсивного движения поездов, построения и корректировки графика эффективным является вероятностный подход. Показано, что при решении задачи улучшения организации грузового движения и повышения надежности графика движения необходимо комплексное использование методов статистики и технологий сдвоивания грузовых поездов. Поставлен ряд задач, связанных с совершенствованием технологии пропуска грузовых поездов на грузонапряженных линиях железных дорог при обеспечении точности прибытия на технические станции, а также с соблюдением нормативных сроков доставки.

Первая глава посвящена анализу теоретических работ и публикаций, обобщающих практический опыт, по проблеме разработки графика при различных способах и условиях организации движения грузовых поездов.

Общетеоретической и методической базой исследования, проведенного в рамках в диссертационной работы стали основополагающие труды Абрамова А.А., Вентцель Е.С., Давыдова Б.И., Каретникова А.Д., Котенко А.Г., Кочнева Ф.П., Левина Д.Ю., Сотникова Е.А., Goverde R., Huisman T., Mahmoodi N. и др.

Повышение устойчивости графика движения и точности грузовых перевозок является сложной комплексной задачей,ключающей в себя не только развитие методов математического моделирования перевозочного процесса, но и усиление пути, тяговых подстанций, устройств контактной сети, средств локомотивной тяги. Кроме того, повышению уровня пунктуальности, эффективности перевозок способствует изменение технологических процессов на станциях, сокращение операций обработки составов и повышение надежности технических средств и подвижного состава. Особенно важно это в условиях применения современных методов интервального регулирования, в том числе, посредством организации виртуально-цепленных поездов. Соответственно, современные изменения в организации движения поездов требуют новых подходов к разработке графика, а также гибкого применения технологий спаренного пропуска грузовых поездов.

Вторая глава посвящена исследованию выполнения расписания грузовыми поездами (в том числе, спаренными) в условиях интенсивного движения, а также разработке методики формирования устойчивого графика движения грузовых поездов.

Проведен анализ характеристик исполненного движения виртуально-цепленных поездов по участку Хабаровск II – Ружино Дальневосточной железной дороги. На указанном контролльном участке графиком движения предусмотрен норматив времени хода, равный 396 мин. Ни один исследуемый поезд не уложился в график. Среднее значение времени хода пакетов ВСЦ поездов составило 502 мин. Завышение фактического времени хода обусловлено влиянием совокупности случайных дестабилизирующих факторов. С целью выяснения влияния случайных задержек на ВСЦ поезда, изучен характер распределения времени хода для ведущих и ведомых поездов. Гистограммы для опозданий (рисунок 1) показывают идентичность распределений отклонений от графика по прибытию на конечную станцию участка для указанных групп.

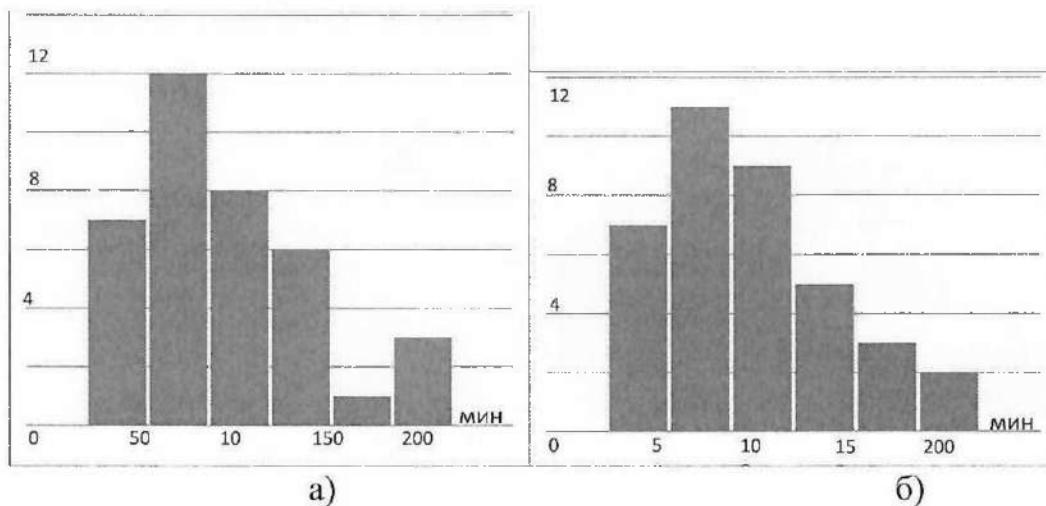


Рисунок 1 – Гистограммы отклонений от графикового времени прибытия для ведущих (а) и ведомых (б) поездов

В исследованной выборке минимальное отклонение от графикового момента прибытия для ведущего поезда составило 31 мин., ведомого – 34 мин. (в сторону увеличения). Средняя величина отклонения по прибытию ведущего составила 106 мин., среднеквадратическое отклонение – 47 мин.

Исследована выборка данных по 56 жестко-цепленным поездам, проследовавшим за тот же период по участку Хабаровск – Ружино. Критерии

отбора сценок аналогичны критериям отбора ВСЦ поездов. Среднее значение времени хода жестко-сцепленных поездов составило 504 мин, средняя участковая скорость движения – 49,0 км/ч. Гистограмма распределения отклонений моментов прибытия на конечную станцию участка приведена на рисунке 2. Минимальное время отклонения по прибытию на конечную станцию от нормативной погрешности для жестко-сцепленных поездов составило 28 мин., максимальное – 188 мин. Среднее опоздание равно 108 мин., СКО – 40 мин.

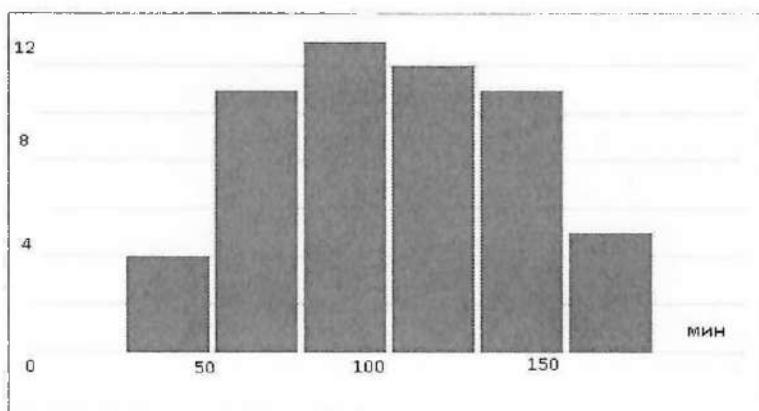


Рисунок 2 – Гистограмма отклонений от графикового времени прибытия для жестко-сцепленных поездов

Несмотря на то, что объединение поездов не позволяет обеспечивать точность прибытия поездов в интенсивном потоке, спаренный пропуск позволяет повысить степень использования пропускной способности, что важно при увеличении интенсивности потока. Кроме того, рациональное использование «штока» графика движения минимизирует риск перенасыщения участков, обеспечивает устойчивость графика движения и сокращает период восстановления графика после транспортных инцидентов и технологических сбоев.

Для создания устойчивого графика движения предложен вероятностный подход, позволяющий обосновать увеличение перегонного времени в условиях интенсивного и особо интенсивного движения, которое обеспечивает прибытие по графику большинства поездов с заданной вероятностью p . Стохастическая модель, описывающая величину времени хода, основана на реальных данных о следовании грузовых поездов по участку.

Методика расчета ходового времени включает нахождение плотности распределения этой величины $P(t)$ и определение такого значения t_{kp} , при соблюдении которого выполняется требование заданной точности прибытия на конечную станцию участка. Методика иллюстрируется рисунком 3, на котором площадь сегмента под кривой плотности, ограниченная абсциссой t_{kp} , соответствует вероятности выполнения графика грузовых поездов по прибытию.

Полученное расчетом значение величины t_{kp} определяет нижнюю границу допускаемого времени хода по участку.

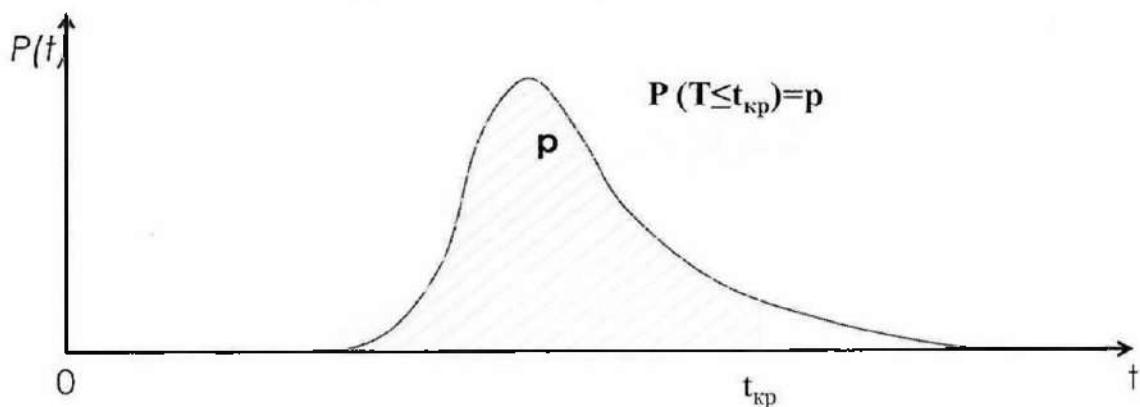


Рисунок 3 – Плотность распределения вероятностей выполнения времени хода по участку

В процессе моделирования определяются параметры функции, аппроксимирующей кривую плотности распределения вероятностей выполнения времени хода. Исходная статистическая информация извлекается из баз данных исполненного движения грузовых поездов. После построения и обработки вариационного ряда формируются гистограмма и гипотетическая плотность распределения вероятностей, определяются ее параметры.

Для моделирования распределения случайной величины, характеризующей время хода, используем плотность гамма-распределения со сдвигом. Для каждого из наборов экспериментальных данных проверяется статистическая гипотеза о том, что выборка взята из распределения, характеризуемого гамма-плотностью:

$$l(t; \alpha_1, \beta) = I(t > 0) \frac{e^{-\beta} t^{\alpha_1 - 1}}{\Gamma(\alpha_1) \beta^{\alpha_1}} \quad (1)$$

где $\alpha_1 > 0$, $\beta > 0$ – параметры, характеризующие распределение.

Задача решается путем вычисления эмпирической статистики и сравнения ее с критическим значением. Для проверки выдвинутого предположения об адекватности принятой аппроксимации используется критерий Колмогорова. Критическое значение критерия определяется по формуле:

$$\lambda_n(\alpha) \approx \frac{\lambda_\alpha}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где α – уровень значимости критерия, λ_α – корень уравнения

$$1 - K(\lambda) = \alpha \quad (3)$$

где $K(\lambda)$ – функция Колмогорова, n – объем выборки.

Задавшись уровнем значимости $\alpha=0,1$, имеем значение корня $\lambda_\alpha = 1,224$.

Выводы об адекватности принятой модели основываются на значении статистики

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)| \quad (4)$$

где $F_n(x)$ – эмпирическая функция распределения, $F(x)$ – гипотетическая функция распределения.

Для определения значения статистики D_n по выборке определяются элементы гипотетического распределения. Интересующую нас случайную величину “время хода” обозначим через ρ . Известно, что

$$\mathbb{E}\rho = \alpha_1 \beta, \quad D\rho = \alpha_1 \beta^2. \quad (5)$$

По статистическим данным выборки находится выборочное среднее по формуле

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_j \quad (6)$$

и выборочное среднеквадратичное отклонение

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (p_j - \bar{p})^2} \quad (7)$$

После постановки в формулу (5) $\bar{\rho}$ вместо $\mathbb{E}\rho$, и s_0^2 вместо $D\rho$, решается система уравнений:

$$\begin{cases} \bar{\rho} = \alpha_1 \beta \\ S_0^2 = \alpha_1 \beta^2 \end{cases} \quad (8)$$

Указанная система уравнений решается относительно α_1 и β .

Для вычисления статистики D_n требуется построение вариационного ряда, эмпирической функции распределения и формулы гипотетической функции распределения, соответствующей плотности (1)

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t; \alpha_1, \beta) dt \quad (9)$$

Следующим шагом является расчет приближенного критического значения критерия для выборки по формуле (2). После проведенных вычислений сравниваются значения статистики и критического значения. В случае, когда значение статистики не превышает критическое значение, выдвигаемая гипотеза принимается.

Разработанную методику применяем для анализа реальных данных. Для наглядности исследуются распределения времени хода поездов (в целом по участку) по главному ходу Дальневосточной железной дороги на участке Хабаровск II – Облучье. Проанализируем процесс движения пассажирских поездов, проследовавших в январе 2018 г. в светлое время суток. Объем выборки $n=55$. По статистическим данным выборки находим выборочное среднее по формуле (6) и выборочное среднеквадратичное отклонение по формуле (7):

$$\bar{p} = 367,3, \quad S_0 = 14,3.$$

По формуле (8) получены значения точечных оценок элементов распределения:

$$\alpha_1 \approx 659,8, \quad \beta \approx 0,56.$$

В результате стандартных вычислений определяем величину $D_n = 0,088$. Приближенное критическое значение критерия для данной выборки рассчитано по формуле (2), равно 0,165. Элемент статистики, равный 0,088 значительно меньше критического значения, равного 0,165. Сравнивая значения, делаем вывод о том, что проверяемая статистическая гипотеза не противоречит выборочным данным по критерию Колмогорова с

уровнем значимости 0.1. На рисунке 4 представлены гистограмма, и гипотетическая плотность распределения вероятностей выполнения времени хода для рассматриваемых условий.

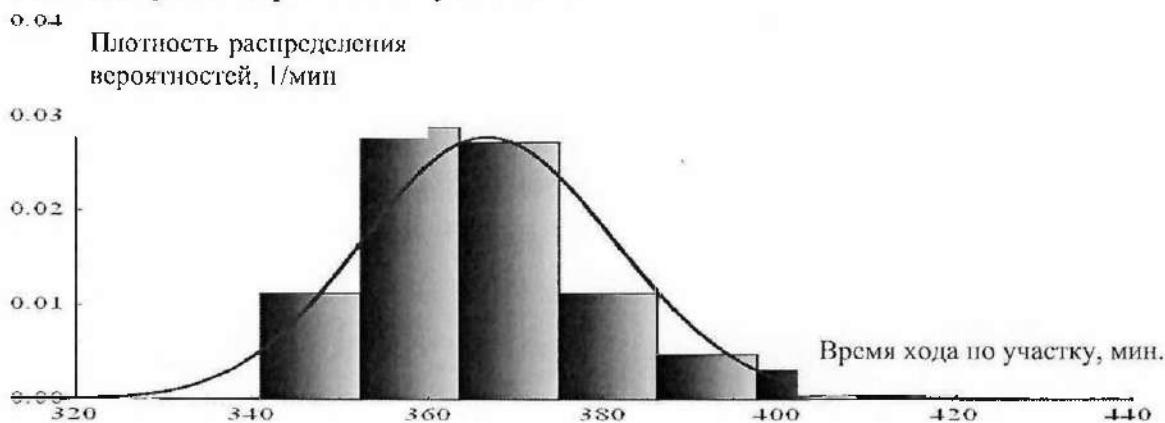


Рисунок 4 – Гистограмма и гипотетическая плотность распределения вероятностей выполнения времени хода

Задавшись уровнем выполнения графика 95 проц., получаем, что необходимо устанавливать графиковое время хода для нечетных поездов для рассмотренного сценария, равное 385 мин. В ходе работы, при помощи программного комплекса АПК «ЭЛЬБРУС», разработан график движения, в котором предусмотрено рассчитанное время хода. В графике движения заложен увеличенный межпоездной интервал, равный 12 мин., при этом количество ниток нечетных поездов составило 60, в которых 33 – нитки соединенных поездов, либо объединенных контейнерных поездов. Общее количество заложенных в график поездов составляет 93. Средняя участковая скорость составляет 60 км/ч. Таким образом, при комплексном использовании технологии спаренного пропуска грузовых поездов и предложенной методики корректировки элементов графика движения, пропускная способность участков остается прежней, при этом, улучшаются показатели точности прибытия грузовых поездов на технические станции и устойчивости графика движения.

В третьей главе представлены результаты исследования выполнения межпоездных интервалов в условиях интенсивного движения, в том числе, при организации движения виртуально-спланированных поездов.

Анализ данных о реальном движении ВСЦ поездов показывает, что в течение 2020 г. на участке Хабаровск 2 – Ружино Дальневосточной железной дороги проведено 137 пар ВСЦ поездов в четном направлении. В ходе

работы проведено исследование по 37 парам. Критериями отбора выборки послужили интервалы по отправлению до 10 мин. (включительно), проследование по всему участку без разъединения, а также отсутствие стоянок на промежуточных станциях вследствие производства работ по модернизации инфраструктуры в период длительных закрытий, обгона приоритетными поездами и отказов технических средств.

В первую очередь в ходе исследования изучены интервалы между ВСЦ поездами по отправлению с железнодорожной станции Хабаровск II и по прибытию на железнодорожную станцию Ружино. Минимальный интервал по отправлению между ВСЦ поездами составляет 5 мин., аналогичный интервал наблюдается и по прибытию на следующую техническую станцию смены локомотивных бригад. Максимальный межпоездной интервал данной выборки составляет 10 мин. по отправлению и 30 мин. по прибытию. По данному параметру наблюдается резкое увеличение интервала.

Разница между максимальным и минимальным значением составляет 20 мин. Средний интервал по отправлению между ВСЦ поездами составляет 8 мин., по прибытию – 13 мин. Разница между средними значениями составляет 5 мин. в сторону увеличения. В ходе исследования установлено, что только в четырех случаях интервал между поездами снижен в течение поездки. Максимально интервал сокращен в сутках 30 декабря 2020 года с 9 мин. по отправлению до 5 мин. прибытию. Только в одном случае интервалы по отправлению и прибытию равны и составили 10 мин.

С целью повышения объективности приведенных расчетов следует отметить, что в пределах исследуемого участка движения ВСЦ поездов не все машинисты использовали рекуперативное торможение и предусмотренный режим автоседения, поэтому дополнительным способом повышения эффективности использования технологии виртуального сцепления является приведение локомотивного парка к номинальным значениям качественных характеристик, а также повышение квалификации машинистов ВСЦ поездов.

В четвертой главе исследуются особенности расходования энергии на тягу при различных вариантах пропуска грузовых поездов. Статистические данные показывают регулярное нарушение грузовыми поездами нормативного времени хода. Данные отвергают предположение о том, что

локомотивные бригады целенаправленно завышают перегонные времена хода для экономии электроэнергии (Таблица 1).

Таблица 1 – Данные по расходу электроэнергии для поездов, свободно следующих по участку Хабаровск II – Облучье

	Нечетные поезда		Четные поезда	
	медленные	быстрые	медленные	быстрые
Абсолютный расход, кВт*ч.	14080	12720	11224	11091
Удельный расход, кВт*ч.	0,019	0,016	0,005	0,005

Проведен сравнительный анализ потребления электроэнергии по группам жестко- и виртуально-сцепленных поездов. Данные по суммарному энергопотреблению сдвоенными поездами представлены в таблице 2. Как видно, в плотном потоке потребление парами ВСЦ поездов на 0,4 проц. выше (в среднем), чем жестко-сцепленных поездов.

Таблица 2 – Суммарное потребление энергии пакетом ВСЦ и жестко-сцепленных поездов (кВт*ч)

Расход	ВСЦ	Жесткая сцепка
Минимальный	22073	26055
Максимальный	39734	41008
Средний	32430	32304

Обнаружено, что расходование энергии жестко-сцепленными поездами при безостановочном движении существенно выше аналогичного показателя для ВСЦ поездов. Это объясняется отсутствием рекуперативного возврата электроэнергии при пропуске поезда с физическим соединением. При движении в плотном потоке аналогичный параметр у жестко-сцепленных поездов несколько ниже, чем при организации пропуска ВСЦ поездов. Причиной этому являются потери скорости и, как следствие, кинетической энергии перед подъемами. Указанные недостатки могут быть устранены путем совершенствования алгоритма регулирования, заложенного в систему автоворедения ведомого поезда.

Соответственно, интенсивное использование технологии жесткого (физического) сцепления в периоды высокой степени использования пропускной способности участка приведет к экономии энергии.

В пятой главе представлена методика экономического обоснования решений по корректировке элементов графика движения поездов. Улучшение степени исполнения графиковой дисциплины сопровождается снижением штрафов за просрочку в доставке грузов. Этот процесс можно описать, используя показатель динамики уменьшения объема штрафных санкций при выполнении той или иной диспетчерской регулировки. Адекватной оценкой при этом может служить степень снижения прибыли по потоку поездов при уменьшении уровня их опозданий.

Чтобы определить показатель эффективности, формализуем задачу определения итогового экономического результата перевозки с учетом потенциального штрафа за просрочку (пени). Прибыль перевозчика формируется как разность дохода (основанного на тарифе) и суммарных расходов. В предлагаемой модели эта величина принимается неизменной в случае, если время доставки груза не превышает предельное значение. Если поезд опаздывает, экономический результат снижается на величину штрафа. В случае линейной зависимости размера штрафа от величины опоздания результат записывается в виде:

$$\Pi = \begin{cases} \Pi_0 & \text{при } T_{\text{пр}} \leq T_0 \\ \Pi_0 - \mathbb{W}_1 t_{\text{оп}} & \text{при } T_{\text{пр}} > T_0 \end{cases} \quad (10)$$

где Π_0 – размер прибыли при пунктуальном прибытии поезда, \mathbb{W}_1 – размер пени за каждые сутки опоздания в доставке груза, $t_{\text{оп}}$ – количество суток опоздания, T_0 , $T_{\text{пр}}$ – плановый и фактический моменты прибытия.

Модель формирования экономического результата грузовой перевозки представлена в графическом виде на рисунке 5.

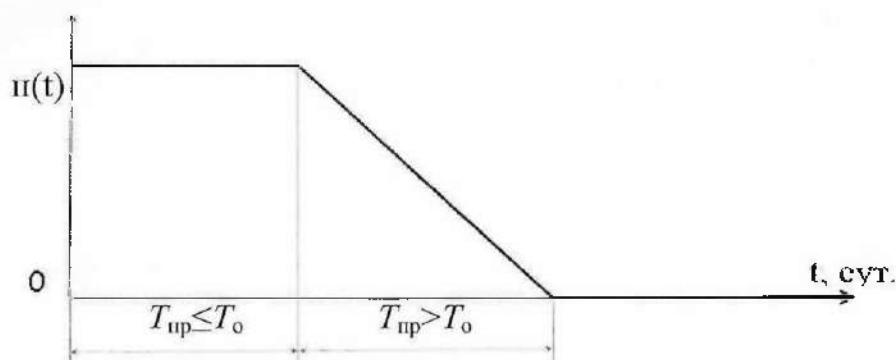


Рисунок 5 – Зависимость экономической эффективности от пунктуальности перевозки (фактически выполненных сроков доставки)

Определим протяженность временного интервала от момента окончания нормативного срока доставки до момента, когда перевозка осуществляется с нулевой прибылью. Для этого используем зависимость величины прибыли от сроков доставки:

$$\pi(t) = r * (1 - N_{on} * \delta) \quad (11)$$

где $\pi(t)$ – экономическая эффективность отдельной отправки, руб., r – размер платы за перевозку отдельной отправки, N_{on} – нарушение установленных сроков доставки, сут; δ – относительный размер пени за сутки просрочки (0,06); N_{on} определяется формулой:

$$N = t_{норм} - t_{фактич} \quad (12)$$

где $t_{норм}$ – установленный срок доставки, $t_{фактич}$ – фактический срок осуществления перевозки.

Суммарная экономическая эффективность всех принятых к перевозке отправок определяется по формуле:

$$\Pi(t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K (\pi_{ij}) \quad (13)$$

где M – число поездов, K – число отправок в каждом поезде.

Очевидно, диспетчерский персонал должен уделять внимание, предпринимать регулировочные меры к тем поездам, которые подвержены риску прибытия на станцию назначения во втором периоде – зоне вероятного появления штрафных санкций.

Для оценки качества управления удобно использовать показатель коэффициента экономической эффективности:

$$K_{\Pi} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K \frac{\pi_{ij}}{r_j} \longrightarrow 1 \quad (14)$$

Коэффициент экономической эффективности варьируется в пределах от 0 до 1. Чем ниже данный показатель, тем хуже организована перевозка, выше уровень штрафных мер к перевозчику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Предложена методика корректировки элементов графика движения в комплексе с организацией движения виртуально-, жестко-цепленных поездов, а также объединенных контейнерных поездов на грузонапряжном направлении железной дороги, позволяющая повысить устойчивость графика на 20 проц.
2. Проведены базовые эксперименты по исследованию энергопотребления виртуально-цепленными грузовыми поездами при обеспечении их беспрепятственного пропуска. Определено, что в этом случае можно достичь значительной экономии по сравнению с пропуском жестко-цепленных поездов, составляющей 17 проц. от полного расхода энергии.
3. Обоснован математический подход к расчету длительности операций, соответствующих элементам графика, с использованием вероятностного моделирования траекторий движения поездов. График, построенный с учетом вероятности нетграфиковых задержек, позволил увеличить фактическую точность прибытия грузовых поездов, следующих на договорной основе по Дальневосточной железной дороге на 5,5 проц., а точность прибытия остальных грузовых поездов на 6,1 проц. (в 2021 г. по отношению к 2020 г.)
4. Определено наличие обратной корреляционной связи между межпоездными интервалами при отправлении с узловой станции и элементами соплощения времени хода поездов по направлению (участку) в условиях интенсивного потока, в том числе, при использовании технологии вождения виртуально-цепленных поездов.
5. Предложены сферы применения и условия реализации спарского пропуска грузовых поездов на направлении с высоким заполнением пропускной способности. Рациональное применение методики сдавливания грузовых поездов в зависимости от эксплуатационной обстановки позволило организовать пропуск 90 поездов на междорожный стыковой пункт Архара (на 5 поездов выше технического плана), а также достичь экономии удельного расхода электроэнергии в октябре 2021 г. более 10 кВт*ч/10 тыс. ткмбр при организации движения виртуально-цепленных поездов.

6. Исследование эффективность объединения контейнерных поездов при организации движения на Дальневосточной железной дороге. Применение технологии позволило за два месяца 2022 г. сэкономить 235 позиций графика, 487 рабочих смен локомотивных бригад по четырем депо дороги, 4,04 млн. руб. фонда оплаты труда локомотивных бригад, 1500,1 тыс. кВт*ч электроэнергии, а также увеличить показатель среднего веса поезда на 15,2 тонны и производительность локомотива на 5,5 тыс. т*км брутто среднесуточно.

7. Предложен показатель экономической эффективности при организации диспетчерских регулировочных действий для оценки графика исполненного движения. Разработанное в рамках исследования предложение привело к улучшению показателя надежности соблюдения сроков доставки. В 2020 г. надежность доставки увеличена на 5,1 проц. по отношению к уровню 2019 г.

8. На грузонапряженном направлении железной дороги рекомендуется применение математического подхода к расчету длительности операций, соответствующих элементам графика движения грузовых поездов, в комплексе с организацией движения спаренных поездов.

9. Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является выявление новых закономерностей, характеризующих динамику потока поездов, посредством введения новых возможных сценариев, варьирования факторов и отбора соответствующей статистики. Это позволит перейти к автоматизации аддитивной подстройки графика движения поездов в режиме реального времени.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях

1. Эсаулов, В. А. Эффективность пропуска спаренных грузовых поездов / В. А. Эсаулов, Б. И. Давыдов, К. Н. Никитенко, А. Г. Лазарев // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 2. – С. 69-78.
2. Мединцев, Е. В. Оптимальное распределение средств локомотивной тяги на полигоне со сложным рельефом / Е. В. Мединцев, В. А. Эсаулов, Т. Н. Каликина, Б. И. Давыдов, В. Н. Гопкало // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 10. – С. 10-14.

б) в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus:

3. Basic Framework for Adjusting the Freight Train Schedule / B. Davydov, V. Gopkalo, V. Esaulov, K. Kablukova // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Vol. 11620 LNCS. – P. 162-176.
4. Davydov, B. Methodology for Optimal Solution Search during the Freight Train Schedule Creation / B. Davydov, V. Esaulov, V. Gopkalo // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Science and Technology Conference "EarthScience", Russky Island, 10–12 декабря 2019 года. – Russky Island: IOP Publishing, 2020. – P. 22-36.

в) в материалах конференций:

5. Эсаулов, В. А. Использование показателя доходности при оптимизации процесса пропуска грузовых поездов / В. А. Эсаулов, Б. И. Давыдов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018) : Труды седьмой научно-технической конференции, Москва, 14 ноября 2018 года. – Москва: Акционерное общество "Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте", 2018. – С. 92-95.
6. Эсаулов, В. А. Обоснование параметров графика движения грузовых поездов / В. А. Эсаулов, Б. И. Давыдов, В. Н. Гопкало // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019) : труды Восьмой научно-

технической конференции, Москва, 21 ноября 2019 года. – Москва: Акционерное общество "Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте", 2019. – С. 127-131.

7. Эсаулов, В. А. Методика повышения пунктуальности грузовых перевозок на железнодорожном транспорте / В. А. Эсаулов // Молодые ученые - Хабаровскому краю : Материалы XXIII краевого конкурса молодых ученых, Хабаровск, 12–19 января 2021 года. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2021. – С. 197-202.

8. Давыдов, Б. И. Методологические принципы текущего управления движением потока грузовых поездов / Б. И. Давыдов, В. И. Чеботарев, В. А. Эсаулов // Открытые эволюционирующие системы: цифровая трансформация : тезисы международной научной конференции : посвящающейся 85-летию образования ДВГУПС, 20-летию Международной научной конференции «Открытые эволюционирующие системы», Хабаровск, 08–09 июля 2022 года / Министерство транспорта Российской Федерации Федеральное агентство железнодорожного транспорта Дальневосточная железная дорога - филиал ОАО «РЖД»; Дальневосточный государственный университет путей сообщения. – Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 8-9.

Эсаулов Вячеслав Александрович

МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОПУСКА ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ НА ГРУЗОНАГРЯЖЕННОМ НАПРАВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

2.9.4. Управление процессами перевозок

Подписано в печать «__» 202__ г. Заказ №
Объем 1,5 усл. л.л. Тираж 80 экз.

Отпечатано в типографии Издательства ДВГУПС