

На правах рукописи



Солдатов Дмитрий Владимирович

**НОРМИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ
АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ**

05.22.08 – Управление процессами перевозок

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Горелик Александр Владимирович

Официальные оппоненты:

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

Кашеева Наталья Вячеславовна - кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», кафедра «Управление эксплуатационной работой», доцент.

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

Защита состоится 4 июня 2018 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.14 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, аудитория 2505.

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

Автореферат разослан «26» апреля 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Сидоренко Валентина Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сложившаяся на текущий момент обстановка в стране требует от ведущих производственных и промышленных компаний повышения конкурентоспособности как на внутреннем, так и на внешнем рынках. Одним из способов достижения данной цели является оптимизация и совершенствование основных технологических процессов производства. В ОАО «Российские железные дороги» одним из ключевых активов является железнодорожная инфраструктура. Важным элементом инфраструктуры железнодорожного транспорта являются технические средства хозяйства автоматики и телемеханики.

Эксплуатация железнодорожной инфраструктуры как совокупности сложных технических систем, требует существенных затрат, связанных с текущей эксплуатацией, модернизацией, а также дополнительных расходов, обусловленных возникновением отказов технических средств. Отказы объектов инфраструктуры вызывают задержки в движении поездов и, как следствие, - дополнительные расходы транспортной компании. Большинство отказов объектов транспортной инфраструктуры связано с их значительным износом. Например, в хозяйстве автоматики и телемеханики по состоянию на 1 января 2016 года назначенный срок службы превысили 68% стрелок электрической централизации и 41% устройств автоблокировки.

В связи с этим возникает проблема рационального распределения ограниченных материальных и финансовых ресурсов на поддержание некоторого допустимого уровня надежности объектов транспортной инфраструктуры. Такой уровень определяется, прежде всего, допустимым уровнем риска отказов технических средств, связанным с возможностью предоставления клиентам услуги перевозки надлежащего качества и по приемлемой стоимости. Возникает вопрос: какой уровень потерь, вызванных задержками поездов, считать приемлемым и как определить нормы надежности технических объектов транспортной инфраструктуры, из-за случайных отказов которых эти задержки возникают. Кроме этого, необходимо спрогнозировать значение этих параметров на несколько лет вперед, чтобы составить план замены и капитального ремонта при значительном дефиците финансирования.

Решение такой задачи является актуальным в рамках внедряемой в настоящее время компанией «Российские железные дороги» методологии

управления ресурсами, рисками и анализа надежности (УРРАН). Согласно этой методологии первичными являются показатели качества перевозочного процесса, а состояние технических средств по параметрам их надежности подразумевается поддерживать ровно таким, насколько это необходимо для обеспечения заданных показателей качества перевозок.

До настоящего времени в структурных подразделениях большинства транспортных компаний применяется подход к нормированию показателей надежности, основанный на анализе динамики отказов за отчетный период времени. В качестве нормы количества отказов на текущий календарный год, как правило, выступает сниженное на установленный уровень (порядка 20-30%) значение количества отказов, зарегистрированных в прошедшем календарном году, что вряд ли можно назвать эффективным подходом. Такой принцип нормирования не гарантирует технической достижимости норм показателей надежности, не учитывает базовые положения теории надежности.

Поэтому актуальной задачей является разработка научно обоснованных методов нормирования показателей надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Решение данной проблемы позволит осуществлять «гибкое» нормирование показателей надежности систем обеспечения движения поездов в зависимости от их технических характеристик, условий эксплуатации и применения, уровня технических рисков из-за возможных отказов. При этом будут обеспечиваться технически достижимые и целесообразные с учетом возможных рисков значения норм показателей надежности для систем ЖАТ на железнодорожных линиях различных классов и специализаций, а также эффективное использование ресурсов, связанных с эксплуатацией и обновлением объектов транспортной инфраструктуры.

Степень научной разработанности темы. Большой вклад в разностороннее исследование проблем безопасности и надежности объектов транспортной инфраструктуры внесли известные ученые В.И. Апатцев, Л.А. Баранов, Б.Ф. Безродный, А.М. Брылеев, П.Ф. Бестемьянов, Д.В. Гавзов, А.В. Горелик, А.И. Годяев, И.Е. Дмитренко, И.Д. Долгий, В.А. Ивницкий, Ю.А. Кравцов, В.А. Кобзев, Л.Ф. Кондратенко, В.М. Лисенков, А.Б. Никитин, Ю.М. Резников, В.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, В.И. Шаманов, Д.В. Шалягин и др.

В последние годы большое внимание уделяется проблеме повышения эффективности управления ресурсами и рисками, вопросам автоматизации процесса мониторинга состояния объектов инфраструктуры в различных хозяйствах ОАО «РЖД», в том числе и в хозяйстве автоматики и телемеханики. В этом направлении большой вклад в науку внесли В.А. Гапанович, А.М. Замышляев, Э.К. Лецкий, Е.Н. Розенберг, И.Б. Шубинский.

Для решения задач эффективного управления ресурсами на основе оценки рисков в хозяйстве автоматики и телемеханики ОАО «РЖД» широко используются методы, предложенные в работах А.В. Горелика, Б.Ф. Безродного, А.В. Орлова, Н.А. Тарадина, И.А. Журавлева, А.С. Веселовой, П.В. Савченко, при этом отдельные результаты, представленные в диссертации, получены автором совместно с этим коллективом ученых, что отражено в соответствующих совместных публикациях [1, 3, 6, 10-12, 14, 16, 17]. Применение методов риск-менеджмента для анализа показателей надежности является одним из направлений указанных исследований. В частности, результатом этих совместных исследований является обоснование номенклатуры показателей структурной и функциональной надежности объектов железнодорожной автоматики [17], метод нормирования рисков потерь поездочных часов из-за отказов систем ЖАТ, а также исследование математической модели оценки показателей надежности, основанное на модели обслуживающего прибора с двумя входами и решение для данной модели обратной задачи на основе итерационного метода [3]. Личный вклад соискателя в совместных публикациях состоит в его включенном участии на всех этапах научных исследований, изложенных в диссертации, непосредственном участии соискателя в разработке методов и моделей нормирования и оценки показателей надежности систем ЖАТ, личном участии соискателя в апробации результатов исследования, обработке и интерпретации статистических данных, участии соискателя в подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Цель работы: разработать метод, позволяющий производить нормирование показателей надежности систем ЖАТ с помощью научно обоснованных алгоритмов и моделей, анализировать и оценивать влияние качества технической эксплуатации и уровня надежности систем ЖАТ на перевозочный процесс.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

- разработать номенклатуру показателей надежности систем ЖАТ, необходимых для анализа состояния технических средств и оценки его влияния на перевозочный процесс;

- разработать статистические и математические модели для оценки и расчета нормативных значений показателей надежности систем ЖАТ, исследовать и обосновать адекватность этих моделей;

- разработать технологию сбора и обработки информации, необходимой для обоснованного нормирования и оценки показателей надежности систем ЖАТ, с учетом возможной интеграции соответствующих технологических алгоритмов в существующие информационные системы инфраструктурного комплекса ОАО «Российские железные дороги».

Научная новизна результатов исследования, полученных автором диссертации, состоит в следующем:

- предложена и обоснована номенклатура показателей структурной и функциональной надежности систем ЖАТ, которая, в отличие от известных аналогичных критериев, позволяет осуществлять научно обоснованный анализ и нормирование уровня надежности этих систем с учетом его влияния на перевозочный процесс;

- предложены и обоснованы технологические алгоритмы сбора и обработки статистической информации, необходимой для обоснованного нормирования и оценки показателей надежности систем ЖАТ, которые, в отличие от применяемых технологий, позволяют обобщить данные из разнородных по структуре информационных систем ОАО «Российские железные дороги» с учетом особенностей их функционирования; разработаны новые классификаторы статистических данных, формируемых в этих системах;

- разработан метод нормирования различных показателей надежности систем ЖАТ, основанный на использовании оригинальных результатов статистического анализа и математического моделирования, который, в отличие от известных подходов, впервые реализует обоснованное применение теории рисков для оценки качества функционирования систем ЖАТ.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что автором предложены и обоснованы новые модели и методы, расширяющие границы применимости результатов анализа показателей надежности систем ЖАТ, прежде всего, для решения задачи нормирования этих показателей при различных условиях эксплуатации. В диссертации изложены и обоснованы теоретические методы и модели оценки допустимых значений показателей надежности систем ЖАТ с учетом различных условий эксплуатации, раскрыты противоречия и проблемы, связанные с научным анализом потенциальной технической возможности и обоснованием производственной целесообразности применения систем ЖАТ с различными показателями надежности, изучены основные факторы и причинно - следственные связи влияния надежности систем ЖАТ на перевозочный процесс.

Наиболее значимые теоретические результаты, изложенные в диссертации, заключаются в следующем.

1. В работе получены и обоснованы новые научные результаты о законе распределения вероятностей случайной величины времени потерь поездо-часов, вызванных отказами систем ЖАТ, позволяющие осуществлять нормирование рисков возникновения этих потерь.

2. Обоснована адекватность применения модели системы массового обслуживания $M/M/1:Loss$ с абсолютным приоритетом при обслуживании заявок и полными потерями для анализа взаимосвязи между показателями перевозочного процесса, надежности системы ЖАТ и величиной возникающих при отказах этих систем потерь поездо-часов. Автором впервые сформулирована и решена при помощи итерационных методов обратная задача пересчета для данной системы массового обслуживания при нормировании значения интенсивности потока отказов объекта ЖАТ первой и второй категории.

3. В диссертации разработан новый подход к определению нормы интенсивности инцидентов, связанных с эксплуатацией систем ЖАТ, основанный на применении модели Гейнриха.

4. В работе проведено исследование существующих математических моделей, используемых для оценки значения времени до восстановления систем ЖАТ, предложена методика нормирования этого показателя.

Теоретические исследования, представленные в диссертации, проводятся

при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 17-20-03072 по итогам конкурса проектов 2017 года ориентированных научных исследований, проводимый РФФИ совместно с открытым акционерным обществом «Российские железные дороги» на выполнение исследований на тему «Научные основы нормирования и прогнозирования показателей надежности функционирования объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта» коллективом в составе Горелик А.В., Журавлев И.А., Орлов А.В., Солдатов Д.В.).

Значение полученных в диссертации результатов исследования для практики подтверждается тем, что теоретические методы и модели, предложенные автором, реализованы в виде технологических алгоритмов и конкретных методик, внедренных на сети железных дорог Российской Федерации.

Технологические алгоритмы сбора и обработки статистической информации, необходимой для обоснованного нормирования и оценки показателей надежности систем ЖАТ, нашли практическое применение при автоматизации процессов расчета фактических и нормативных значений показателей надежности технических средств ЖАТ в автоматизированной системе анализа надежности хозяйства автоматики и телемеханики ОАО "РЖД" (АС АНШ).

В частности, в соответствии с основными положениями диссертации и общей концепцией метода, предложенного автором, были реализованы алгоритмы и программное обеспечение по расчету нормативных и фактических значений показателей функциональной надежности: интенсивности отказов 1-й и 2-й категории систем ЖАТ, потерь поездо-часов из-за отказов систем ЖАТ, коэффициента готовности по отказам систем ЖАТ 1-й и 2-й категории. Соответствующее программное обеспечение применяется в настоящее время для выполнения расчетов и анализа функциональной надежности систем ЖАТ для всей сети железных дорог ОАО «РЖД».

Кроме того, основные результаты, представленные в диссертации, нашли практическое применение при разработке, апробации и реализации методологии УРРАН в хозяйстве автоматики и телемеханики. Ряд теоретических положений и математических моделей, представленных в диссертации, использованы в целом ряде нормативных документов

ОАО «РЖД», в том числе:

– методике комплексной оценки деятельности структурных подразделений хозяйства автоматики и телемеханики по показателям надежности и безопасности функционирования, качества технического обслуживания и ремонта систем и устройств (утвержденной распоряжением старшего вице-президента ОАО «РЖД» Г.В. Верховых от 19.12.2016 г № 2590/р);

– методических указаниях «Управление надежностью функционирования систем железнодорожной автоматики телемеханики на основе методологий ALARP и УРРАН» (утвержденных распоряжением старшего вице-президента ОАО «РЖД» В.А. Гапановичем от 23.12.2016 г. № 2651/р);

– методике сбора, обработки и представления данных, связанных с функционированием систем железнодорожной автоматики и телемеханики (утвержденной распоряжением старшего вице-президента ОАО «РЖД» В.А. Гапановичем от 23.12.2016 г. № 2651/р);

– методике оценки стоимости жизненного цикла систем железнодорожной автоматики и телемеханики на основе методологии УРРАН (утвержденной распоряжением старшего вице-президента ОАО «РЖД» В.А. Гапановичем от 27.12.2016 г. № 2706/р).

Результаты практического использования полученных в диссертации результатов подтверждены соответствующими актами, которые представлены в приложении к диссертации.

Методология исследований в диссертационной работе основана на использовании теории рисков, методов математической статистики, теории вероятностей, теории массового обслуживания, структурного моделирования и статистического анализа. Результаты исследований реализуются в качестве методологии управления ресурсами, рисками и анализа надежности в хозяйстве автоматики и телемеханики на российских железных дорогах.

На защиту выносятся следующие положения:

- номенклатура показателей структурной и функциональной надежности систем ЖАТ, позволяющая осуществлять анализ и нормирование уровня надежности этих систем;

- метод нормирования рисков потерь поездо-часов из-за отказов систем ЖАТ;

- метод нормирования показателей функциональной надежности объектов ЖАТ, основанный на применении математических моделей массового обслуживания и вероятностного анализа;

- совокупность технологических алгоритмов сбора, обработки и анализа статистической информации, необходимой для обоснованного нормирования показателей надежности систем ЖАТ, разработанных с учетом особенностей функционирования различных информационных систем ОАО «РЖД», а также классификаторы статистических данных, формируемых в этих системах;

- модель нормирования показателей структурной надежности объектов ЖАТ, основанная на применении методов построения и анализа пирамиды Гейнриха.

Степень достоверности и апробации результатов исследования позволяет сделать вывод об обоснованности основных теоретических положений диссертации и представленных в работе практических результатов. Теория построена на известных проверяемых статистических данных об отказах и иных инцидентах, связанных с эксплуатацией систем ЖАТ на сети железных дорог Российской Федерации. Основные идеи, положенные в основу исследования, базируются на анализе существующих и применяемых на практике методов оценки показателей надежности технических средств и качества работы структурных подразделений хозяйства автоматики и телемеханики.

Автором использовано сравнение данных по надежности систем ЖАТ, полученных ранее на основе статистической отчетности подразделений автоматики и телемеханики ОАО «РЖД», с данными, полученными с помощью моделей и методов, предложенных в диссертации.

Результаты теоретических исследований успешно апробированы и внедрены в ОАО «Российские железные дороги».

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на заседании кафедры «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь» РУТ (МИИТ) (с 2011 по 2018 год), на заседании Объединенного ученого совета ОАО «Российские железные дороги» (25 января 2018 года), а также на конференциях: Восьмой международной научно-практической конференции «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», г. Ростов-на-Дону, 2016 г.; X Международной научно-практической конференции «RANS-

МЕСН-ART-CHEM», г. Москва, 2014 г.; VIII Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», г. Иркутск, 2017 г.; III Всероссийской научно-практической конференции «История и перспективы развития транспорта на севере России (к 40-летию начала строительства БАМа)», г. Ярославль, 2014 г.

Публикации. Полученные в диссертационной работе результаты отражены в 18 научных работах, в том числе 5 работ опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 131 наименования, шести приложений. Диссертация изложена на 294 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи работы, научная новизна, сформулированы теоретическая и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту, показаны результаты апробации и практического внедрения.

В первой главе проведен анализ текущего состояния железнодорожной инфраструктуры и его влияния на технологический процесс железнодорожных перевозок, исследованы различные подходы к управлению надежностью железнодорожной инфраструктуры.

В результате проведенного анализа установлено, что наиболее эффективным подходом к оценке влияния надежности систем ЖАТ на перевозочный процесс является анализ рисков потерь поездо-часов из-за отказов этих систем, с учетом которых должны осуществляться анализ и управление надежностью систем ЖАТ.

Номенклатура показателей надежности и рисков, связанных с функционированием систем ЖАТ, представлена на Рисунке 1.

На Рисунке 1: R_o , H – риски потерь поездо-часов из-за отказов системы ЖАТ и её надежность; H_c , H_ϕ – структурная и функциональная надежность объекта ЖАТ соответственно; λ_u , T_e – показатели структурной надежности: средняя интенсивность инцидентов и среднее время до восстановления системы ЖАТ;

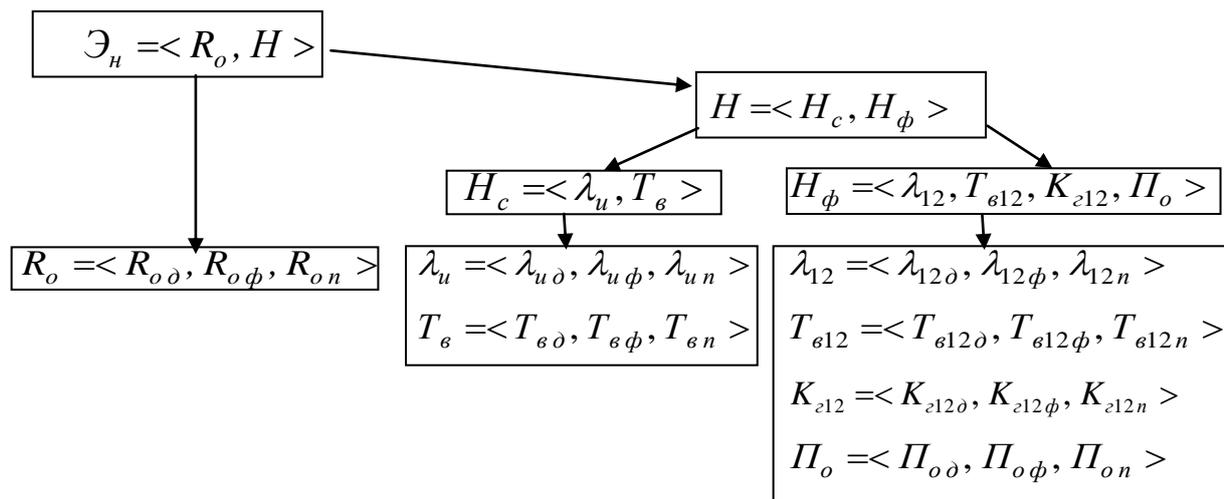


Рисунок 1 – Структура рисков и показателей надежности объекта ЖАТ

$T_{\epsilon 12}$, λ_{12} , K_{z12} , Π_o – показатели функциональной надежности: среднее время устранения отказов первой и второй категории, интенсивность отказов первой и второй категории, коэффициент готовности по отказам первой и второй категории системы ЖАТ, потери поездо-часов; ∂, ϕ, n – индексы, характеризующие различные значения показателей: допустимое, фактическое и проектное.

С целью оценки рисков потребовалось ввести новый вид событий, названных инцидентами, представляющих собой любые отказы системы ЖАТ, случайные события возникновения предотказных состояний и отступлений от норм содержания систем ЖАТ.

В главе сформулированы общие требования к допустимым значениям показателей функциональной и структурной надежности систем ЖАТ, задачи и подходы к нормированию этих показателей.

Во второй главе диссертации исследована задача формирования совокупности исходных данных, необходимых и достаточных для решения задач расчета допустимых и фактических значений показателей надежности и рисков по надежности функционирования систем ЖАТ, определен перечень информационных систем ОАО «РЖД», из которых эти данные можно получить, выявлен комплекс проблем, связанных с обобщением данных и разработана технология их сбора и предварительной обработки.

Статистическая совокупность данных об отказах Z_o и поставленным им в

соответствие последствиях R_n описана множествами:

$$Z_o = Z_{o1} \cup Z_{o2} \cup Z_{o3}, \quad Z_o \rightarrow R_n, \quad R_n = R_1 \cup R_2 \cup R_4, \quad (1)$$

где Z_{o1}, Z_{o2}, Z_{o3} – множества данных об отказах в системе АСУ-Ш-2 (Z_{o1}), КАС АНТ (Z_{o2}) и СТДМ (Z_{o3}) соответственно; R_1, R_2, R_4 – множество данных о потерях поезд-часов в системе АСУ-Ш-2 (R_1), системе КАС АНТ (R_2) и множество данных о технологических нарушениях в системе КАСАТ (R_3) соответственно.

Каждое из множеств (1) описывается соответствующим кортежем.

Например, статистические данные об отказах из системы КАС АНТ есть:

$$Z_{o2} = \langle z_{2k} \mid k = 1, \dots, 4 \rangle, \quad (2)$$

где z_{21} – дата возникновения отказа; z_{22} – время возникновения отказа; z_{23} – продолжительность отказа, ч; z_{24} – категория отказа: 1, 2, 3.

Аналогичным образом в работе описана совокупность статистических данных о предотказных состояниях, отступлениях от норм содержания, характеристиках системы ЖАТ и перевозочного процесса.

В работе предложены технологические алгоритмы, реализующие объединение статистических данных из различных информационных систем. Фрагмент алгоритма формирования единой совокупности отказов представлен на Рисунке 2.

Для оценки значимости различных предотказных состояний и отступлений от норм содержания с точки зрения их влияния на перевозочный процесс и возможную величину рисков потерь поезд-часов был использован метод экспертных оценок. Группа экспертов формировалась из специалистов и руководителей Проектно-конструкторского бюро по инфраструктуре – филиала ОАО «РЖД». Коэффициент конкордации составил более 0,5, что говорит о достигнутой умеренной согласованности мнений экспертов. В результате статистической обработки анкет были разработаны соответствующие классификаторы, апробированные и внедренные в настоящее время на сети российских железных дорог.

В третьей главе предложены методы нормирования показателей функциональной и структурной надежности систем ЖАТ.

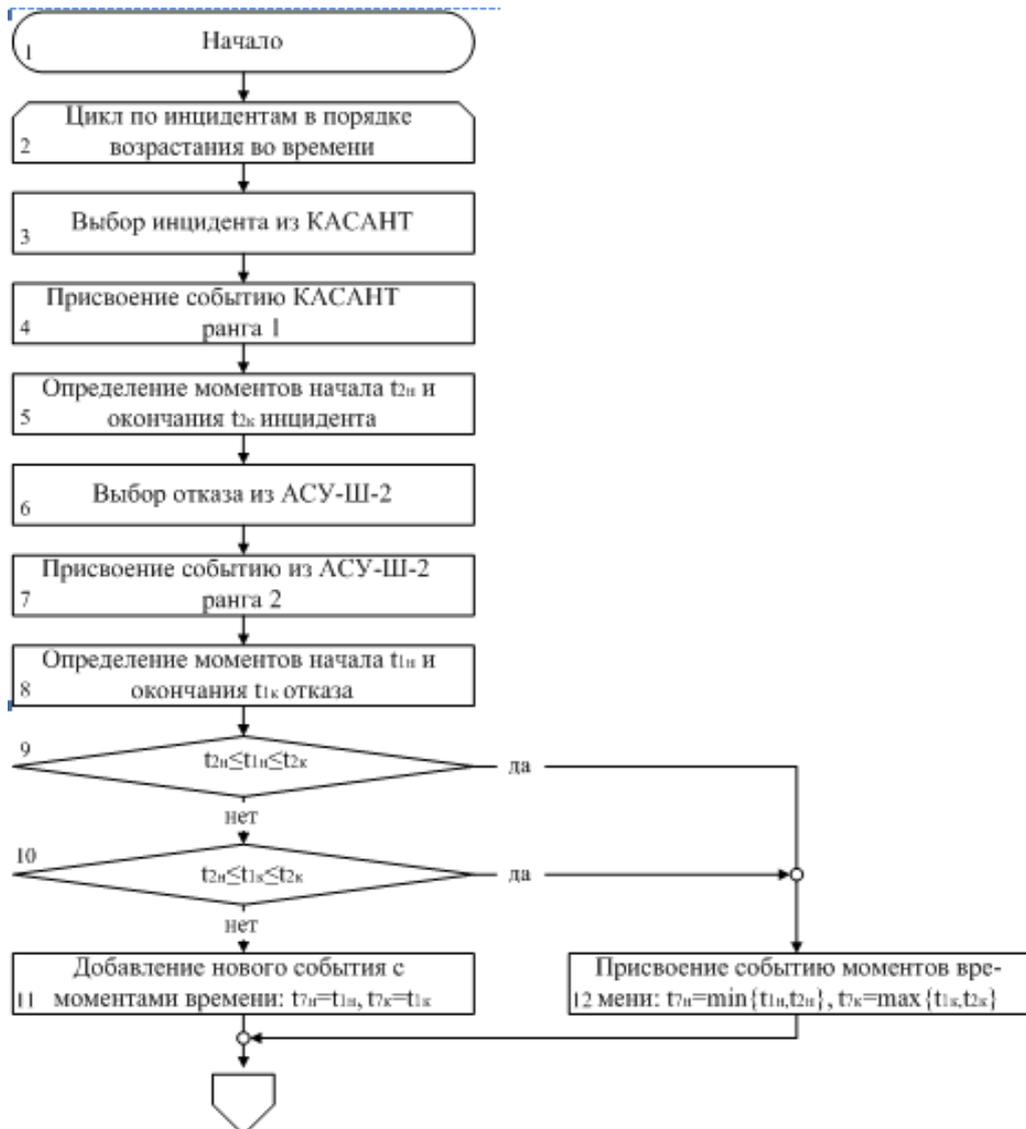


Рисунок 2 – Фрагмент алгоритма формирования единой совокупности отказов

Последовательность нормирования показателей функциональной надежности систем ЖАТ представлена на Рисунке 3.



Рисунок 3 – Последовательность нормирования показателей функциональной надежности систем ЖАТ

Анализ показал умеренную корреляционную связь между потерями поездо-часов и классом и специализацией железнодорожной линии (0.53-0.65 в зависимости от класса и специализации), поэтому допустимые минимально достижимые значения рисков потерь поездо-часов целесообразно задавать отдельно для систем ЖАТ, функционирующих на железнодорожных линиях различных классов и специализаций. Для выявления связи между показателями функциональной надежности и рисками функционирования системы ЖАТ проведен анализ методики построения матрицы рисков, в результате которого установлено, что допустимое значение потерь поездо-часов из-за отказов системы ЖАТ и соответствующее ему допустимое значение частоты отказов первой и второй категории соответствуют границе между областями с нежелательным и недопустимым уровнем риска.

В главе проведено исследование статистических данных о функционировании систем ЖАТ и его влиянии на перевозочный процесс. В результате были получены вероятностные распределения для ряда показателей надежности систем ЖАТ, выполнена проверка их адекватности по критерию Пирсона. Пример вероятностного распределения частоты отказов для систем ЖАТ, функционирующих на участках железнодорожных линий первого класса второй (условной) специализации показан на Рисунке 4.

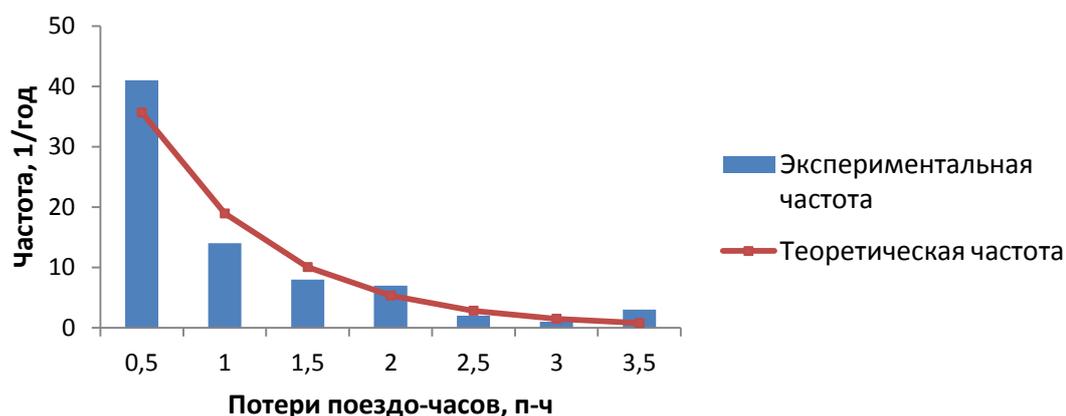


Рисунок 4 – Теоретическая и экспериментальная частоты потерь поездо-часов для систем ЖАТ на участках железнодорожных линий первого класса второй (условной) специализации

На основе распределений потерь поездо-часов методом интервальной оценки определялось допустимое значение потерь поездо-часов системы ЖАТ

за отчетный период при заданном уровне доверительной вероятности P :

$$P_{o\delta} = f(P_o(P=0.7)). \quad (3)$$

Допустимое значение среднего времени устранения отказов первой и второй категории определялось по формуле модового значения треугольного распределения:

$$T_{\delta 12} = t_m = 0,25 \cdot (t_k + 3 \cdot t_n), \quad (4)$$

где t_n, t_k – границы области возможных значений: максимального и минимального, t_m – мода.

Допустимое значение интенсивности отказов системы ЖАТ первой и второй категории в работе предложено определять с помощью модели системы массового обслуживания (СМО) $M/M/1:Loss$ по классификации Кендала, так как она показала умеренную положительную корреляционную связь со статистическими данными по шкале Чеддока $r_{nc} = 0,481$. При определении допустимого значения интенсивности отказов первой и второй категории с использованием СМО решалась обратная задача итерационным методом хорд по формуле:

$$\lambda_z = \frac{(P_{o\delta} - P_{o_{z-1}}) \cdot (\lambda_{max} - \lambda_{z-1})}{(P_{o_{max}} - P_{o_{z-1}})} + \lambda_{z-1}, \quad (5)$$

где z – номер итерации; $P_{o_{z-1}}, \lambda_{z-1}$ – значения потерь поездочасов и интенсивности отказов, вычисленные по формуле (5) в предыдущей итерации; λ_z – значение интенсивности отказов, вычисленное в текущей итерации (на текущем шаге).

Допустимое значение интенсивности инцидентов в работе предложено определять с использованием пирамиды Гейнриха, общий вид которой представлен на Рисунке 5. Расчетная формула имеет вид:

$$\lambda_{u\delta} = \frac{k_u}{k_{12}} \cdot \lambda_{12\delta}, \quad (6)$$

где k_{12} – коэффициент перевода допустимого значения интенсивности отказов в допустимое значение интенсивности отказов первой и второй категории; k_u – коэффициент перевода допустимого значения интенсивности отказов в допустимое значение интенсивности инцидентов.



Рисунок 5 – Пирамида Гейнриха при описании надежности системы ЖАТ

Для каждой j -ой системы ЖАТ в зависимости от наличия или отсутствия на рассматриваемом участке железнодорожной линии системы технической диагностики и мониторинга (СТДМ) соотношение коэффициентов из формулы (6) находят по формуле:

$$\frac{k_{u j}}{k_{12 j}} = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^m n_{n c j} \cdot m + \sum_{j=1}^m n_{o c j} + \sum_{j=1}^m n_{z c j}}{\sum_{j=1}^m \delta_j} & \text{при } \delta_j = 1; \\ \frac{\sum_{j=1}^m n_{12 c j}}{\sum_{j=1}^m n_{o c j} + \sum_{j=1}^m n_{z c j}} & \text{при } \delta_j = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $n_{o c j}$ – количество отказов j -го объекта ЖАТ всех категорий за период наблюдения $T_{набл}$; $n_{z c j}$ – количество отступлений от норм содержания j -го объекта ЖАТ первого уровня критичности за период наблюдения $T_{набл}$; $n_{n c j}$ – количество предотказных состояний j -го объекта ЖАТ первого уровня критичности за период наблюдения $T_{набл}$; m – количество объектов ЖАТ на железнодорожных линиях одинакового класса и специализации, δ – двоичный оператор: 1 – при наличии СТДМ, 0 – при отсутствии.

Четвертая глава посвящена анализу проблем, связанных с практической реализацией расчета допустимых значений показателей надежности систем ЖАТ. В главе обоснована необходимость автоматизации процессов сбора, обработки данных, расчета и представления результатов, описана функциональная структура и программные интерфейсы разрабатываемой для

этих задач информационной системы.

Для апробации разработанных в диссертации механизмов выполнен расчет и анализ показателей надежности систем ЖАТ для опытного участка железных дорог, включающего 1420 систем ЖАТ. Исходные данные для расчета допустимых значений показателей надежности были взяты за три календарных года с 2014 по 2016. Фрагмент результатов расчета допустимых значений показателей надежности систем ЖАТ представлен в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета допустимых значений показателей надежности систем ЖАТ на различных участках Октябрьской железной дороги (фрагмент)

Система ЖАТ на станции или перегоне	Класс ж.д. линии	Специализация ж.д. линии	Допустимое значение потерь поездо-часов, п-ч	Допустимое значение интенсивности отказов 1 и 2 категории, 1/ч	Допустимое значение коэффициента готовности по отказам 1 и 2 категории	Допустимое значение среднего времени устранения отказов 1 и 2 категории, ч
ПУДОСТЬ	5	1	0,30	0,0000207	0,99980	1,79
МЮД	5	1	0,30	0,0000176	0,99968	2,79
ГРУЗИНО	3	1	1,32	0,0000485	0,99978	1,88
ЗЕМЦЫ	3	1	1,32	0,0000285	0,99965	3,00
КРЮКОВО	1	2	1,61	0,0000356	0,99987	1,17

Из анализа Таблицы 1 следует, что допустимые значения потерь поездо-часов одинаковы для систем ЖАТ, функционирующих на железнодорожных линиях с одинаковым классом и специализацией, однако при этом допустимые значения остальных показателей функциональной надежности могут различаться, так как зависят от конкретных условий эксплуатации.

Исходные данные для расчета фактических значений показателей надежности были взяты за февраль 2017 года. Фрагмент результатов расчета фактических значений показателей надежности для систем ЖАТ представлен в Таблице 2.

Полученные допустимые и фактические значения показателей надежности систем ЖАТ анализировались методом парного сравнения с оценкой величин абсолютного и относительного отклонений.

В качестве примера проанализируем показатели надежности системы ЖАТ на станции Мюд. В феврале 2017 года на данной станции имело место превышение допустимого значения потерь поездо-часов из-за отказов системы

ЖАТ и, как следствие, – недопустимое снижение фактического значения коэффициента готовности по отказам 1 и 2 категории. Последнее обусловлено тем, что имеет место одновременное превышение допустимых значений среднего времени устранения отказов 1 и 2 категории и интенсивности отказов 1 и 2 категории. Отсюда можно заключить, что недопустимый уровень потерь поездо-часов в данном случае вызван, как значительным количеством отказов системы ЖАТ, так и недостаточной оперативностью их устранения.

Таблица 2 – Результаты расчета фактических значений показателей надежности систем ЖАТ на различных участках Октябрьской железной дороги (фрагмент)

Система ЖАТ на станции или перегоне	Класс ж.д. линии	Специализация ж.д. линии	Фактическое значение потерь поездо-часов, п-ч	Фактическое значение интенсивности отказов 1 и 2 категории, 1/ч	Фактическое значение коэффициента готовности по отказам 1 и 2 категории	Фактическое значение среднего времени устранения отказов 1 и 2 категории, ч
ПУДОСТЬ	5	1	0,38	0,0001154	0,99982	1,53
МЮД	5	1	0,56	0,0001172	0,99955	3,82
ГРУЗИНО	3	1	0,34	0,0002311	0,99980	0,83
ЗЕМЦЫ	3	1	0,36	0,0001157	0,99977	1,98
КРЮКОВО	1	2	0,24	0,0001142	0,99999	0,12

На Рисунке 6 в качестве примера представлено распределение относительного уровня допустимых и фактических значений потерь поездо-часов для рассмотренной в диссертации совокупности систем ЖАТ.

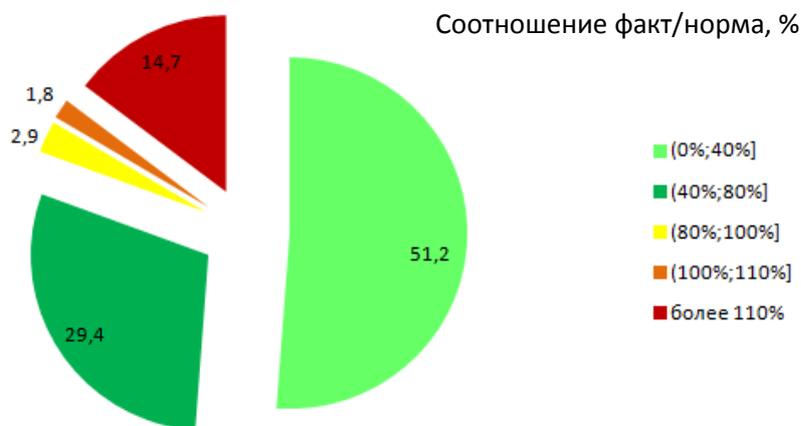


Рисунок 6 – Распределение систем ЖАТ по соотношению фактического и допустимого значения потерь поездо-часов в процентном соотношении.

Как видно из круговой диаграммы, из 1420 систем ЖАТ менее 15% функционируют с превышением допустимых значений потерь поездо-часов, что позволяет сделать вывод о практической достижимости предложенных в работе нормативов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований в работе решена задача нормирования показателей надежности систем ЖАТ с помощью научно обоснованных алгоритмов и моделей, позволяющих анализировать и оценивать влияние качества технической эксплуатации и уровня надежности систем ЖАТ на перевозочный процесс. При решении данной задачи в диссертации получены следующие основные научные и практические результаты.

1. Предложена и обоснована номенклатура показателей структурной и функциональной надежности систем ЖАТ, которая, в отличие от известных аналогичных критериев, позволяет осуществлять научно обоснованный анализ и нормирование уровня надежности этих систем с учетом его влияния на перевозочный процесс.

2. Разработан метод нормирования рисков потерь поездо-часов из-за отказов систем ЖАТ, а также алгоритм построения и алгебраизации матрицы рисков, связанных с отказами этих систем, что в отличие от других подходов, позволяет учесть случайный характер как отказов систем ЖАТ, так и величины возможных потерь, вызванных этими отказами.

3. Разработаны и обоснованы технологические алгоритмы сбора и обработки статистической информации, необходимой для обоснованного нормирования и оценки показателей надежности систем ЖАТ, которые, в отличие от применяемых технологий, позволяют обобщить данные из разнородных по структуре информационных систем ОАО «Российские железные дороги» с учетом особенностей их функционирования; разработаны новые классификаторы статистических данных, формируемых в этих системах.

4. Разработан метод нормирования показателей функциональной надежности систем ЖАТ, основанный на применении математических моделей массового обслуживания и теории вероятностей. На основе анализа статистических данных о функционировании систем ЖАТ на различных участках российских железных дорог впервые построены статистические

распределения случайных величин потерь поездо-часов из-за отказов систем ЖАТ, времени до восстановления, количества отказов первой и второй категории систем ЖАТ, выполнена проверка адекватности полученных распределений.

5. Для анализа взаимосвязи между показателями перевозочного процесса, надежности системы ЖАТ и величиной возникающих при отказах этих систем потерь поездо-часов обоснована адекватность применения для сети российских железных дорог модели системы массового обслуживания $M/M/1:Loss$ с абсолютным приоритетом при обслуживании заявок и полными потерями. Для данной модели впервые решена обратная задача пересчета на основе итерационного метода.

6. Предложена модель нормирования показателей структурной надежности объектов ЖАТ, основанная на применении методов построения и анализа пирамиды Гейнриха.

7. Представлена концепция автоматизации расчета и анализа показателей надежности объектов инфраструктуры для хозяйства автоматики и телемеханики ОАО «Российские железные дороги».

8. Теоретические методы и модели, предложенные в диссертации, реализованы в виде технологических алгоритмов и конкретных методик, внедренных на сети железных дорог Российской Федерации.

Проведенные в работе исследования и полученные результаты являются теоретической основой для решения актуальных в настоящее время для хозяйства автоматики и телемеханики практических задач в области оценки и анализа надежности, управления состоянием технических средств ЖАТ, а также обоснованной оценки качества деятельности различных структурных подразделений.

В перспективе с использованием разработанных в диссертации инструментов представляется возможным решать задачи по изучению влияния на качество перевозочного процесса уровня надежности различных объектов транспортной инфраструктуры, а также повышения эффективности производственного планирования в структурных подразделениях хозяйств инфраструктуры с учетом показателей технической оснащенности, объемов ремонтных работ и модернизации основных средств.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Солдатов, Д.В. Моделирование технологического процесса восстановления объектов транспортной инфраструктуры / А.В. Горелик, Д.В. Солдатов // Наука и техника транспорта. – 2013. – №4. – С. 80–83.
2. Солдатов, Д.В. Нормативное обеспечение контракта жизненного цикла / Б.Ф. Безродный, А.С. Голубев, Д.В. Солдатов // Автоматика, связь, информатика. – 2015. – №1. – С. 12–13.
3. Солдатов, Д.В. Нормирование показателей надежности объектов железнодорожной инфраструктуры / А.В. Горелик, И.А. Журавлев, А.В. Орлов, А.С. Веселова, Д.В. Солдатов // Наука и техника транспорта. – 2017. – №2. – С. 32–36.
4. Солдатов, Д.В. Методология управления рисками в хозяйстве автоматики и телемеханики / А.Е. Ёрж, А.В. Горелик, Д.В. Солдатов, А.В. Орлов // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – №7. – С. 2–6.
5. Солдатов, Д.В. Имитационная модель оценки риска поездо-часов потерь из-за отказов систем 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.

Другие работы, в которых опубликованы результаты диссертации:

6. Солдатов, Д.В. Оценка качества функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики на основе методологии УРРАН / Б.Ф. Безродный, А.В. Горелик, И.А. Журавлев, П.А. Неваров, Д.В. Солдатов, Д.В. Шалягин. // М.: МГУПС – деп. в ВИНТИ. – №346. – В2012. – 25 с.
7. Солдатов, Д.В. Моделирование процесса восстановления систем железнодорожной автоматики / Д.В. Солдатов // Перспективные инновации в науке образовании, производстве и транспорте 2013: Сборник научных трудов SWorld. – Иваново.: Научный мир. – 2013. – Том 2 – С. 59-64.
8. Солдатов, Д.В. Проблемы оценки и оптимизации процесса восстановления объектов транспортной инфраструктуры на примере Северной железной дороги / Д.В. Солдатов // История и перспективы развития транспорта на севере России (к 40-летию начала строительства БАМа): материалы III Всероссийской научно-практической конференции. – Ярославль.: МИИТ. – 2014. – С. 63-65.

9. Солдатов, Д.В. Методы оценки времени восстановления после отказов объектов транспортной инфраструктуры / Д.В. Солдатов // TRANS-МЕШ-ART-CHEM: труды X Международной научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2014. – С. 95-96.

10. Солдатов, Д.В. Оценка стоимости жизненного цикла систем железнодорожной автоматики и телемеханики на основе методологии УРРАН / А.В. Горелик, И.А. Журавлев, А.В. Орлов, А.С. Веселова, Д.В. Солдатов, П.В. Савченко, Н.А. Тарадин, П.А. Неваров. // М.: МИИТ. – деп. в ВИНТИ. – №160– В2016. – 59 с.

11. Солдатов, Д.В. Принципы сбора и обработки данных для расчета показателей эффективности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А.В. Горелик, И.А. Журавлев, А.В. Орлов, А.С. Веселова, Д.В. Солдатов, П.В. Савченко, Н.А. Тарадин, П.А. Неваров. // М.: МИИТ. – деп. в ВИНТИ. – №165 – В2016. – 59 с.

12. Солдатов, Д.В. Оценка состояния и остаточного ресурса технических средств ЖАТ на основе мониторинга показателей надежности / Д.В. Солдатов // Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте: Сборник докладов Восьмой международной научно-практической конференции «ТрансЖАТ – 2016». – Ростов-на-Дону. – 2016. – С. 356-359.

13. Солдатов, Д.В. Оценка стоимости жизненного цикла систем железнодорожной автоматики с учетом непроизводительных потерь / А.В. Горелик, В.Ю. Горелик, А.С. Веселова, Д.В. Солдатов // Перспективные инновации в науке образовании, производстве и транспорте 2016: Сборник научных трудов SWorld. – Иваново.: Научный мир. – 2016. – Выпуск 45, Т.1 – С. 54-68.

14. Солдатов, Д.В. Нормирование показателей надежности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики на основе методологий ALARP и УРРАН / А.В. Горелик, И.А. Журавлев, А.В. Орлов, А.С. Веселова, Д.В. Солдатов, П.В. Савченко, Н.А. Тарадин, П.А. Неваров // М.: МИИТ.– деп. в ВИНТИ. – №158 – В2016. – 48 с.

15. Солдатов, Д.В. Оценка качества технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики / А.С. Веселова, Н.А. Тарадин, Д.В. Солдатов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы VIII Международной научно-практической конференции в 2-х томах. – Иркутск,

ИрГУПС. – 2017. – Т.1 – С. 354-359.

16. Солдатов, Д.В. Оценка стоимости жизненного цикла систем железнодорожной автоматики / А.С. Веселова, И.А. Журавлев, Д.В. Солдатов // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. / Межвузовский сборник научных трудов / под общей редакцией д.т.н., проф. Бугреева В.А. – М.: РУТ (МИИТ). – 2017. – С. 108-112.

17. Солдатов, Д.В. Оценка качества технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А.В. Горелик, Н.А. Тарадин, А.С. Веселова, Д.В. Солдатов // Автоматика на транспорте. СПб.: ПГУПС – 2017. – №3, том 3. – С. 319-334.

18. Солдатов, Д.В. Нормирование оценка и анализ показателей надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики на основе данных, представляемых информационными системами железнодорожного транспорта / А.В. Горелик, А.В. Орлов, Д.В. Солдатов // М.: РУТ (МИИТ). – деп. в ВИНТИ. – №136. – В2017. – 474 с.

Солдатов Дмитрий Владимирович
**НОРМИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
 НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ
 АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ**

05.22.08 – Управление процессами перевозок

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание учёной степени
 кандидата технических наук

Подписано в печать

Заказ

Формат 60x90 /16

Объем 1,5 усл. п.л.

Тираж 80 экз.
