

На правах рукописи



Болотский Дмитрий Николаевич

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И РИСКОВ
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ
ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА

Специальность 05.02.22 – Организация производства (транспорт)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта»

Научный руководитель: Линьков Владимир Иванович, доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Долгий Игорь Давидович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте».

Черезов Григорий Анатольевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита состоится 16 декабря 2020 г., в 13:00 на заседании диссертационного совета Д218.005.09 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 1235.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.и.н, профессор

Тарасова Валентина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Спецификой железных дорог в процессе оказания транспортных услуг является необходимость использования большого количества объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Эксплуатация железнодорожной транспортной инфраструктуры требует существенных трудовых, материальных и финансовых затрат. Ситуация усложняется тем, что железнодорожная транспортная инфраструктура как совокупность технических систем, обладает такими специфическими характеристиками как определенные уровни надежности и безопасности, которые принципиально не могут быть абсолютными. Как следствие, при реализации производственного процесса эксплуатации объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры возникают различные отказы и другие инциденты, случайные по своей природе и имеющие различные последствия, требующие дополнительных экономических затрат на их устранение, а также приводящие к экономическим потерям из-за непосредственного влияния состояния железнодорожной транспортной инфраструктуры на перевозочный процесс. Величина экономических потерь сложным образом зависит от уровней надежности и безопасности объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры, а также от особенностей их технической эксплуатации. При этом ущерб, связанный с отказами объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры, может быть весьма значителен, учитывая, что в настоящее время по различным оценкам от 60% до 80% объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД» функционирует с превышением нормативного срока эксплуатации. Вышеуказанные обстоятельства делают проблему оценки влияния состояния железнодорожной транспортной инфраструктуры на перевозочный процесс весьма актуальной.

Учет и прогнозирование рисков возникновения экономических потерь вследствие отказов объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта является непростой задачей, но еще сложнее решить обратную задачу, когда задается допустимый уровень экономических рисков, на основе которого следует определить требуемый уровень надежности и качества эксплуатации объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры на заданном участке железных дорог.

В рамках указанных проблем и с целью повышения эффективности производственного процесса технической эксплуатации объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры, а также привлекательности услуг компании на рынке транспортных перевозок в последние годы ОАО «РЖД» активно внедряет методологию управления ресурсами, рисками и анализа

надежности железнодорожной техники (УРРАН). Цель внедрения методологии – эффективное распределение ограниченных производственных ресурсов транспортной компании для обеспечения необходимого уровня надежности функционирования объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры и допустимого уровня безопасности перевозочного процесса с учетом возникающих экономических рисков.

В связи с этим в настоящее время весьма актуальной является задача разработки методов оценки качества организации производственного процесса эксплуатации объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры с учетом уровня надежности и безопасности их функционирования, а также возникающих при этом технических и экономических рисков.

Степень разработанности темы исследования. Проблема оценки технических и экономических рисков, связанных с надежностью и безопасностью железнодорожной транспортной инфраструктуры непосредственно в рамках методологии УРРАН, рассматривались в работах Безродного Б.Ф., Веселовой А.С., Горелика А.В., Замышляева А.М., Неварова П.А., Орлова А.В., Солдатов Д.В., Тарадина Н.А., Шалягина Д.В., Шубинского И.Б. и ряда других исследователей.

Однако, следует отметить, что экономический аспект методологии УРРАН в управлении надежностью, вопрос оценки качества эксплуатации железнодорожной инфраструктуры с позиции организационно-экономической надежности производственного процесса в настоящее время исследованы не в полной мере. Недостаточная теоретико-методологическая проработанность данной проблемы и определили цели и задачи настоящего диссертационного исследования.

Цель и задачи диссертационного исследования. Целью диссертационной работы является исследование взаимосвязи между показателями надежности функционирования объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры и уровнем технических и экономических рисков, на основе моделирования процесса эксплуатации объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать основные влияющие факторы и разработать математические модели, описывающие количественные характеристики процессов возникновения и устранения различных инцидентов, связанных с эксплуатацией объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

2. Разработать имитационную модель, позволяющую провести статистический анализ взаимосвязи между уровнем технических рисков в виде задержек в движении поездов в течение времени устранения отказов объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры, характеристиками производственного процесса эксплуатации и уровнем надежности объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

3. Разработать метод обработки результатов статистического моделирования и оценки уровня технических и экономических рисков, связанных с функционированием объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

4. Разработать метод оценки организационно-технологической надежности перевозочного процесса с учетом экономических и технических рисков, связанных с эксплуатацией объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

Объектом исследования является производственный процесс эксплуатации объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

Предметом исследования является анализ взаимосвязь между уровнем надежности функционирования объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры и соответствующими техническими и экономическими рисками, возникающими при реализации производственного процесса технической эксплуатации, а также оценка организационно-технологической надежности перевозочного процесса с учетом состояния объектов транспортной инфраструктуры.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Объект, предмет и методы исследования находятся в рамках паспорта специальности 05.02.22 «Организация производства (транспорт)», а именно пункту 9 «Разработка методов и средств организации производства в условиях технических и экономических рисков» и пункту 8 «Развитие теоретических основ и практических приложений организационно-технологической и организационно-экономической надежности производственных процессов. Оценка уровня надежности и устойчивости производства».

Научная новизна исследования:

1. Разработаны имитационная статистическая модель и технологический алгоритм, позволяющие исследовать взаимосвязь между показателями надежности функционирования объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта и уровнем экономических рисков, связанных с их эксплуатацией.

2. Предложена модель и обоснован метод анализа уровня надежности объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры, учитывающий статистические данные об отклонениях от норм содержания и предотказных состояниях объектов с помощью модели Генриха.

3. Разработан метод обработки результатов статистического моделирования и оценки уровня технических и экономических рисков, связанных с функционированием объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры. Предложено для объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры понятие «функциональный ресурс» как комплексная характеристика качества производственного процесса технической эксплуатации транспортной инфраструктуры. Предложена номенклатура качественных и количественных показателей функционального ресурса объектов инфраструктуры

железнодорожного транспорта.

4. Предложен и обоснован метод оценки организационно-технологической надежности перевозочного процесса на основе анализа функционального ресурса железнодорожной транспортной инфраструктуры.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработанные в ней методы, инструменты (модель и алгоритм) позволяют осуществлять научно обоснованный анализ взаимосвязи между уровнем надежности объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры и экономическими рисками, связанными с реализацией перевозочного процесса. Кроме того, разработанные методы и модели позволяют осуществить обоснованную оценку целесообразности применения тех или иных технических систем железнодорожной транспортной инфраструктуры в различных условиях при реализации производственного процесса технической эксплуатации. Разработанные модели детализируют и расширяют механизм реализации внедряемой в ОАО «РЖД» методологии УРРАН.

Практическая значимость полученных в работе результатов заключается в том, что в процессе выполнения работы получены математические модели и методы, которые могут быть использованы в качестве основы для разработки программных модулей автоматизированных информационных систем железнодорожного транспорта, предназначенных для проведения анализа эффективности функционирования объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры и распределения материальных, трудовых и финансовых ресурсов. Полученные в ходе исследования научно-практические результаты и рекомендации могут быть использованы ОАО «РЖД» и иными организациями, деятельность которых связана с производственным процессом эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры, для оценки организационно-технологической надежности производства, выработки управленческих решений, направленных на повышение надежности и качества производственного процесса эксплуатации объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

Кроме того, с целью повышения уровня надежности производственного процесса технической эксплуатации объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры, в частности объектов электроснабжения железнодорожного транспорта, автором диссертации в соавторстве с известными специалистами разработаны система и способ непрерывного мониторинга состояния контактной сети рельсового транспорта, которые защищены патентом Российской Федерации.

Методология и методы исследований. При проведении исследования использовались методы системного, функционального и факторного анализа, методы математической статистики, теории вероятностей. Разработанные в

диссертации методы и модели основаны на моделях риск-менеджмента, методах имитационного моделирования, моделях надежности технических систем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Технологический алгоритм сбора, обработки и формализации статистических данных, необходимых для оценки технических и экономических рисков производственного процесса эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры.

2. Имитационная модель оценки технических и экономических рисков, связанных с отказами и инцидентами в работе объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры и ее математическое и алгоритмическое обеспечение.

3. Метод оценки организационно-технологической надежности перевозочного процесса на основе анализа функционального ресурса объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

4. Метод обработки результатов статистического моделирования и оценки уровня технических и экономических рисков, связанных с функционированием объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

Достоверность результатов исследований в диссертационной работе обеспечивается корректностью исходных математических положений, результатами статистической проверки адекватности математических моделей, обоснованностью принятых допущений. Адекватность математических методов и моделей, представленных в диссертации, также подтверждается положительными результатами их практической апробации на сети железных дорог.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и симпозиумах: научно-технической конференции «Наука МИИТа – транспорту – 2007» г. Москва (2007), девятой и десятой научно-практических конференциях «Безопасность движения поездов», г. Москва (2008 г. и 2009 г.), пятой Международной научно-практической конференции «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте «ТрансЖАТ-2010», г. Ростов-на-Дону (2010 г.), международных симпозиумах «Надежность и качество», г. Пенза, (2014 г. и 2015 г.), XII международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту»-г. Самара (2019 г.).

Методика оценки качества систем железнодорожной автоматики и телемеханики с учетом их функционального ресурса, а также методы статистической оценки влияния отказов технических средств железнодорожной автоматики и телемеханики на показатели перевозочного процесса прошли апробацию на сети российских железных дорог и используются на этапе опытной эксплуатации в автоматизированной системе статистического анализа показателей надежности и прескриптивного управления хозяйством автоматики и телемеханики

(АС АНПШ).

Внедрение результатов исследования. Осуществлено внедрение основных результатов, полученных в диссертации, в ОАО «РЖД»: при реализации проекта модернизации железнодорожного участка Хойт-Замынь Уд Улан-Баторской железной дороги, при разработке и эксплуатации технических средств интервального регулирования движения поездов.

Основные модели и методы, представленные в диссертационном исследовании, использованы в нескольких нормативных документах ОАО «Российские железные дороги», в том числе:

- Методические указания «Управление надежностью функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики на основе методологий ALARP и УРРАН» (утверждена распоряжением № 2651/р от 23.12.2016 г.).

- Методика оценки функционального ресурса технических средств железнодорожной автоматики и телемеханики (утверждена ОАО «РЖД» 21 ноября 2015 г.).

В перспективе наиболее актуальной задачей является автоматизация предложенных автором методов и методик оценки эффективности производственного процесса эксплуатации объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Решение данной задачи запланировано в Дорожной карте реализации проекта «Цифровая трансформация процессов хозяйства автоматики и телемеханики», утвержденной заместителем генерального директора ОАО «РЖД» - начальником Центральной дирекции инфраструктуры Г.В. Верховых 31 мая 2019 г. № 678.

Публикации. Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в 26 печатных работах соискателя (из них 21 в соавторстве), в том числе 5 печатных работ опубликованы в изданиях, которые соответствуют перечню рецензируемых изданий для опубликования научных результатов диссертации на соискание ученой степени (по специальности 05.02.22 «Организация производства (транспорт)'), 6 работ опубликованы в материалах международных научно-практических конференций), получено два патента РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 83 наименований, 5 приложений. Диссертация изложена на 182 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе выполнена общая постановка задачи, проведен анализ отказов объектов железнодорожной инфраструктуры и их экономических последствий. Выявлено, что отказы и нарушения безопасности, связанные с эксплуатацией объектов транспортной инфраструктуры, приводят к существенным экономическим потерям. С целью рационализации расходов на содержание железнодорожной инфраструктуры и обеспечения качества процесса железнодорожных перевозок проведен сравнительный анализ европейской методологии RAMS и внедряемой в настоящее время компанией ОАО «РЖД» методологией УРРАН. В результате анализа выявлено, что у методологии RAMS по сравнению с УРРАН имеется ряд недостатков, таких как отсутствие охвата аспекта «долговечность», предусмотренного отечественными стандартами, практически полное отсутствие учета влияния человеческого фактора на показатели качества производственного процесса, отсутствие механизмов управления затратами на содержание и модернизацию объектов инфраструктуры на этапах жизненного цикла и рядом других. Методология УРРАН в отличие от RAMS изначально нацелена на обеспечение эффективности перевозочного процесса, а надежность и безопасность функционирования технических средств должна обеспечиваться настолько, насколько это необходимо для обеспечения заданных характеристик перевозочного процесса с учетом возникающих при этом экономических и технических рисков. В связи с этим методология УРРАН должна предусматривать прозрачный переход от показателей надежности конкретных технических объектов к показателям эксплуатационной деятельности транспортной компании и ее структурных подразделений.

Выявлено, что анализ экономических рисков, связанных прежде всего и с производственной деятельностью, является основой методологии УРРАН. По сути, приемлемая величина риска должны быть настолько низкой, насколько это экономически оправданно и технически достижимо.

Таким образом, актуальной является задача разработки научно обоснованных моделей и методов, позволяющих установить взаимосвязь между допустимыми значениями показателей надежности функционирования объектов железнодорожной инфраструктуры и величиной экономических потерь, вызванных отказами этих объектов, с учетом различных условий эксплуатации.

В данной главе также приведен системный анализ процессов, влияющих на уровень экономических издержек, связанных с эксплуатацией объектов железнодорожной инфраструктуры: процесса движения поездов на различных

участках, процесса отказов и восстановлений после отказов объектов инфраструктуры с учетом влияния человеческого фактора. Выявлено, что целесообразно временные характеристики указанных процессов описывать как случайные величины, также вероятностный характер будет носить и оценка экономического ущерба.

В качестве метода моделирования обосновано использование имитационного моделирования методом Монте-Карло, определены этапы моделирования.

Вторая глава посвящена разработке модели и методов анализа и формализации процессов и устранения возникновения различных инцидентов, связанных с эксплуатацией объектов железнодорожной инфраструктуры.

В рамках проведенного анализа выявлены и классифицированы исходные данные, необходимые для оценки технических рисков функционирования железнодорожной транспортной инфраструктуры и определена их взаимосвязь с исходными данными, используемыми при оценке экономических рисков. Результаты классификации исходных данных, используемых при анализе оценке технических и экономических рисков, представлены на рисунке 1.

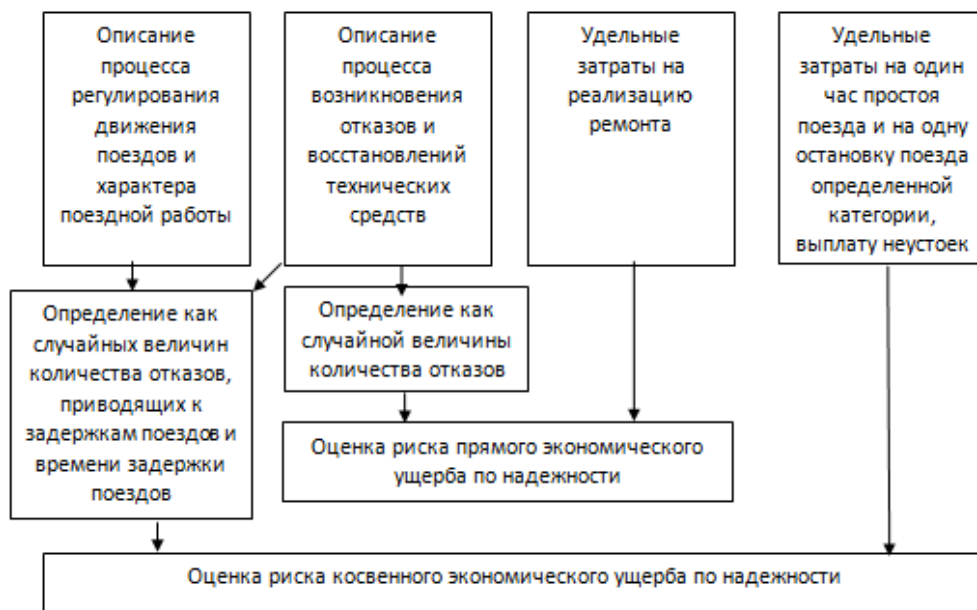


Рисунок 1. Исходные данные для оценки технических и экономических рисков функционирования железнодорожной инфраструктуры

Анализ выявил основные источники экономических рисков:

- прямые затраты на реализацию процесса устранения отказов элементов инфраструктуры (внеплановый ремонт) в случае их возникновения;
- косвенные издержки, связанные с возможными задержками в движении поездов, в виде снижения участковой скорости, либо дополнительных остановок, а также выплатой штрафов и неустоек при задержках в сроках доставки и прочих случаях;

– прямые и косвенные издержки, связанные с устранением последствий опасных отказов железнодорожной инфраструктуры.

В отличие от известных подходов с целью повышения объективности оценки функционирования железнодорожной транспортной инфраструктуры предложено дополнить статистические данные об отказах объектов инфраструктуры сведениями (замечаниями) об отклонениях от норм содержания этих объектов, а также статистическими данными о предотказных состояниях.

Предложено на основе данных о надежности железнодорожной инфраструктуры определять уровень технических рисков, а методом удельных экономических затрат - уровень экономических рисков.

Для последующего выполнения статистического имитационного моделирования требуется выполнить формализацию временных характеристик следующих процессов, связанных с технической эксплуатацией объектов железнодорожной инфраструктуры:

- процессов возникновения отказов, регистрации замечаний и предотказных состояний;
- процесса восстановления работоспособного состояния;
- процесса перехода объекта инфраструктуры в активное состояние – состояние, когда объект в рассматриваемый промежуток времени участвует в обеспечении конкретного процесса движения поезда;
- процесса перехода объекта инфраструктуры в пассивное состояние – состояние, когда объект в рассматриваемый промежуток времени не участвует в процессе движения поезда.

Формализация характеристик перечисленных процессов, путем описания их как случайных величин, распределенных по различным вероятностным законам, целесообразно выполнить методом моментов. Проверка адекватности распределений выполняется с помощью соответствующих критериев, например с помощью критерия Пирсона.

В результате были определены виды вероятностных распределений и их численные характеристики.

На рисунке 2 в качестве примера представлены эмпирические и теоретические плотности вероятности времени до восстановления объекта железнодорожной инфраструктуры и времени ее активного состояния (применительно к объекту железнодорожной автоматики и телемеханики).

В связи с тем, что интервалы времени между отказами, замечаниями и предотказными состояниями распределены по одному и тому же закону целесообразно для имитационного моделирования формировать из них суммарный простейший поток, интенсивностью λ_T , а при проведении имитационного

моделирования подвергать его вероятностному разрежению по формулам:

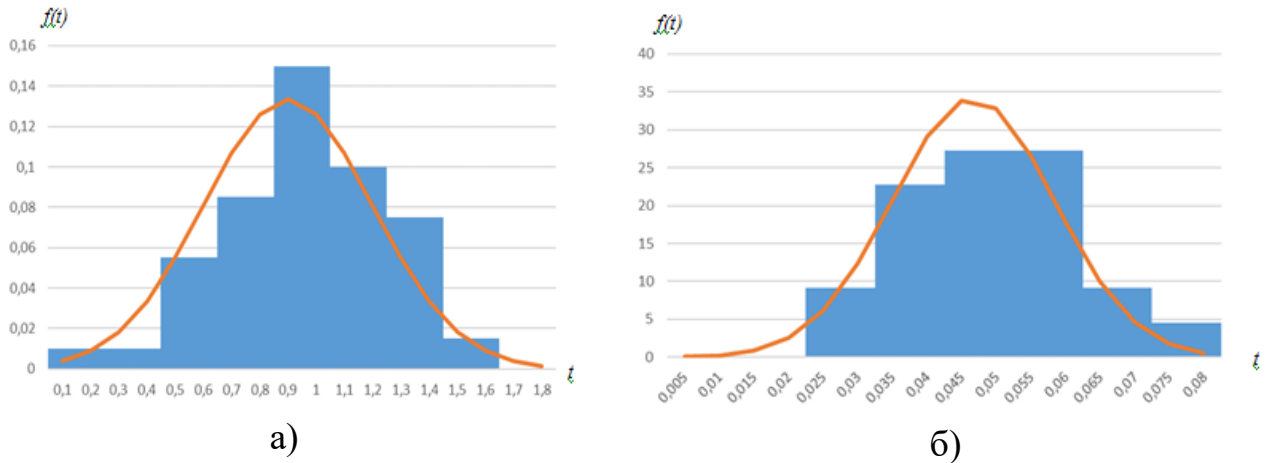


Рисунок 2 – Эмпирические и теоретические плотности вероятности:

- (а) – времени до восстановления объекта железнодорожной инфраструктуры
 (б) – времени активного состояния объекта железнодорожной инфраструктуры

$$\lambda_o = \lambda_T \cdot \frac{n_o}{N}, \lambda_{зам} = \lambda_T \cdot \frac{n_{зам}}{N}, \lambda_{пред} = \lambda_T \cdot \frac{n_{пред}}{N}, \quad (1)$$

где λ_o , $\lambda_{зам}$, $\lambda_{пред}$ – интенсивность потока отказов, замечаний и предотказных состояний соответственно;

N – общее количество зарегистрированных событий;

n_o , $n_{зам}$, $n_{пред}$ – зарегистрированное количество отказов, замечаний и предотказных состояний соответственно.

В данном исследовании также рассмотрены методы и методики учета экономических издержек, необходимых для перехода от технических рисков к экономическим. Для удобства расчетов предложено использовать метод удельных издержек применительно к одному отказу объекта железнодорожной инфраструктуры. Прямые экономические издержки C_{np} предложено выражать по формуле:

$$C_{np} = (C_{зип} + C_{рем} + C_{дост}) \cdot k_{изб}, \quad (2)$$

где $C_{зип}$, $C_{рем}$, $C_{дост}$ – средняя стоимость запасных частей и приспособлений, стоимость ремонта, стоимость доставки материалов и персонала к месту отказа соответственно;

$k_{изб}$ – коэффициент избыточных замен для соответствующих объектов инфраструктуры.

Удельную величину затрат, связанных с задержками в движении поездов, предложено вычислять по схеме расчетов укрупненных норм эксплуатационных расходов на одну остановку C_o^n и простой грузового $C_{спн}^э$ и пассажирского $C_{пасн}^э$ поезда.

Удельную величину внешнего экономического ущерба $C_{\text{комп}}(t)$ предложено определять путем одномерной аппроксимации от времени задержки поездов:

$$C_{\text{комп}}(t) = f(T_{\text{зад}}), \quad (3)$$

а удельную величину упущенной выгоды $C_{\text{утуц}}(t, f)$ - как результат двумерной аппроксимации по времени задержки и количеству срывов сроков поставки в единицу времени.

Полученные в этой главе формальные модели отдельных процессов были использованы при разработке имитационной модели и методики обработки результатов моделирования для оценки уровня технических и экономических рисков, связанных с производственным процессом эксплуатации объектов инфраструктуры железнодорожной транспортной инфраструктуры.

Третья глава посвящена разработке имитационной модели, позволяющей проводить статистический анализ взаимосвязи между уровнем технических рисков в виде задержек в движении поездов в течение времени устранения инцидентов, связанных с функционированием объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры, характеристиками производственного процесса эксплуатации и уровнем надежности объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры. Модель была разработана в соответствии с выделенными в первой главе этапами. В частности, были разработаны математические модели генераторов случайных величин, общий алгоритм модели и алгоритмы реализации отдельных процедур, определен перечень показателей, значения которых следует фиксировать в качестве результатов статистического моделирования. Также в данной главе разработан алгоритм обработки результатов моделирования с целью определения уровня экономических рисков в зависимости от уровня надежности объекта железнодорожной инфраструктуры.

Учет замечаний и предотказных состояний в имитационной модели предложено реализовать на основе модели Генриха, широко используемой в риск-менеджменте. Проведенный статистический анализ исходных данных показал, что соотношение 1/30, применяемое в данной модели, применимо для описания процессов перехода в отказы предотказных состояний и замечаний.

Обобщенная блок-схема алгоритма имитационной модели функционирования объектов железнодорожной инфраструктуры для оценки технических и экономических рисков, представлена на рисунке 3.

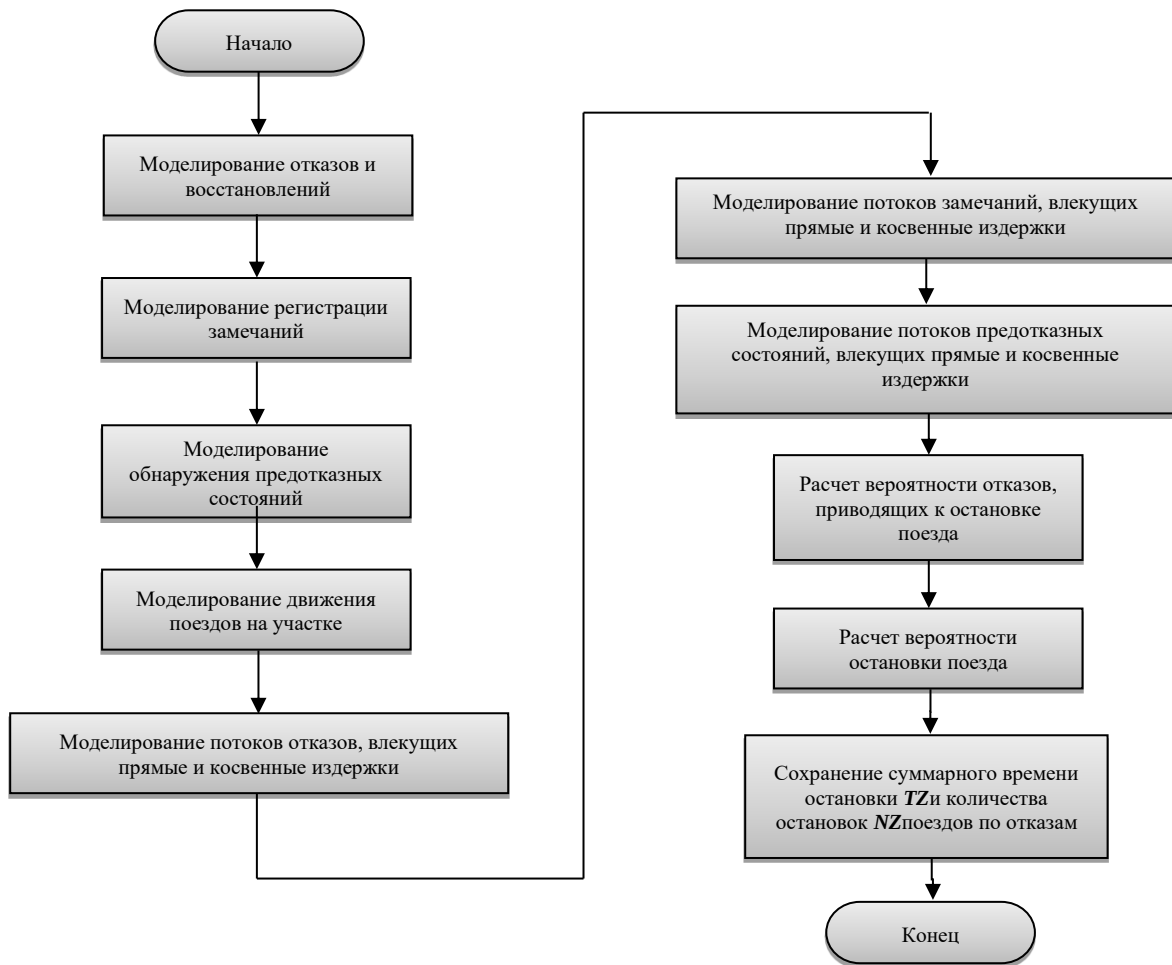


Рисунок 3 – Блок-схема обобщенного алгоритма имитационной модели

Алгоритм моделирования процессов регистрации устранения отклонений от норм содержания (замечаний) представлен на рисунке 4.

Для каждого закона распределения случайных величин, используемых в имитационной модели процесса функционирования объектов железнодорожной инфраструктуры, был разработан свой генератор случайной величины. Например, математическая модель генератора случайной величины для нормального закона реализована на основе стандартного датчика равномерно распределенной случайной величины из диапазона $[0,1]$.

Учитывая, что временные характеристики реальных процессов в отличие от вероятностных принадлежат ограниченному диапазону значений в имитационной модели обоснованно использование усеченных вероятностных распределений.

Примеры, полученных с учетом сделанных замечаний, параметров настройки генераторов случайных величин приведены в таблице 1

С помощью полученной имитационной модели реализуется моделирование статистических данных о характеристиках исследуемых процессов функционирования объектов железнодорожной инфраструктуры.

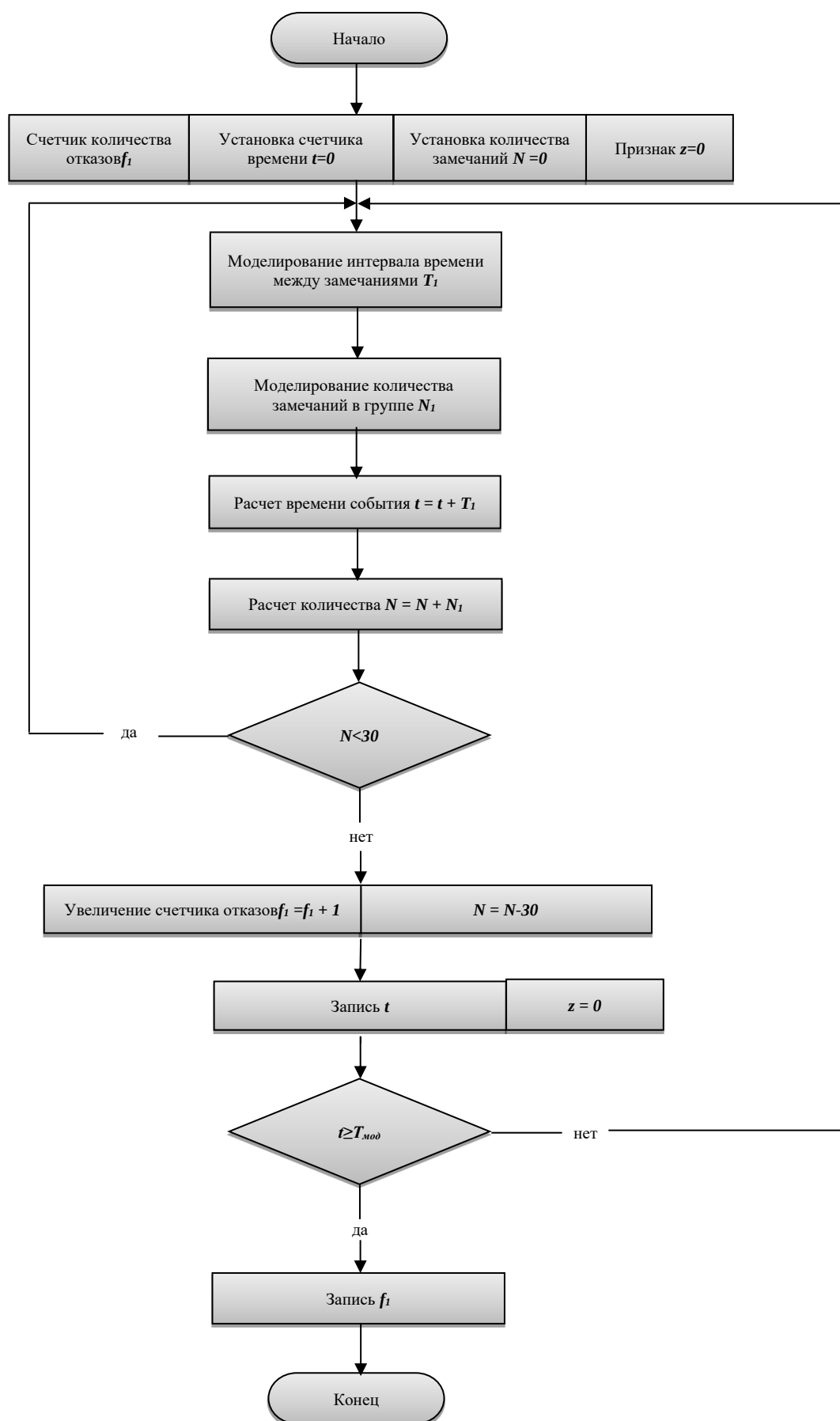


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма моделирования процессов регистрации и устранения замечаний

Таблица 1– Параметры настройки генераторов случайных величин (фрагмент)

Характеристика	Тип генератора случайной величины	Номер генератора	Параметры	Ограничения
Время нахождения железнодорожной инфраструктуры в пассивном состоянии	Г (Гамма-распределение)	1	$\alpha = 0.11$ $\beta = 1$	$t_n = 0,0166$ ч $t_k = 120$ ч
Время нахождения железнодорожной инфраструктуры в активном состоянии	Н (Нормальное распределение)	1	$m = 0.0467$ ч $\sigma = 0.0117$ ч	$t_n = 0,0166$ ч $t_k = 120$ ч
Наработка между двумя последовательными отказами	Э (Экспоненциальное распределение)	1	$\lambda_o = 0.00013$ 1/ч	$t_n = 0$ ч $t_k = 10000$ ч
Количество предотказных состояний	Э (Экспоненциальное распределение)	7	$\lambda_N = 0.374$	$N_n = 0$ $N_k = 100$

Формально результаты моделирования представляют собой кортеж статистических данных (упорядоченное множество) Z вида:

$$Z = \langle t, z, u, Tz, Nz \rangle, \quad (4)$$

Где t - время возникновения события;

z тип события (отказ или восстановление);

u влияние события на поток движения поездов;

Tz суммарное время задержки поезда;

Nz суммарное количество задержанных поездов

На основе данных кортежа (4) могут быть рассчитаны следующие показатели:

– вероятность отказа объекта железнодорожной инфраструктуры:

$$P_{отк} = 1 - e^{-\lambda_o \cdot t}. \quad (5)$$

-вероятность того, что отказ объекта железнодорожной инфраструктуры вызовет задержку поезда:

$$P_{oa} = \frac{mz}{f} \quad (6)$$

где f – общее количество смоделированных отказов;

mz – количество смоделированных отказов, вызвавших задержку поездов;

а также построены плотности вероятности времени задержки поездов и количества задержанных поездов.

Для плотности вероятности времени задержки поездов и количества задержанных поездов требуется задать уровни доверительной вероятности и осуществить интервальную оценку (оценку максимального значения, которая с заданной вероятностью не будет превышена):

$\Delta_1 = T_n(P)$ – времени задержки поездов из-за отказа;

$\Delta_2 = N_n(P)$ – количества задержанных поездов из-за отказа.

Оценка экономического риска, обусловленного уровнем надежности объекта железнодорожной инфраструктуры рассчитывается по формулам:

– прямой экономический риск по надежности железнодорожной инфраструктуры:

$$R_{пр н} = P_{отк} \cdot C_{пр}^н, \quad (7)$$

где $C_{пр}^н$ – удельные прямые затраты по надежности;

– косвенный экономический риск по надежности железнодорожной инфраструктуры:

$$R_{кос н} = P_{оа} \cdot (C_{внут} + C_{внеш}), \quad (8)$$

где $C_{внут}$, $C_{внеш}$ – удельные внешние и внутренние потери на один отказ, обусловленные задержками в движении поездов.

Полученные в результате моделирования и обработки результатов уровни экономических рисков соответствуют текущему уровню надежности объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

Четвертая глава посвящена вопросу оценки качества производственного процесса технической эксплуатации железнодорожной инфраструктуры. Для комплексной оценки качества эксплуатации инфраструктуры железнодорожного транспорта предложено использовать понятие «функциональный ресурс» объекта железнодорожной инфраструктуры.

Функциональный ресурс определяет потенциальную возможность применения объекта (множества объектов, отдельной системы) транспортной инфраструктуры в различных условиях эксплуатации и характеризует количество и качество реализуемых ей функций.

Функциональный ресурс предложено оценивать на основе совокупности количественных и качественных показателей функционального ресурса, учитывающих специфику функциональных требований, предъявляемых к объектам железнодорожной инфраструктуры на станции или перегоне.

Количественные показатели выражаются численными значениями и включают в себя коэффициент использования пропускной способности

железнодорожной линии k , интенсивность отказов λ и интенсивность опасных отказов λ_o , которые на различных этапах жизненного цикла объекта могут быть оценены допустимыми, проектными, либо фактическими значениями.

Качественные показатели определяются значениями «да» или «нет» и отражают перечень обязательных и дополнительных функциональных требований, предъявляемых к объекту железнодорожной инфраструктуры. В диссертации оценка функционального ресурса проведена на примере систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), как объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Результирующие количественные показатели для новых и находящихся в эксплуатации систем ЖАТ представлены в таблице 2

Таблица 2 – Результирующие показатели, используемые при оценке функционального ресурса систем ЖАТ

Результирующий показатель	Система ЖАТ	
	Новая система ЖАТ	Находящаяся в эксплуатации система ЖАТ
Z_1	$Z_1 = \begin{cases} k_{np} \geq 1.15 \Rightarrow k_{np} \\ k_{np} < 1.15 \Rightarrow 0 \end{cases}$	$Z_1 = \begin{cases} k_{\phi} \geq 1 \Rightarrow k_{\phi} \\ k_{\phi} < 1 \Rightarrow 0 \end{cases}$
Z_2	$Z_2 = \begin{cases} \lambda_{np} \leq \lambda_o \Rightarrow \frac{\lambda_o}{\lambda_{np}} \\ \lambda_{np} > \lambda_o \Rightarrow 0 \end{cases}$	$Z_2 = \begin{cases} T_o \text{ имеется} \Rightarrow 1 \\ T_o \text{ отсутствует} \Rightarrow 0 \end{cases}$ (*)
Z_3	$Z_3 = \begin{cases} C. \text{имеется} \Rightarrow 1 \\ C. \text{отсутствует} \Rightarrow 0 \end{cases}$ (**)	$Z_3 = \begin{cases} \lambda_{o\phi} \leq \lambda_{od} \Rightarrow \frac{\lambda_{od}}{\lambda_{o\phi}} \\ \lambda_{o\phi} > \lambda_{od} \Rightarrow 0 \end{cases}$

* - T_o – остаточный ресурс системы ЖАТ;

** - C – документ установленного образца;

Индексы « np », « d », « ϕ » - проектное, допустимое и фактическое значение показателя.

Интегральный количественный показатель функционального ресурса определяется путем перемножения частных показателей из таблицы 2:

$$Z = Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3. \quad (9)$$

Величина запаса по количественным критериям вычисляется на основе формулы:

$$\Delta Z = \begin{cases} Z \geq 1 \Rightarrow Z - 1; \\ Z = 0 \Rightarrow 0. \end{cases} \quad (10)$$

Обязательные качественные показатели определяют следующим образом:

$$Z_o = \begin{cases} \text{все } z_i \text{ определены в значении "да"} & \Rightarrow 1; \\ \text{хотя бы один } z_i \text{ определен в значении "нет"} & \Rightarrow 0; \end{cases} \quad (11)$$

Дополнительные качественные показатели определяют по формуле:

$$Z_\eta = \begin{cases} 0.75 \leq \eta \leq 1 & \Rightarrow 3; \\ 0.5 \leq \eta < 0.75 & \Rightarrow 2; \\ 0.25 \leq \eta < 0.5 & \Rightarrow 1; \\ 0 \leq \eta < 0.25 & \Rightarrow 0. \end{cases} \quad (12)$$

где η – доля реализуемых дополнительных качественных показателей к общему количеству дополнительных качественных показателей для железнодорожной линии соответствующего класса и специализации.

Интегральный показатель, характеризующий выполнение обязательных функциональных требований для системы ЖАТ, вычисляется по формуле:

$$R = \Delta Z \cdot Z_o. \quad (13)$$

На основе вычисленных значений интегральных показателей R и Z_o осуществляется оценка организационно-технологической надежности перевозочного процесса при эксплуатации рассматриваемой системы ЖАТ с использованием матрицы, представленной в таблице 3.

Таблица 3 – Оценка уровня функционального ресурса

		Показатель Z_o			
		$Z_o = 3$	$Z_o = 2$	$Z_o = 1$	$Z_o = 0$
Показатель R	$R > 3$	Высокий	Высокий	Высокий	Средний
	$0.22 < R \leq 3$	Высокий	Средний	Средний	Незначительный
	$0 < R \leq 0.22$	Средний	Незначительный	Незначительный	Незначительный
	$R = 0$	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

Оценка организационно-технологической надежности перевозочного процесса будет соответствовать следующей оценке уровня функционального ресурса: высокая (высокий уровень), средняя (средний уровень), низкая (незначительный уровень), критическая (функциональный ресурс отсутствует),

Для каждого уровня функционального ресурса в данной главе разработаны мероприятия по управлению качеством производственного процесса эксплуатации объектов железнодорожной инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе выполненных автором исследований содержится решение научной задачи оценки экономических и технических рисков, а также организационно-технологической надежности перевозочного процесса, связанных с качеством функционирования объектов железнодорожной инфраструктуры, имеющей значение для развития транспортной отрасли.

Основные научные и практические результаты диссертации состоят в следующем:

1. Проанализированы основные влияющие факторы и разработана математическая модель, описывающая количественные характеристики процессов возникновения и устранения различных инцидентов, связанных с эксплуатацией объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

2. Разработана имитационная модель, позволяющая проводить статистический анализ взаимосвязи между уровнем технических рисков в виде задержек в движении поездов в течение времени устранения отказов объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры, характеристиками производственного процесса эксплуатации и уровнем надежности объектов железнодорожной инфраструктуры.

3. Разработан технологический алгоритм обработки результатов статистического моделирования и оценки уровня технических и экономических рисков, связанных с производственным процессом эксплуатации объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

4. ~~Впервые~~—Предложено для повышения объективности оценки уровня надежности объектов железнодорожной инфраструктуры в имитационной модели использованы данные об отклонениях от норм содержания и предотказных состояниях, учитываемые с помощью применяемой в риск-менеджменте модели Генриха.

5. ~~Впервые~~— Предложено для объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры ввести понятие «функциональный ресурс» как комплексной характеристики качества производственного процесса технической эксплуатации инфраструктуры. Предложена номенклатура качественных и количественных показателей функционального ресурса объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

6. Предложен и обоснован метод оценки организационно-технологической надежности перевозочного процесса на основе анализа функционального ресурса железнодорожной транспортной инфраструктуры.

7. Предложенные в работе методы и модели прошли апробацию и нашли практическое применение на сети железных дорог Российской Федерации. На основе предложенных в диссертации моделей и методов разработаны при

непосредственном участии автора, утверждены и приняты к практическому использованию два отраслевых документа (методики) ОАО «Российские железные дороги».

8. В перспективе наиболее актуальной задачей является автоматизация предложенных автором методов и методик оценки эффективности производственного процесса эксплуатации объектов инфраструктурного комплекса ОАО «Российские железные дороги». Решение данной задачи запланировано в Дорожной карте реализации проекта «Цифровая трансформация процессов хозяйства автоматики и телемеханики» в рамках реализации Стратегии цифровой трансформации ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России (специальность 05.02.22.)

1. Болотский, Д.Н. Статистический метод планирования резерва времени на устранение отказов систем железнодорожной автоматики / Д.Н. Болотский, Н.В. Бугреев, А.В. Горелик, А.В. Орлов // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – №3(93). – С. 112 – 115.

2. Болотский, Д.Н. Анализ влияния обслуживающего персонала на возникновение эксплуатационных отказов систем железнодорожной автоматики / Д.Н. Болотский, А.В. Горелик, А.А. Пархоменко, Н.А. Тарадин // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – №6(96). – С. 44 – 48.

3. Болотский, Д.Н. Перспективы модернизации систем интервального регулирования / С.В. Кузнецов, Г.С. Ладыгин, Д.Н. Болотский // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – №5. – С. 29 – 31.

4. Болотский, Д.Н. Сети Wi-Fi и Wi-MAX в комплексах автоматики метрополитенов/О.А. Зименков, С.В. Кузнецов, Д.Н. Болотский // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – №4. – С. 47 – 48.

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

5. Болотский, Д.Н. Интеллектуальный транспорт: кроссплатформенные решения / А.А. Воронин, Д.Н. Болотский // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – №5. – С. 32 – 33.

6. Болотский, Д.Н. Имитационная модель оценки риска поездо-часов потерь из-за отказов системы железнодорожной автоматики и телемеханики // Д.Н. Болотский, А.В. Горелик, А.В. Орлов, Д.В. Солдатов // НТТ – Наука и техника транспорта. – 2017. – № 3. – С. 34–38.

7. Болотский, Д.Н. Имитационная модель оценки риска поездо-часов потерь из-за отказов системы железнодорожной автоматики и телемеханики / А.В.

Горелик, А.В. Орлов, В.В. Орлов, Д.В. Солдатов, Д.Н. Болотский // Наука и техника транспорта. – 2017. – № 3. – С. 34 – 38.

8. Болотский, Д.Н. Новые системы оптимизируют затраты / Д.Н. Болотский // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – №5. – С. 47 – 48.

Авторские свидетельства и патенты:

9. Пат. 2701887. Система и способ непрерывного мониторинга состояния контактной сети рельсового транспорта / Д.Н. Болотский, Д.В. Ефанов, В.А. Гросс, А.М. Романчиков, А.Ю.Васильев. – № 2018129315; заявл. 10.08.2018; опубл. 02.10.2019, Бюл. №28.– 39с.

10. Пат. 2721440. Система внешнего блокирования железнодорожной стрелки / Д.Н. Болотский, Д.В. Ефанов, А.В. Татарinov, В.А. Гросс, А.М. Романчиков, А.Ю. Васильев. – № 2019128919; заявл. 13.09.2019; опубл. 19.05.2020, Бюл. №14.– 12 с.

Публикации в материалах международных и всероссийских конференций:

11. Болотский, Д.Н. Оценка качества эксплуатации объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта / Д.Н. Болотский, Линьков В.И. // XII Международная научно-практическая конференция «Наука и образование транспорту» – Самара, 2019. – Секция 5.

12. Болотский, Д.Н.Методика определения статистической оценки текущего состояния систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Б.Ф. Безродный, Д.Н. Болотский, А.С. Веселова, А.В. Горелик, А.С. Голубев, П.А. Неваров // Надежность и качество: труды Международного симпозиума: в 2-х т.Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Информационно-издательский центр ПензГУ. Т.2, 2015 – С. 169-172.

13. Болотский, Д.Н.Повышение надежности функционирования объектов инфраструктуры хозяйства железнодорожной автоматики и телемеханики с учетом эффективности инвестиций / Б.Ф. Безродный, Д.Н. Болотский, А.С. Веселова, А.В. Горелик, А.С. Голубев, П.А. Неваров // Надежность и качество: труды Международного симпозиума: в 2-х т.Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Информационно-издательский центр ПензГУ. Т.2, 2015 – С. 207-211.

14. Болотский, Д.Н.Оценка остаточного ресурса объектов железнодорожной автоматики и телемеханики / Б.Ф. Безродный, Д.Н. Болотский, А.С. Голубев // Надежность и качество: труды Международного симпозиума: в 2-х т.Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Информационно-издательский центр ПензГУ. Т.2, 2014 – С. 241-243.

15. Болотский, Д.Н. Система интервального регулирования движением поездов на базе радиоканала СИРДП-Е разработки компании «Бомбардье Транспортейшн» и перспективы ее использования на российских железных

дорогах / Д.Н. Болотский // Пятая Международная научно-практическая конференция «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте «ТрансЖАТ-2010»: сборник докладов, Ростов-на-Дону, 2010. – С. 56.

16. Болотский, Д.Н. Модель оценки эффективности циклических процедур опроса состояния рельсовых цепей при временном уплотнении канала / Доклад на десятой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.:МИИТ – 2009.

17. Болотский, Д.Н. Пути повышения эффективности функционирования систем интервального регулирования на базе рельсовых цепей / Доклад на девятой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.:МИИТ – 2008.

18. Болотский, Д.Н. Алгоритм декодирования сигналов автоматической локомотивной сигнализации / Доклад на научно-технической конференции «Наука МИИТа – транспорту – 2007» – М.:МИИТ – 2007.

В других изданиях:

19. Болотский, Д.Н. Мониторинг и оценка эффективности функционирования объектов транспортной инфраструктуры / Д.Н. Болотский, А.С. Веселова, А.В. Горелик, И.А. А.В. Орлов, В.В. Орлов, И.В. Охотников – М., 2016. – 20 с. – Деп. в ВИНТИ, № 25 – 2016.

20. Болотский, Д.Н. Общие принципы управления ресурсами и рисками в хозяйстве автоматики и телемеханики / Д.Н. Болотский, А.С. Веселова, А.В. Горелик, И.А. Журавлев, А.В. Орлов, П.А. Неваров, П.В. Савченко, Н.А. Тарадин – М., 2015. – 17 с. – Деп. в ВИНТИ, № 186 – 2015.

21. Болотский, Д.Н. Оценка рисков, связанных с функционированием систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Д.Н. Болотский, А.С. Веселова, А.В. Горелик, И.А. Журавлев, А.В. Орлов, П.А. Неваров, П.В. Савченко, Н.А. Тарадин – М., 2015. – 16 с. – Деп. в ВИНТИ, № 187 – 2015.

22. Болотский, Д.Н. Оценка функционального ресурса систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Д.Н. Болотский, А.С. Веселова, А.В. Горелик, И.А. Журавлев, А.В. Орлов, П.А. Неваров, П.В. Савченко, Н.А. Тарадин – М., 2015. – 27 с. – Деп. в ВИНТИ, № 188 – 2015.

23. Болотский, Д.Н. Оценка показателей надежности и безопасности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Д.Н. Болотский, А.С. Веселова, А.В. Горелик, И.А. Журавлев, А.В. Орлов, П.А. Неваров, П.В. Савченко, Н.А. Тарадин – М., 2015. – 16 с. – Деп. в ВИНТИ, № 189. – 2015.

24. Болотский, Д.Н. К проблеме оценки остаточного ресурса объектов железнодорожной автоматики и телемеханики / Б.Ф. Безродный, А.В. Орлов, А.С. Голубев, Д.Н. Болотский // Надежность и качество сложных систем – 2014 – №2. – С. 34 – 39.

25. Болотский, Д.Н. Определение проектных значений показателей надёжности систем интервального регулирования движения поездов с учетом условий эксплуатации / Б.Ф. Безродный, Д.Н. Болотский, П.А. Неваров, А.С. Голубев // Надежность и качество: труды Международного симпозиума: в 2-х т. Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Информационно-издательский центр ПензГУ. Т.2, 2014 – С. 238-241.

26. Болотский, Д.Н. Статистическая оценка остаточного ресурса устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Б.Ф. Безродный, Д.Н. Болотский, А.С. Веселова, А.С. Голубев, А.В. Горелик, И.А. Журавлев, А.В. Орлов, П.А. Неваров, П.В. Савченко, Д.В. Шалягин – М., 2013. – 20 с. – Деп. в ВИНТИ, № 293–2013

Болотский Дмитрий Николаевич

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И РИСКОВ
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ
ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Специальность 05.02.22 – Организация производства (транспорт)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук