

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
РУТ (МИИТ)

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)

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор В.И. Линьков

Москва – 2020

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1 УПРАВЛЕНИЕ УРОВНЕМ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ | 14 |
| 1.1 Общая постановка задачи..... | 14 |
| 1.2 Анализ отказов объектов железнодорожной инфраструктуры и их последствий..... | 17 |
| 1.3 Краткие сведения о методологии RAMS..... | 20 |
| 1.4 Обзор методологии УРРАН | 23 |
| 1.5 Специфика применения методологии УРРАН к эксплуатации инфраструктуры железнодорожного транспорта | 26 |
| 1.6 Анализ процессов функционирования железнодорожной инфраструктуры и методов их моделирования | 29 |
| 1.7 Выводы по главе..... | 32 |
| 2 МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ, СВЯЗАННЫХ С ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ..... | 34 |
| 2.1 Общие сведения..... | 34 |
| 2.2 Определение исходных данных для оценки экономических рисков, связанных с надежностью и безопасностью объектов транспортной инфраструктуры | 36 |
| 2.3 Формализация исходных данных для оценки экономических рисков, связанных с надежностью и безопасностью объектов транспортной инфраструктуры | 40 |
| 2.3.1 Общие сведения о формализации процессов функционирования и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры..... | 40 |
| 2.3.2 Сбор и представление исходных данных, используемых при оценке рисков по надежности и безопасности..... | 41 |
| 2.3.3 Формализация процессов функционирования и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры. | 46 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3.4. Определение затрат, связанных с уровнем надежности и безопасности железнодорожной инфраструктуры | 58 |
| 2.4 Выводы по главе | 64 |
| 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ | 66 |
| 3.1 Общие положения | 66 |
| 3.2 Синтез имитационной модели | 67 |
| 3.2.1 Разработка алгоритма модели | 67 |
| 3.2.2 Общий алгоритм имитационной модели | 71 |
| 3.2.3 Алгоритм моделирования отказов и восстановлений железнодорожной инфраструктуры | 73 |
| 3.2.4 Алгоритм моделирования замечаний к функционированию | 75 |
| 3.2.5 Алгоритм моделирования предотказных состояний инфраструктуры | 77 |
| 3.2.6 Алгоритм моделирования движения поездов | 79 |
| 3.2.7 Алгоритм моделирования потока отказов, влекущих прямые и косвенные экономические издержки | 81 |
| 3.2.8 Алгоритм моделирования потока замечаний, влекущих прямые и косвенные экономические издержки | 85 |
| 3.2.9 Алгоритм моделирования потока предотказных состояний, влекущих прямые и косвенные экономические издержки. | 85 |
| 3.2.10 Алгоритм расчета вероятности отказов, приводящих к задержке движения поездов | 85 |
| 3.2.11 Алгоритм расчета вероятности задержки поезда из-за отказов железнодорожной инфраструктуры | 87 |
| 3.2.12 Разработка генераторов случайных величин | 89 |
| 3.2.13 Определение параметров датчиков случайных чисел на основе данных об исследуемом участке железной дороги | 98 |

| | |
|---|-----|
| 3.3 Моделирование процесса функционирования железнодорожной инфраструктуры | 98 |
| 3.4 Представление результатов моделирования | 100 |
| 3.5 Выявление распределений случайных величин времени задержки поездов и количества задержек поездов из-за отказов, предотказных состояний и замечаний к функционированию железнодорожной инфраструктуры..... | 101 |
| 3.6 Оценка экономического ущерба..... | 102 |
| 3.6.1 Оценка прямого экономического ущерба..... | 102 |
| 3.6.2 Оценка косвенного экономического ущерба | 102 |
| 3.7 Оценка результирующего экономического риска | 105 |
| 3.8 Выводы по главе..... | 107 |
| 4 ОЦЕНКА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО РЕСУРСА ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ | 109 |
| 4.1 Функциональный ресурс инфраструктуры железнодорожного транспорта..... | 109 |
| 4.2 Система показателей оценки функционального ресурса..... | 109 |
| 4.4 Выводы по главе..... | 122 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 125 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 127 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1 | 137 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | 147 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3 | 149 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 4 | 159 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 5 | 178 |

ВВЕДЕНИЕ

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 «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») функционирует с превышением нормативного срока эксплуатации. Названные выше 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 функционирования 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 вышесказанным в настоящее время весьма актуальной является задача разработки единого подхода к оценке 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., Солдатова 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-технологической 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, связанных с процессом 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 взаимосвязь между уровнем надежности функционирования объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры и соответствующими техническими и экономическими рисками, возникающими при

реализации производственного процесса технической эксплуатации, а также организационно-технологической надежности перевозочного процесса с учетом состояния объектов транспортной инфраструктуры.

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. Предложен 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 объектов 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.

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.

Достоверность основных научных 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.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем. Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработанные в ней методы, модели и алгоритмы 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.

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 Международная научно-практическая конференция «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).

Наиболее существенные новые научные результаты, полученные непосредственно соискателем и 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.

Содержание диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 83 наименований, 5 приложений. Диссертация изложена на 182 страницах машинописного текста.

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

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 данной главе 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 моделей и методов анализа и формализации процессов и устранения возникновения различных инцидентов, связанных с эксплуатацией объектов железнодорожной транспортной 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.

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.

Полученные и изложенные во второй 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 функционированием объектов 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 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 какие результаты 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.

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 объектов железнодорожной инфраструктуры. В качестве комплексного показателя 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.

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 транспортной инфраструктуры.

1 УПРАВЛЕНИЕ УРОВНЕМ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

1.1 Общая постановка задачи

ОАО «Российские железные дороги» серьезно относится к вопросам финансовой устойчивости и независимости. Решение этих вопросов компания видит, в первую очередь, в повышении эффективности реализации производственных процессов при одновременной оптимизации структуры подразделений всех уровней, что позволит предоставлять качественные услуги на транспортном рынке, обеспечивать высокий уровень привлекательности железнодорожного транспорта для клиентов при минимальных издержках.

Специфика производственной деятельности компании заключается в том, что процесс предоставления услуг перевозки обеспечивается в результате эксплуатации как подвижного состава, так и развитой инфраструктуры, представляющих собой сложные технические системы.

Отказы в технических системах могут снижать эффективность реализации производственных процессов, вплоть до полной невозможности их осуществления. При этом сами отказы представляют собой в общем случае события случайной природы. Это означает, что с той или иной вероятностью некоторый отказ может возникнуть в любой момент времени эксплуатации технической системы.

Если говорить о железнодорожной инфраструктуре, то ее функционирование обеспечивает реализацию перевозочного процесса. Поэтому отказы в железнодорожной инфраструктуре могут приводить к снижению качества перевозок, в первую очередь, за счет незапланированных задержек в движении поездов, либо нарушении безопасности перевозок.

Задержки в движении поездов будут зависеть не только от характеристик надежности объектов железнодорожной инфраструктуры, но и от характеристик реализуемого на участке железных дорог процесса перевозок. Поскольку значение задержек в движении поездов, как и вероятность их возникновения связаны со

случайными событиями, какими являются отказы технических средств железнодорожной инфраструктуры, то уместно говорить о внутренних техническом и экономическом рисках, обусловленных собственной производственной деятельностью компании.

Снижение вероятности отказов объектов железнодорожной инфраструктуры безусловно снижает технические и экономические риски, связанные с производственной деятельностью, но требует соответствующих затрат, поэтому бесконечное снижение экономических рисков невозможно, так как потребует неограниченных ресурсов.

В настоящее время непосредственно на поддержание производственного процесса в компании по разным оценкам приходится до 80% расходов. При этом более 50% от общего объема затрат, а по некоторым оценкам более 66% от всех расходов на перевозки [61] приходится на содержание и эксплуатацию инфраструктуры, что и не удивительно, так как ОАО «РЖД» в своей деятельности опирается на развитую распределенную на большой территории инфраструктуру, включающую в себя большое количество различных технических объектов. При этом стоимость основных фондов транспортной инфраструктуры составляет более 60% от общей стоимости основных средств ОАО «РЖД».

Соотношение расходов на капитальный ремонт и текущую эксплуатацию в различные годы изменяется, так как имеется существенная неравномерность выработки основными средствами необходимого ресурса, однако затраты на текущую эксплуатацию преобладают и достигают 80%, а иногда и больше.

К сожалению, в настоящее время ситуация с состоянием инфраструктуры ОАО «РЖД» усложнилась. Железнодорожная инфраструктура - самая изношенная часть хозяйства РЖД, сообщила монополия [78]. В результате многолетнего недофинансирования на начальном этапе реформирования ОАО «РЖД» износ некоторых элементов инфраструктуры железнодорожного транспорта, наиболее критичных по последствиям выхода из строя, достигает 70% [76].

Старение и износ инфраструктуры характерны для всех хозяйств. Так, анализ состояния материально-технической базы хозяйства автоматики и телемеханики

показывает, что на сети железных дорог на начало 2019 года износ основных производственных средств хозяйства автоматики и телемеханики составил 56 %. В частности, системами электрической централизации с истекшим сроком эксплуатации оснащено 107398 стрелок, а системами автоматической блокировки – 36391 км путей. Как следствие, увеличивается количество отказов, которые являются объективной причиной нарушения технологии перевозок и влияют на их безопасность. Под отказами при этом понимают события, заключающиеся в потере работоспособности технического объекта.

Если сопоставить с этим объемы перевозок, то говорить о снижении их объемов в последние годы не приходится, наоборот, в целом потребность в грузоперевозках возрастает. Об этом говорят опубликованные отчеты об объемах грузоперевозок РЖД[24]. Согласно этому планируется достижение:

- средней участковой скорости движения грузового поезда на уровне 41,2 км/ч (+0,7 % к уровню 2018 года),
- среднесуточной производительности локомотива рабочего парка в грузовом движении – 2 165 тыс. ткм брутто (+1,4 %),
- среднего веса грузового поезда – 4 085 т (+0,2 %),
- повышения доли грузовых отправок в груженных вагонах, доставленных в нормативный срок, – до 99 %, или на 2,3 п. п. к уровню 2018 года,
- повышения скорости движения пассажирских поездов на протяжении 1 106,4 км железнодорожного пути, грузовых поездов – на 1 088,5 км.

Кроме того, планируется дальнейшее развитие Центрального транспортного узла, в том числе сокращение межпоездных интервалов движения поездов на Московском центральном кольце и дальнейшая реализация проекта «Московские центральные диаметры» МЦД, совершенствование принципов разработки плана формирования грузовых поездов для достижения баланса между растущим спросом на перевозки и возможностями железнодорожной инфраструктуры, реализация инвестиционных проектов по развитию железнодорожной инфраструктуры на подходах к морским портам Дальнего Востока, Азово-Черноморского и Северо-Западного бассейнов и другие проекты.

Текущее состояние железнодорожной инфраструктуры и рост грузонапряженности безусловно увеличивают риски, связанные с реализацией компанией производственных процессов, что следует учитывать при оценке экономической безопасности и устойчивости развития холдинга. Это требует разработки соответствующей методики их учета и определения того, как влияет уровень надежности и безопасности железнодорожной инфраструктуры на заданном участке железных дорог с определенным характером эксплуатационной работы на уровень экономических рисков, а также и решения обратной задачи.

1.2 Анализ отказов объектов железнодорожной инфраструктуры и их последствий

В подтверждение вышесказанного про текущее состояние железнодорожной инфраструктуры приведем некоторые данные, взятые из Комплексной автоматизированной системы учета, контроля и устранения отказов технических средств и анализа надежности (КАС АНТ).

Так, общее количество отказов за 2019 год технических средств железнодорожной автоматики и телемеханики составило 9761 шт. и, несмотря на снижение по сравнению с 2018 годом на 2.9%, остается значительным. Динамика отказов технических средств и технологических нарушений по вине хозяйства автоматики и телемеханики по месяцам приведена на рисунке П.1.1 Приложения 1. Справка о количестве отказов технических средств на сети железных дорог ОАО «РЖД» по хозяйству автоматики и телемеханики приведена в таблице П 1.1 [2] Приложения 1. Динамика отказов в работе технических средств всех категорий по годам и месяцам в хозяйстве автоматики и телемеханики приведена на рисунке П.1.2.

Следует отметить, что в хозяйствах ОАО «РЖД» отказы в зависимости от последствий классифицируют на категории:

– отказы 1-й категории – отказы, приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) на 1 час и более, либо

приведшие к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта;

– отказы 2-й категории – отказы, приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) продолжительностью от 6 минут до 1 часа;

– отказы 3-й категории – отказы, не имеющие последствий, относящихся к отказам 1-й и 2-й категорий (учет проводится в рамках автоматизированных систем управления хозяйствами).

В связи с тем, что влияние эксплуатационной деятельности хозяйств на деятельность ОАО «РЖД» оказывают только отказы 1-й и 2-й категорий, остальные отказы системой КАС АНТ не фиксируются.

Таким образом, количество отказов, которые негативным образом сказываются на перевозочном процессе достаточно велико. Это подтверждают данные о количестве задержанных поездов. Так по сети железных дорог ОАО «РЖД» за 2019 год в системе КАСАНТ зарегистрировано 141299 потерь поездо-часов от отказов 1 и 2 категорий. Распределение потерь поездо-часов от отказов 1 и 2 категории в ОАО «РЖД» приведено на рисунке П.1.3, а общее количество задержанных поездов за 2019 год по хозяйству автоматики и телемеханики с распределением по дорогам – на рисунке П.1.4.

Что касается нарушения безопасности, то только по хозяйству автоматики и телемеханики в 2019 году допущено 9 событий, что на 31 процент отличается от результатов предыдущего года. Распределение количества событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, приведено на рисунке П.1.5 Приложения 1, а в таблице П.1.2 приведены характеристики и описание данных событий.

События, связанные с нарушением безопасности имеют существенно больше последствий, поэтому, несмотря на, казалось бы, их небольшое количество материальный ущерб исчисляется десятками миллионов рублей. Так, материальный ущерб ОАО «РЖД» по причине нарушений безопасности в год

может достигать порядка 60 млн. рублей [40].

Становится очевидным, что безотказная работа технических устройств инфраструктуры железных дорог является основой обеспечения заданной пропускной и провозной способности железных дорог, обеспечения устойчивости функционирования и гарантированного качества услуг.

В ранее использовавшихся национальных стандартах не отражались вопросы управления инвестициями, затратами на текущее содержание инфраструктуры и подвижного состава. Поэтому в структурных подразделениях обслуживание технических средств велось на основе нормативного срока их службы, как правило, без учета текущего состояния, что приводило к нерациональному расходованию средств и ненадлежащему техническому состоянию объектов инфраструктуры.

Так как имеющиеся в компании средства на обновление основных фондов не обеспечивают требуемые объемы обновления (об этом говорят систематические дотации компании со стороны государства), то в рамках усилий по обеспечению качества предоставляемых транспортных услуг, повышению привлекательности и конкурентоспособности компании на рынке, обеспечения поступательного развития и экономической безопасности, разработан перечень мероприятий, касающихся изменения организационной структуры ОАО «РЖД», разработаны методы сохранения работоспособности средств транспортной инфраструктуры. В основе методов лежит оптимизация расходов в деятельности компании и ее отдельных структурных подразделений исходя из экономических соображений, что рассматривается в качестве одной из ключевых задач компании, изложенных в [76]. В документе прописано конкретно: «важной задачей инновационного развития ОАО «РЖД» остается сокращение стоимости жизненного цикла объектов инфраструктуры при условии обеспечения высокого уровня надежности технических средств».

Так, в рамках поиска путей оптимизации расходов на содержание инфраструктуры компания обратила внимание на возможность применения в управлении эксплуатационной деятельностью европейского стандарта CSNEN50126-1 [80], который нормативно определяет методологию обеспечения

безотказности, готовности, ремонтпригодности и безопасности (RAMS).

1.3 Краткие сведения о методологии RAMS

Методология RAMS определяет подход к эксплуатации объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Основная цель внедрения методологии RAMS заключается в снижении стоимости жизненного цикла объектов транспортной инфраструктуры и подвижного состава при сохранении требуемого уровня надежности и безопасности перевозочного процесса. Сущность RAMS представлена схемой на рисунке 1.1. RAMS объединяет в себе ряд стандартов: EN50126, EN50126-2, EN50128, EN50129, ГОСТ Р 61508, IEC62061(2005), IEC62278(2002), IEC 62279(2002).

Жизненный цикл продукта в соответствии с RAMS (рассматривается в EN50126) представляется на основе V-модели, общий вид которой представлен на рисунке 1.2. В модели выделяют нисходящую ветвь, называемую разработкой или проектированием, восходящую ветвь – сборку, установку и приемку, и горизонтальный участок – эксплуатация объекта по назначению. Модель показывает, что оценка показателей надежности, безопасности, готовности и ремонтпригодности осуществляется на всех основных этапах разработки, производства и эксплуатации во взаимосвязи друг с другом.

В основу управления безопасностью и надежностью технических объектов положены следующие положения [83]:

- Абсолютной надежности и безопасности не существует – после принятия защитных мер всегда остается некоторый остаточный риск.
- Остаточный риск не должен быть выше допустимого уровня.
- Допустимый уровень риска оценивается и корректируется на всех этапах жизненного цикла.

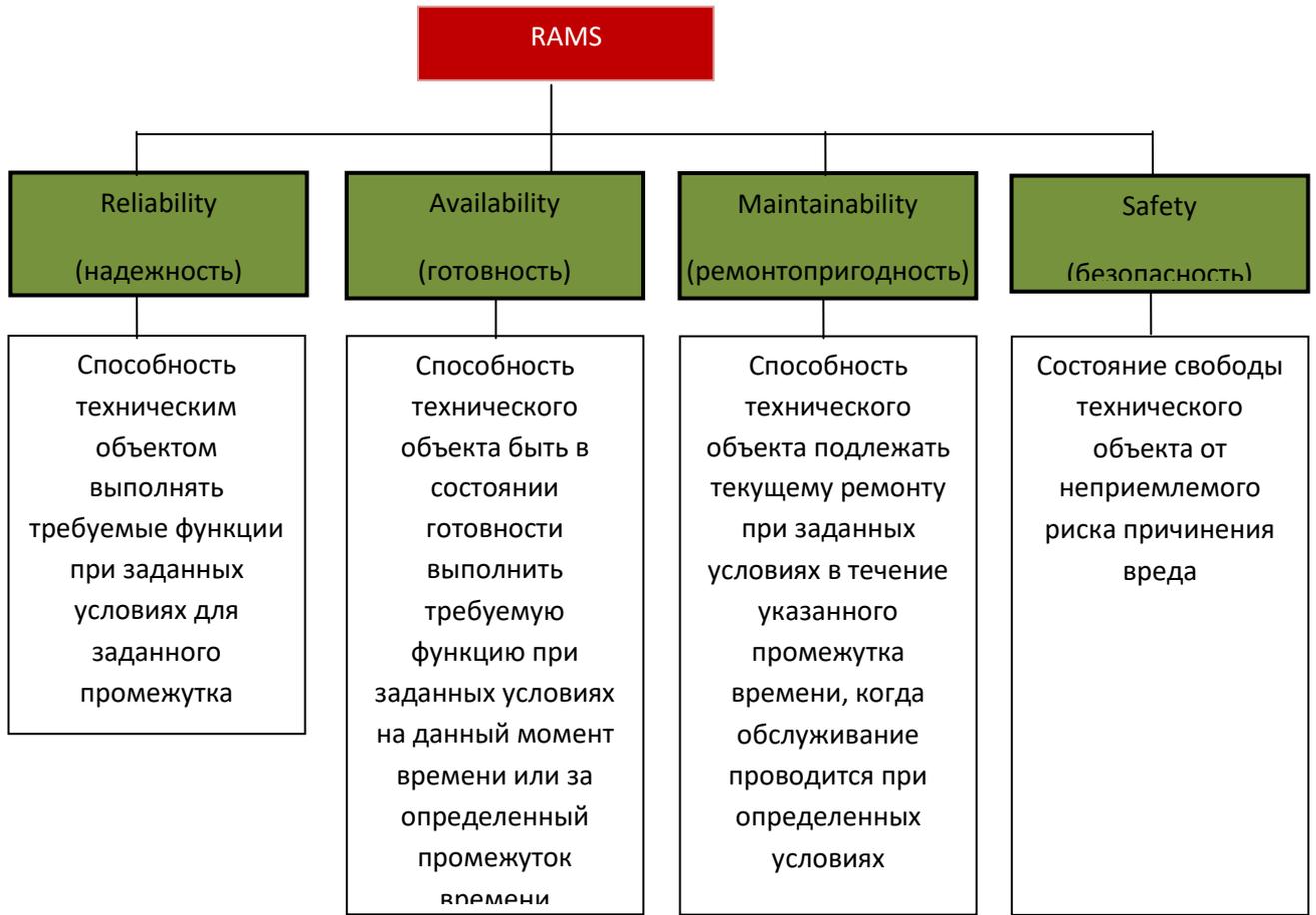


Рисунок1.1 – Сущность RAMS



Рисунок1.2 –V-модель жизненного цикла

Учет рисков на всех этапах жизненного цикла является принципиально новым подходом к управлению надежностью и безопасностью объектов железнодорожной инфраструктуры. При этом достижение показателями RAMS установленных требований достигается путем воздействия на выявляемые влияющие факторы.

Возможные риски и их допустимые значения определяются еще во время разработки и внедрения продукта в производство, на этапах формирования концепции создания и определения условий его применения. На их основе определяют параметры продукта, которые оформляют в виде технического задания. Затем с учетом уже фактических рисков подтверждаются параметры продукта после установки и настройки непосредственно при приемке в эксплуатацию. Далее оцениваются фактические параметры объекта и сопутствующие риски в процессе эксплуатации, вплоть до списания и утилизации продукта[25,26].

Анализ методологии RAMS показал, что она имеет ряд существенных недостатков, которые не раз отмечали отечественные специалисты и руководители аппарата управления ОАО «РЖД», в частности:

-Методология, нормативно определенная стандартом EN50126, не в полной мере решает задачи управления надежностью, безопасностью, ресурсами и не охватывает аспекты долговечности, предусмотренные отечественными стандартами.

- RAMS практически не рассматривает человеческий фактор и не затрагивает проблемы управления затратами на содержание и модернизацию объектов инфраструктуры на этапах жизненного цикла [66].

- Методология оперирует только показателями надежности и безопасности конкретных технических средств [77].

По указанным причинам в полной мере переложить методологию RAMS для условий Российских железных дорог оказалось невозможным. В результате глубокой переработки и дополнений, распространения на стоимость жизненного цикла была разработана система управления ресурсами, рисками и анализа

надежности объектов железнодорожного транспорта на этапах жизненного цикла – методология УРРАН.

1.4 Обзор методологии УРРАН

Методология УРРАН разработана для оптимизации управления ресурсами на основе эксплуатационных показателей надежности и безопасности с учетом оценки рисков.

Основные особенности методологии УРРАН заключаются в следующем:

1. Методология ориентирована на оценку и обеспечение надежности и безопасности технологического процесса, каковым является перевозочный процесс. То есть в ней исследуются не только показатели отдельных технических объектов, но и оценивается их влияние на организацию технологического процесса в целом и вклад в его показатели. Благодаря этому отличию методология УРРАН позволяет осуществлять прозрачный переход от показателей надежности и безопасности конкретных технических объектов к показателям, отражающим эксплуатационную деятельность компании и ее хозяйств.

2. В основе УРРАН лежит технология управления рисками, определенная ГОСТ Р54505-2011[41]. Управление рисками позволит достичь такого состояния железнодорожного транспорта, при котором риски причинения вреда людям и окружающей среде, экономических потерь, нанесения ущерба инфраструктуре, подвижному составу и уменьшению значений операционных показателей деятельности компании снижены до приемлемого уровня [77].

3. Управление надежностью и безопасностью технологического процесса осуществляется на основе применимых для ОАО «РЖД» эксплуатационных показателей надежности и безопасности объектов и процессов.

4. Управление инвестициями осуществляется на основе рисков с учетом стоимости жизненного цикла, долговечности и технического обслуживания объектов железнодорожного транспорта по фактическому состоянию и с обоснованием затрат на проведение реконструкции/модернизации.

5. Управление капитализацией компании за счет повышения экономической эффективности содержания инфраструктуры [20, 21, 22, 68, 69, 70, 71, 72,74].

6. В отношении рисков, связанных с жизнью и здоровьем людей, животных, экологической безопасностью при принятии защитных мер они имеют приоритет по сравнению с коммерческими интересами ОАО «РЖД».

7. Связанный с рисками ущерб определяется в стоимостном выражении[64].

Общая концепция УРРАН представлена на рисунке 1.3. Ключевые показатели надежности и безопасности и их функции приведены в таблице П.1.3 Приложения 1.

Что касается реализованного подхода к анализу рисков, то его в методологии предусматривается осуществлять на основе модели ALARP – «As low as reasonably practicable» [67], то есть «настолько низко, насколько целесообразно». По сути, подразумевается величина риска настолько низкой, насколько это экономически оправданно и технически достижимо. Графически ALARP представляет собой точку оптимума между затратами на предупреждение риска и потенциальными потерями от возникновения рисков событий (рисунок 1.4).



Рисунок 1.3 – Концепция УРРАН

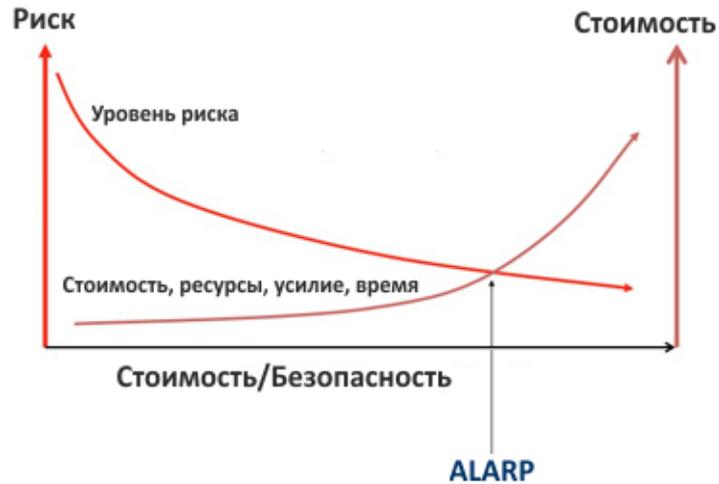


Рисунок1.4 – Определение ALARP

Общий вид модели ALARP при оценке риска, называемой иногда «галстук-бабочкой», представлен на рисунке 1.5. Как видно из диаграммы, всего выделяют три зоны риска: приемлемую, допустимую и неприемлемую.

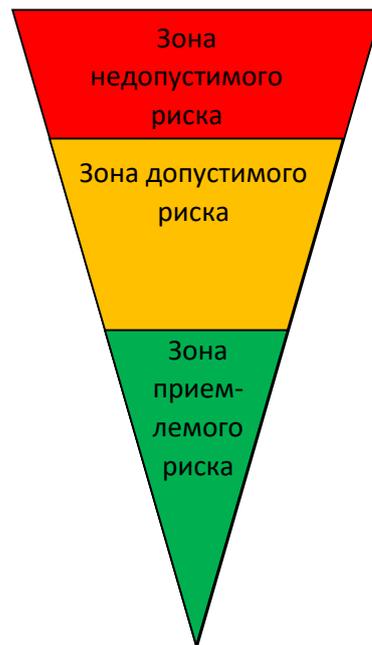


Рисунок1.5 – Модель ALARP

Риск, превышающий установленный, максимально допустимый уровень считается неприемлемым при любых обычных обстоятельствах. Допустимый риск находится между установленным максимально допустимым и заданным приемлемым уровнем. В отличие от приемлемого, допустимый риск говорит о том, что лицо готово допускать такой риск, если это приносит какую-либо иную выгоду при условии, что как только это станет возможным, риск будет уменьшен. Зона

допустимого риска часто называется зоной ALARP. В зоне приемлемого риска нет необходимости дополнительных затрат для его дальнейшего снижения, она находится ниже заданного приемлемого уровня.

Следует отметить, что модель ALARP при оценке рисков в методологии УРРАН получила дополнительное развитие [25,26]. Так в методологии анализ рисков осуществляют на основе матриц рисков, где в столбцах указывают различные уровни тяжести последствий, а в строках частоту (вероятность) событий. На пересечении строки и столбца указывается уровень риска.

Принятая в УРРАН классификация тяжести последствий приведена в таблице П.1.4 Приложения 1, а классификация частоты событий – в таблице П.1.5 Приложения 1.

Методология УРРАН охватывает как объекты инфраструктуры, так и подвижной состав. Применительно к инфраструктуре железнодорожного транспорта применение методологии имеет определенную специфику[38].

1.5 Специфика применения методологии УРРАН к эксплуатации инфраструктуры железнодорожного транспорта

Инфраструктура железнодорожного транспорта представлена объектами различного назначения, которые отнесены к соответствующим хозяйствам:

- хозяйству автоматики и телемеханики;
- хозяйству электрификации и электроснабжения;
- путевому хозяйству.

Объекты инфраструктуры эксплуатируются при различных условиях (нагрузка, климат и проч.), имеют различные параметры, оказывают различный вклад на перевозочный процесс.

С целью упрощения при анализе функционирования инфраструктуры широко применяют понятие эталонного объекта – типового, наиболее распространенного на сети дорог комплекса устройств, который выполняет в перевозочном процессе конкретную функцию в пределах известного участка и для

которого уже рассчитаны показатели надежности и безопасности, как для технической системы.

Так, выделяют следующие основные эталонные объекты:

– В хозяйстве автоматики и телемеханики:

- эталонный блок-участок;
- эталонный комплекс технических устройств управления стрелкой.

– В хозяйстве пути:

- эталонная конструкция пути;
- эталонный стрелочный перевод.

– В хозяйстве электрификации и электроснабжения:

- эталонная контактная сеть;
- эталонная тяговая подстанция;
- эталонная линия электропередач [48].

Так как каждый эталонный объект находится в зоне ответственности конкретного подразделения и в принципе может быть определено его влияние на перевозочный процесс, то такой подход позволяет не только упростить расчеты, но и оценивать эффективность работы структурных подразделений по обеспечению заданных показателей качества перевозок.

С целью проведения анализа надежности и безопасности для разных периодов жизненного цикла введены группы показателей:

– допустимые значения – это ограничения, определяемые на основе значения среднего времени простоя поездов на конкретном участке, из регламентированного коэффициента простоя инфраструктуры, либо из допустимых экономических издержек, связанных с простоем поездов;

– проектные значения – это значения показателей, найденные расчетным путем из схем надежности в предполагаемых условиях эксплуатации, технического обслуживания и ремонта;

– фактические значения – это значения показателей, определяемые на основе статистических данных об отказах и восстановлениях объекта инфраструктуры в процессе эксплуатации.

Допустимые показатели определяются в периоде научно-исследовательских работ [27, 28,29], проектные – в периоде опытно-конструкторской разработки, а фактические – в эксплуатационном периоде.

Сопоставление указанных групп показателей между собой и позволяет формулировать выводы о соответствии показателей функционирования объекта инфраструктуры заданным и разрабатывать мероприятия по управлению надёжностью и безопасностью.

В части оценки фактических и проектных показателей надежности и безопасности существует достаточно много исследований, которые базируются на положениях теории надежности и математической статистики[55,56].

Что касается допустимых показателей, то в настоящее время в основном проработан подход, заключающийся в использовании в качестве основы для анализа надежности показателя, который называется допустимый коэффициент готовности объекта инфраструктуры, однако, этот показатель в основном характеризует техническую сторону функционирования объекта инфраструктуры, а экономические критерии к нему непосредственно не привязаны, поэтому рассчитываемые риски носят неэкономический характер. Что касается показателей, определяемых величиной экономических издержек, связанных с остановками и простоем поездов из-за отказов, то возможность их применения только заявляется, но как определить сами показатели не указывается [46]. Автору видится, что сами допустимые значения показателей надежности и безопасности должны определяться величиной экономических издержек, связанных с ними.

В связи с вышесказанным, задачей данной диссертации является разработка методики, позволяющей в денежном эквиваленте оценить величину ущерба от отказов устройств железнодорожной инфраструктуры при известном характере эксплуатационной работы с учетом вероятности возникновения ущерба, то есть экономического риска. При этом методика должна позволить выявлять связь между экономическим риском и уровнями надежности и безопасности железнодорожной инфраструктуры.

1.6 Анализ процессов функционирования железнодорожной инфраструктуры и методов их моделирования

Если величина прямых экономических издержек будет определяться в первую очередь непосредственно уровнями надежности и безопасности инфраструктуры, то величина косвенных экономических издержек в существенной мере будет зависеть от того, как взаимоувязаны между собой два основных процесса: процесс движения поездов на участке, процесс отказов и восстановлений объектов инфраструктуры персоналом.

Помимо сложной взаимосвязи процессов между собой важно отметить, что на каждый процесс оказывают влияние много различных факторов. Так, процесс движения поездов зависит от класса и специализации железнодорожной линии, составленного графика движения, допустимых скоростей движения, категории поезда, взаимодействия служб и других факторов. Безотказность объектов инфраструктуры зависит от климатических условий, нагрузки, элементной базы, природы протекающих процессов, качества содержания и иных факторов. Параметры процесса восстановления состояния объекта инфраструктуры определяются местонахождением объекта, наличием путей подхода или подъезда, стратегией технического обслуживания и ремонта, квалификацией и стажем персонала, уровнем его физического состояния и множеством других факторов.

В результате и процесс движения поездов по участку железных дорог, оборудованному инфраструктурой, и процесс отказов с последующим восстановлением носят в той или иной мере случайный характер, и, следовательно, целесообразно описывать их с позиции теории вероятностей. Тогда и оценка экономического ущерба также должна носить вероятностный характер и определяться из рисков в виде возможных задержек поездов, связанных с отказами устройств на участке.

Для того, чтобы выполнить оценку экономического ущерба необходимо реализовать модель процесса, а для получения количественной оценки показателя необходима математическая модель.

Можно выделить два основных подхода к моделированию – аналитическое моделирование и имитационное моделирование. При аналитическом моделировании процесс описывается выражениями, позволяющими в явной форме определить значение исследуемого параметра от влияющих факторов. Исследование аналитических моделей, как правило, осуществляется методами математического анализа. При имитационном моделировании в первую очередь подразумевается численный метод проведения экспериментов с математическими моделями, описывающими поведение исследуемого объекта. В процессе имитационного моделирования первоначально составляется содержательное описание процесса функционирования, формализованное в виде математической модели, последняя затем преобразуется в математический алгоритм, в котором сохраняется логическая структура, последовательность протекания изучаемых процессов во времени, характер и состав информации о состоянии объекта [12,13].

Аналитическое моделирование, несмотря на возможность получения сразу готового результата при любых сочетаниях исходных данных, часто требует существенных усилий на реализацию самой математической модели. Как правило, такие модели формируются из более простых аналитических моделей, однако даже для простых аналитических моделей существует множество ограничений применимости. Если говорить о случайных процессах, то, например для простейшего потока, требуется соблюдать ограничения отсутствия последействия, ординарности и ряда иных. При этом, разумеется, каждая из аналитических моделей всегда описывает исходный процесс с некоторой долей приближения. Для сложных процессов, где имеется сложная логическая структура между факторами далеко не всегда удастся получить аналитическую модель, а если и удастся, то часть логической структуры в большинстве случаев теряется.

Имитационные модели сложных процессов с множеством разнородных взаимосвязей между факторами получать существенно проще, точность и адекватность моделей при этом могут оказаться не хуже, а даже лучше аналитических, а структура – «прозрачней». Кроме того, имитационные модели легче поддаются «эволюции», чем аналитические. Так, новые факторы, условия

или ограничения добавляют в уже существующую модель без необходимости её переделки в виде дополнительной логически увязанной компоненты, тогда как в аналитических моделях подобные изменения могут носить весьма ограниченный характер, либо могут оказаться невозможными. Следует отметить основной недостаток имитационного моделирования, который заключается в большом количестве вычислений, так как моделирование процессов осуществляется численно, однако при современной производительности вычислительной техники он не является критическим.

Проведенный анализ методов моделирования определяет целесообразность применения в диссертации метода имитационного моделирования. Так как требуется моделировать случайные процессы, то можно воспользоваться методом Монте-Карло.

Метод Монте-Карло – это метод статистического моделирования. Реализованная таким методом имитационная модель позволит «разыграть» множество реализаций процесса функционирования инфраструктуры на исследуемом участке железных дорог при различных сочетаниях влияющих факторов с учетом вероятностей их появления, а также характера эксплуатации оборудования. Полученные результаты в последующем можно обработать известными методами математической статистики, а затем построить вероятностные модели.

Выделим ряд основных этапов, которые целесообразно выполнить для реализации в рамках настоящего исследования имитационного моделирования методом Монте-Карло:

1. Осуществить мониторинг изучаемого процесса функционирования транспортной инфраструктуры во время ее эксплуатации на заданном участке. Цель мониторинга - изучение моделируемых случайных процессов, сбор и представление исходных данных для моделирования. Поскольку процессы случайные, то исходные данные должны носить статистический характер и обрабатываться статистическими методами.

2. Провести моделирование. Для этого необходимо разработать модели,

позволяющие «разыгрывать» случайные события с заданными характеристиками, а также логически увязывать эти события между собой. Затем, многократно используя разработанную модель, смоделировать «искусственную статистику».

3. Выполнить оценку результатов моделирования. Оценка должна представлять собой результат обработки статистических данных, полученных в результате имитационного моделирования, а также получение вероятностных распределений искомых изучаемых величин.

1.7 Выводы по главе

В данной главе диссертационной работы получены следующие основные результаты:

1. Проведены анализ отказов железнодорожной инфраструктуры и оценка их влияния на экономические издержки компании ОАО «РЖД». Выявлено, что в управлении надежностью и безопасностью функционирования железнодорожной инфраструктуры в соответствии с методологией УРРАИ следует отталкиваться от экономических рисков, связанных с производственной деятельностью в виде услуг перевозки.

2. В работе приведен системный анализ процессов, влияющих на уровень экономических издержек, связанных с эксплуатацией объектов железнодорожной транспортной 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.

3. Обосновано, что для оценки количественной взаимосвязи между уровнями надежности и безопасности объектов железнодорожной инфраструктуры и уровнем экономических рисков целесообразным является применение метода Монте-Карло, который в отличие от ранее применявшихся для решения задачи

методов аналитического моделирования позволяет учесть сложную логическую природу явлений, влияющих на перевозочный процесс, обеспечить прозрачность структуры и «эволюционирование» модели.

2 МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ, СВЯЗАННЫХ С ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

2.1 Общие сведения

Оценка рисков, связанных с надежностью и безопасностью функционирования объектов железнодорожной инфраструктуры должна базироваться на непрерывном мониторинге процесса их функционирования. В процессе мониторинга в зависимости от того, какие риски должны в последующем оцениваться, требуется осуществлять сбор и регистрацию в заданном виде данных о функционировании системы ЖАТ за определенный интервал времени, называемый расчетным периодом. Прогноз рисков осуществляется в предположении о том, что процесс функционирования системы ЖАТ в последующем в целом будет протекать аналогичным образом.

При оценке рисков по надежности и безопасности исходные данные должны включать в себя сведения, указанные на рисунке 2.1.

В результате обработки указанных данных должны определяться свойства и характеристики взаимосвязанных процессов использования железнодорожной инфраструктуры по назначению и отказов технических средств, в том числе опасных.

Изучив в процессе последующего анализа особенности каждого из приведенных процессов и определив их количественные характеристики, можно сформировать адекватные модели процессов, детерминированные, либо стохастические (вероятностные), статические, либо динамические. Статические модели описывают процессы, характеристики которых не меняются во времени – стационарные процессы, динамические модели описывают процессы, характеристики которых изменяются во времени – нестационарные процессы. Выбор класса модели осуществляется в результате анализа исходных данных.

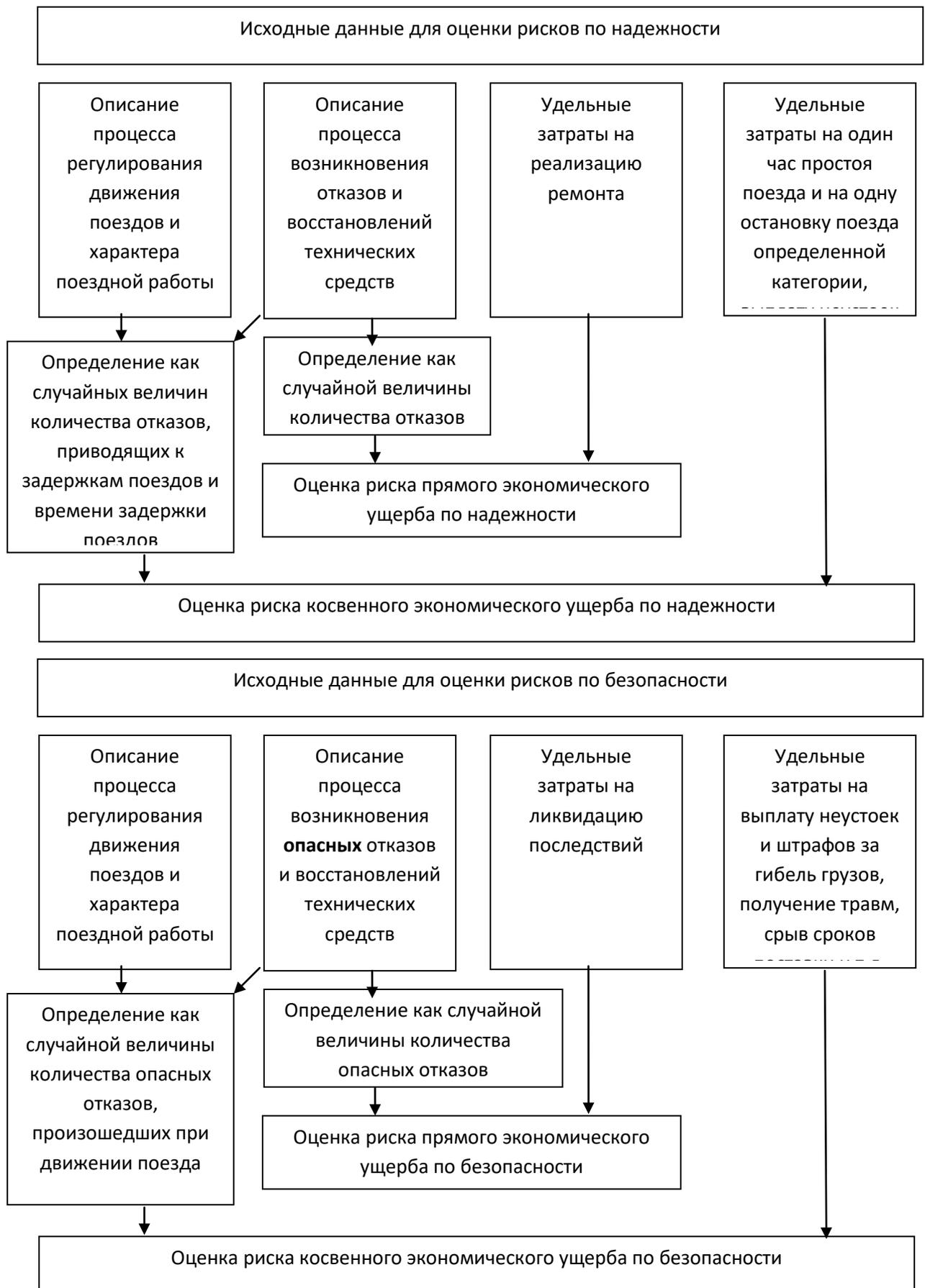


Рисунок 2.1 – Исходные данные для оценки рисков по надежности и безопасности функционирования железнодорожной инфраструктуры

2.2 Определение исходных данных для оценки экономических рисков, связанных с надежностью и безопасностью объектов транспортной инфраструктуры

Основными источниками экономических рисков, связанных с эксплуатацией железнодорожной инфраструктуры и обусловленных их неабсолютной надежностью и безопасностью являются:

- прямые затраты на реализацию процесса устранения отказов элементов инфраструктуры (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.

При этом следует отметить, что для разных хозяйств соотношение между указанными затратами различно. Например, для хозяйства пути наибольшие затраты на устранение отказов, не приведших к опасным последствиям, связаны непосредственно с реализацией процесса устранения отказов, тогда как для хозяйств электроснабжения, а также автоматики и телемеханики наибольшими являются косвенные издержки, которые существенно превышают затраты собственно на ремонт.

Оценка прямых затрат на устранение отказов базируется на:

- информации о количестве и характере отказов за некоторый интервал времени;
- уровне затрат на устранение отказов за тот же интервал времени.

Оценка косвенных издержек, связанных с влиянием отказов на процесс движения поездов основана на:

- информации о характере поездной работы на участке;
- уровне затрат, обусловленных задержками в движении поездов;

информации о количестве и характере отказов за некоторый интервал времени.

В качестве источников исходных данных для получения сведений о функционировании железнодорожной инфраструктуры можно использовать данные из соответствующих информационных систем, либо при отсутствии последних – из соответствующих отчетов. Так, например:

– сведения о характере поездной работы можно получить из информационной системы ГИД «Урал»;

– сведения об отказах и восстановлениях представлены в отчетах систем: АСУ-Ш-2 (КЗ УО-ЖАТС, КЗ-АЛСН), КАС АНТ.

Вместе с тем, сведения об отказах и восстановлениях из систем АСУ-Ш-2 и КАС АНТ являются неполными, кроме того, в этих системах не учитываются данные о замечаниях к работе технических устройств, о предотказных состояниях, инцидентах и об отклонениях от норм содержания, выявленных в результатах установленных ревизий.

Предотказное состояние железнодорожной техники – это неисправное состояние железнодорожной техники, при котором вероятность ее перехода в неработоспособное состояние в течение заданной наработки не превышает допустимого значения.

Инцидент – событие, вызванное переходом железнодорожной техники в неработоспособное состояние, отклонением от заданных режимов выполнения технологических процессов на инфраструктуре ОАО «РЖД», в том числе по причине внешнего воздействия, и повлекшее за собой нарушение графика движения поездов.

Все перечисленные события при их накоплении могут приводить к отказам. Более того, известна практика «скрытия» специалистами отказов, когда, в случае отсутствия последствий в виде задержек поездов их списывают в другие категории событий, например в предотказные состояния. Поэтому указанные сведения обязательно должны использоваться при оценке рисков по надежности и безопасности железнодорожной инфраструктуры.

Информация об указанных событиях для систем железнодорожной автоматики и телемеханики имеется в следующих информационных системах:

- отчеты о состоянии технических средств – КАСАТ.
- данные о предотказных состояниях – СТДМ.
- информация о предотказных состояниях и замечаниях – ЕК АСУИ.
- дополнительные сведения об отказах и замечаниях, выявленных в результатах ревизий – АС-КМО.

Данные информационные системы могут быть также использованы совместно с системой внешнего блокирования железнодорожной стрелки. Диагностика состояния системы может осуществляться косвенным способом (отсутствие возможности перевода стрелки) или средствами самодиагностики и контроля состояния с последующей передачей информации о статусе системы на пост ЭЦ, дежурному по станции, электромеханику, диспетчеру и т.д. по дополнительно организованным каналам связи. Полное описание предложенной системы приведено в полученном патенте РФ № 2721440 [60].

Аналогичные информационные системы имеются в хозяйствах пути и электроснабжения. В качестве примера рассмотрим систему и способ непрерывного мониторинга состояния контактной сети рельсового транспорта, разработанные для хозяйства электроснабжения и позволяющие повысить достоверность информации предотказных состояний данных объектов транспортной инфраструктуры. Эта система относится к классу дистанционных измерительных систем и предназначена для использования в составе систем обеспечения безопасности эксплуатации тягового подвижного состава как для анализа диагностических данных на стационарном оборудовании линейных постов мониторинга, так и для использования в составе бортовых устройств локомотивов.

Предложенная система обладает повышенным уровнем автоматизации принятия решений и невысоким числом ложных оповещений о возможности возникновения аварийной ситуации, что существенно снижает ущерб от отказов систем и оборудования контактной сети, а также повышает производительность труда оперативного и технического персонала за счет отсутствия необходимости

постоянного слежения за ситуацией и снижения объемов необоснованных технических работ. Основные принципы системы, а также ее варианты реализации могут быть легко адаптированы для интеграции с другими объектами промышленности и транспорта, использующими контактную подвеску, к которым относятся троллейбусные и трамвайные линии. Кроме того, данное решение также может быть использовано для непрерывного мониторинга состояния линий электропередач.

Разработанный способ непрерывного мониторинга состояния контактной сети рельсового транспорта заключается в том, что:

1) собирается информация с датчиков физических параметров подвески, распределенных по крайней мере на одном анкерном участке контактной сети;

2) собранная информация обрабатывается с использованием систем туманных вычислений, прямо или косвенно подключенных по сетям передачи данных к датчикам физических параметров в бесперебойном режиме, и по результатам обработки непрерывно формируются решения о гарантированном отсутствии или возможном наличии аварийной ситуации на анкерном участке;

3) при формировании решения о возможном наличии аварийной ситуации на анкерном участке, происходит оповещение персонала о выявленной аварийной ситуации, пересылаемое по сети бесперебойной передачи данных на мобильные устройства оперативного персонала, ответственного за участок контактной сети, на котором расположен данный анкерный участок.

Полное описание предложенных системы и способа непрерывного мониторинга состояния контактной сети рельсового транспорта приведено в полученном патенте РФ № 2701887 [59].

Удельные затраты, связанные с различными рисковыми событиями можно определить из соответствующих отчетов, в том числе из публикуемого ОАО «РЖД» документа Анализ состояния безопасности движения поездов, надежности работы систем и устройств ЖАТ в хозяйстве автоматики и телемеханики.

При этом удельные затраты на реализацию ремонта можно определить, как усредненные издержки, связанные с хранением, использованием, утилизацией

неиспользованных запасных частей и оборудования, приведенные на один ремонт.

Удельные затраты на один час простоя поезда и на одну остановку поезда определенной категории можно определить с использованием схемы расчётов укрупнённых норм эксплуатационных расходов.

Информация об удельных затратах, обусловленных выплатой неустоек и штрафов из-за срыва сроков поставки должна формироваться в результате обработки экспериментальных данных о величине неустоек на один поезд в зависимости от времени задержки. Такая эмпирическая зависимость может быть получена путем аппроксимации экспериментальных данных.

Удельные затраты на ликвидацию последствий опасных отказов, а также на выплату неустоек и штрафов за гибель грузов, получение травм, срыв сроков поставки и прочее могут быть определены в результате получения усредненных значений указанных показателей на одно событие путем обработки отчетов из документа «Анализ состояния безопасности движения поездов, надежности работы систем и устройств ЖАТ в хозяйстве автоматики и телемеханики» за несколько предыдущих лет.

2.3 Формализация исходных данных для оценки экономических рисков, связанных с надежностью и безопасностью объектов транспортной инфраструктуры

2.3.1 Общие сведения о формализации процессов функционирования и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры

Формализация имеет конечной целью получение математической модели исследуемого процесса. Так как предполагается моделировать случайные процессы, то модель должна быть стохастической и представлять собой распределение той или иной случайной величины: функцию распределения или плотность распределения случайной величины. Как описано выше, было решено реализовать модель методом Монте-Карло.

Для оценки экономических рисков требуется выполнить формализацию

случайных процессов, которые можно определить из схемы на рисунке 7:

- процесс возникновения отказов технических средств;
- процесс восстановления состояния технических средств;
- процесс возникновения опасных отказов технических средств;
- процесс использования объекта железнодорожной инфраструктуры непосредственно для реализации регулирования движения находящихся в его пределах поездов (использованием по назначению);
- процесс занятия объекта железнодорожной инфраструктуры поездами от соседних объектов.

Так как опасные отказы являются видом отказов, связанных с нарушением безопасности, то формализация процесса их возникновения может выполняться одновременно с формализацией отказов в целом.

Независимо от того, какого рода формализуемый случайный процесс, его формализация выполняется единообразно путем последовательной реализации следующих этапов:

- сбор и представление исходных данных;
- подбор вида функции плотности вероятностей на основе эмпирической функции плотности вероятностей;
- вычисление статистических оценок моментов случайной величины;
- присвоение моментам случайной величины их статистических оценок;
- проверка гипотезы об адекватности подобранной функции данным выборки.

2.3.2 Сбор и представление исходных данных, используемых при оценке рисков по надежности и безопасности

В качестве исходных данных для оценки рисков, связанных с надежностью и безопасностью функционирования железнодорожной инфраструктуры, следует из отчетов указанных ранее информационных систем осуществить выборку данных о функционировании железнодорожной инфраструктуры за определенный период

времени, который далее будем называть расчетным периодом времени. Начало расчетного периода следует привязывать к дате и времени начала любого календарного года.

Данные о характере эксплуатационной работы на исследуемом участке железных дорог, оборудованном соответствующей железнодорожной инфраструктурой, следует свести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Данные о характере эксплуатационной работы

| № п/п | Событие | Дата наступления события (число, месяц, год) | Время наступления события (часы, минуты) | Продолжительность события (часы, минуты) |
|-------|---------|--|--|--|
| | | | | |

Примечание: в столбце «Событие» возможны значения:

- для перегонных систем: занятие
- для станционных систем: прием, отправление, формирование, расформирование.

В столбцах «Дата наступления события» и «время наступления события» указывают календарную дату и время начала события.

В столбце «Продолжительность события» указывают интервал времени с момента наступления соответствующего события до его окончания.

Данные о процессе функционирования инфраструктуры следует свести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Данные о процессе функционирования инфраструктуры

| № п/п | Событие | Дата (число, месяц, год) | Время (часы, минуты) | Продолжительность события (часы, минуты) |
|-------|---------|--------------------------|----------------------|--|
| | | | | |

Примечание: В столбце «События» возможны значения: «отказ», «предотказное состояние», «замечание к функционированию», «инцидент первой категории неопасный», «инцидент первой категории опасный». Для событий «замечание к функционированию» и «предотказное состояние» в столбце «продолжительность события» следует указать 0. Для остальных событий в указанном столбце следует указать длительность интервала времени, прошедшего с момента наступления, до восстановления функционирования железнодорожной

инфраструктуры. События, произошедшие в один момент времени, объединяют в одно общее. Для событий «замечание к функционированию» и «предотказное состояние» следует вычислить общее количество за расчетный период времени, так как часто они регистрируются группами, а не по отдельности.

При составлении таблицы 2.2 следует учитывать только инциденты первой категории вида «отказ в работе технических средств». Инцидент первой категории неопасный – это инцидент, не вызвавший опасной ситуации, а заключающийся в задержке движения поездов. Инцидент первой категории опасный – это инцидент, связанный с нарушением безопасности перевозочного процесса и понимаемый в дальнейшем как опасный отказ технических средств.

В таблицах 2.1 и 2.2 осуществляют перевод даты и времени событий в интервалы времени от момента, соответствующего началу расчетного периода по формуле, и выражают результат в часах:

$$[час] = час + [час_{мин}] + [час_{число}] + [час_{месяц}] + [час_{год}], \quad (2.1)$$

где $[час_{год}]$ – количество часов, соответствующее числу целых календарных лет между моментом начала расчетного периода и моментом наступления события (считать по 1 января);

$[час_{месяц}]$ – количество часов, определяемое из числа целых календарных месяцев между месяцем в календарном году, соответствующим началу расчетного периода, и месяцем наступления события;

$[час_{число}]$ – количество часов, определяемое из числа целых календарных дней между календарным днем в месяце, соответствующем началу расчетного периода, и календарным днем наступления события;

$[час_{мин}]$ – доля часа, соответствующая количеству прошедших от его начала минут до момента наступления события.

В результате пересчета моментов времени на основе таблиц 2.1 и 2.2 следует сформировать таблицы, аналогичные 2.3.

Таблица 2.3 – Время наступления событий, выраженные в часах

| № п/п | Событие | Время наступления события, часы | Продолжительность события, часы |
|-------|---------|---------------------------------|---------------------------------|
|-------|---------|---------------------------------|---------------------------------|

| | | | |
|--|--|--|--|
| | | | |
|--|--|--|--|

На основе таблицы 2.3 дополнительно вычисляют величину интервала между событиями с учетом их продолжительности по формуле:

$$T_i = t_i - t_{i-1} - T_{i-1}^p, \quad (2.2)$$

где t_i, t_{i-1} – время наступления i -го и $i-1$ -го события из таблицы 2.3,

T_{i-1}^p – продолжительность $i-1$ -го события.

Причем, если $i=1$, то $t_{i-1} = T_{i-1}^p = 0$.

Смысл полученных из таблицы 2.3 величин интервала между событиями с учетом их продолжительности описан в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Смысл величин из таблицы 2.3

| Величина в таблице 2.3 | Смысл величин | Примечание | Обозначение величины |
|--|--|------------|----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Если таблица 2.3 получена из таблицы 2.1 | | | |
| T_i | Величина есть время отсутствия движения поездов по исследуемому участку, оборудованному железнодорожной инфраструктурой то есть, когда железнодорожная инфраструктура не используется по назначению – находится в пассивном состоянии. | | T_i^n |
| T_i^p | Продолжительность движения поезда по исследуемому участку, оборудованному железнодорожной инфраструктурой, а значит, длительность использования железнодорожной инфраструктуры по назначению – нахождения в активном состоянии | | T_i^a |

Продолжение таблицы 2.4

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Если таблица 2.3 получена на основе таблицы 2.2 | | | |

| | | | |
|---------|--|---|------------|
| T_i | Наработка между двумя последовательными отказами | Если в таблице 2.2 были обработаны только события вида «отказ» | T_i^o |
| T_i | Наработка между предотказными состояниями | Если в таблице 2.2 были обработаны только события вида «предотказное состояние» | T_i^{np} |
| T_i | Наработка между замечаниями к функционированию | Если в таблице 2.2 были обработаны только события вида «замечания к функционированию» | T_i^z |
| T_i | Наработка между инцидентами первой категории неопасными | Если в таблице 2.2 были обработаны только события вида «инциденты первой категории неопасные» | $T_i^{ин}$ |
| T_i | Наработка между инцидентами первой категории опасными | Если в таблице 2.2 были обработаны только события вида «инциденты первой категории опасные» | $T_i^{он}$ |
| T_i^p | Время восстановления работоспособного состояния после i -го отказа (инцидента) | Только для инцидентов и отказов, для остальных событий – 0 | T_i^e |

Перечисленные в таблице 2.4 величины представляют собой реализации случайных величин, описывающих процессы нахождения инфраструктуры в активном и пассивном состояниях, появления в них отказов, регистрации замечаний, предотказных состояний, инцидентов первой категории и выполнения восстановлений.

Эти процессы и должны быть смоделированы при синтезе имитационной модели.

Для того, чтобы задать случайную величину необходимо знать, как минимум, закон ее распределения и числовые характеристики, например первый и второй

вероятностные моменты. С этой целью необходимо выполнить формализацию процессов функционирования. Формализация должна выполняться единообразно для всех величин, приведенных в таблице 4, поэтому далее для удобства формулы приводятся для величины T_i .

2.3.3 Формализация процессов функционирования и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры.

Формализация случайных процессов основана на обработке статистических данных. При этом обязательно требуется обеспечить репрезентативность выборки статистических данных. В случае обработки всех событий, фиксируемых автоматически информационными системами, репрезентативность обеспечивается тем, что выборка соответствует генеральной совокупности объектов на исследуемом участке.

В результате формализации определяется сглаживающий статистику вероятностный закон распределения случайной величины – теоретическая функция плотности распределения случайной величины. Это возможно по той причине, что у каждой вероятностной величины существует свой статистический аналог. Так, для функции плотности вероятности случайной величины статистическим аналогом является гистограмма частот – эмпирическая функция плотности распределения случайной величины. Характеризующие разные свойства плотности распределения вероятностей величины – так называемые моменты различных порядков, также существуют вероятностные и статистические, причем они обладают между собой свойством аналогии.

Целесообразно подбор функции плотности распределения вероятностей осуществлять методом моментов.

Суть метода моментов следующая. Чтобы задать случайную функцию требуется знать два первых момента.

Момент первого порядка есть математическое ожидание, вычисляемое по формуле:

$$m_t = \int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot f(t) dt. \quad (2.3)$$

Момент второго порядка есть дисперсия:

$$D_t = \int_{-\infty}^{+\infty} (t - m_t)^2 \cdot f(t) dt. \quad (2.4)$$

Имеются аналогичные статистические моменты, для удобства обозначаемые значком тильды.

Статистический момент первого порядка есть среднее арифметическое:

$$\tilde{m}_t = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (2.5)$$

где n – количество измерений случайной величины времени.

Статистический момент второго порядка – это выборочная дисперсия, вычисляемая по формуле:

$$\tilde{D}_t = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \tilde{m}_t)^2}{n - 1}. \quad (2.6)$$

В представительной выборке при $n \rightarrow \infty$ статистические моменты по вероятности приближаются значениями к вероятностным:

$$\tilde{m}_t \rightarrow m_t, \quad \tilde{D}_t \rightarrow D_t. \quad (2.7)$$

Следовательно, неизвестные вероятностные моменты при условии адекватности подобранного вероятностного распределения могут быть заменены соответствующими статистическими.

Формализация в этом случае выполняется следующим образом.

Наблюдаемые значения соответствующего параметра T_i (так называемые варианты) следует записать в возрастающем порядке.

Диапазон изменения величины $T \in [T_{\min}, T_{\max}]$ необходимо разделить на m подинтервалов.

Далее следует найти длины подинтервалов:

$$h = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{m}, \quad (2.8)$$

Затем установить границы подинтервалов:

$$[T_{\min}, T_{\min} + h), [T_{\min} + h, T_{\min} + 2 \cdot h), \dots \quad (2.9)$$

После этого следует выполнить группировку значений параметра T_i в пределах подинтервалов и вычислить количество значений выборки z_q попадающих в q -ый интервал, а также относительную частоту:

$$\xi_q = \frac{n_q}{h \cdot \sum_{q=1}^m n_q}, \quad (2.10)$$

Вариационный ряд следует представить в виде таблицы 2.5.

Таблица 2.5 – Вариационный ряд

| | | | | |
|-----------------------|----------------------------|--|-----|--|
| Интервал | $[T_{\min}, T_{\min} + h)$ | $[T_{\min} + h, T_{\min} + 2 \cdot h)$ | ... | $[T_{\min} + (m - 1) \cdot h, T_{\max}]$ |
| Частота | n_1 | n_2 | ... | n_m |
| Относительная частота | ξ_1 | ξ_2 | ... | ξ_m |

На основе вариационного ряда необходимо построить гистограмму, которая является эмпирической функцией плотности распределения вероятности. По горизонтали в такой функции откладываются подинтервалы значений случайной величины, по вертикали – относительную частоту ξ_q .

Пример эмпирической плотности распределения вероятности для распределения $\tilde{f}(T)$, близкого к нормальному (гауссовскому), представлен на рисунке 2.2.

Подбор теоретического «сглаживающего» распределения осуществляют на основе визуального анализа гистограммы и выявления наиболее близкого по форме теоретического распределения. При этом необходимо представлять, как визуально выглядит то или иное вероятностное распределение. Чаще всего в качестве теоретического распределения выбирается один из следующих законов: нормальный, экспоненциальный, Вейбулла и т.п.

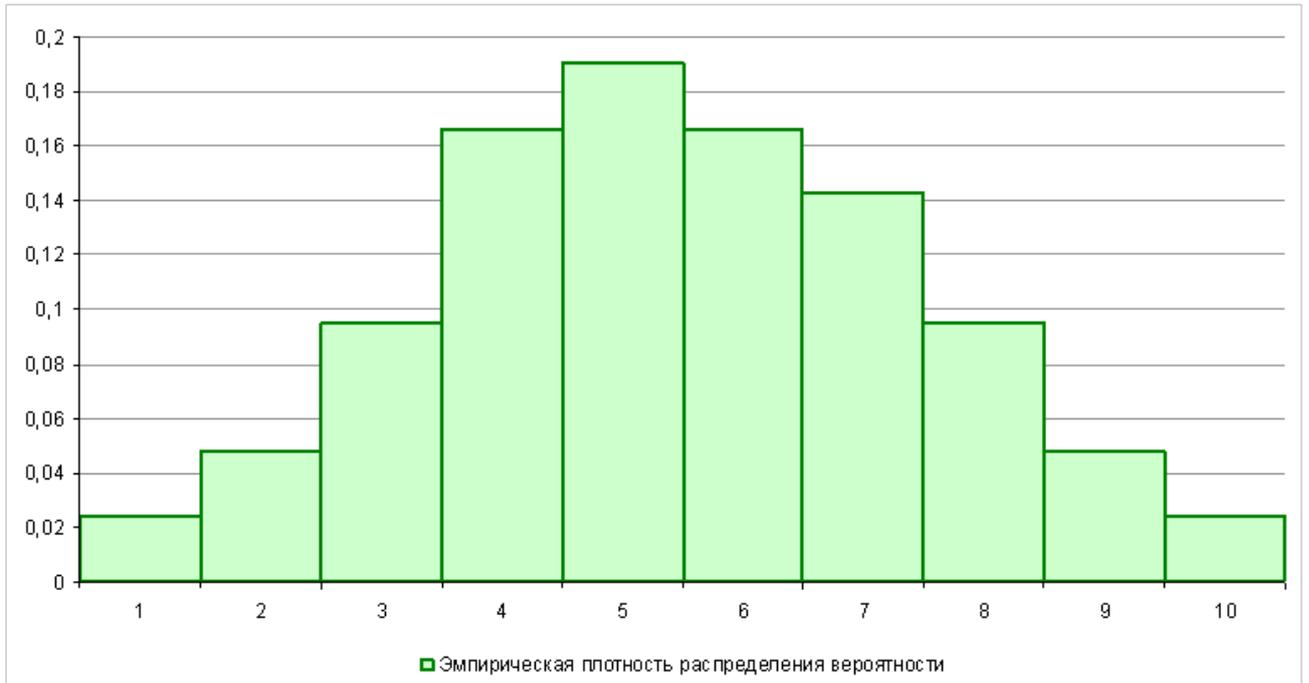


Рисунок 2.2 – Эмпирическая плотность распределения вероятности

Далее, в соответствии с вышесказанным, следует определить статистические оценки неизвестных параметров теоретического распределения. На основе вариационного ряда их вычисляют по следующим формулам:

Оценка математического ожидания времени есть выборочная средняя:

$$\tilde{T} = \frac{\sum_{q=1}^m T_q \cdot n_q}{\sum_{q=1}^m n_q} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{q=1}^m T_q \cdot n_q, \quad (2.11)$$

где T_q – это значение параметра, соответствующее середине q -го подинтервала:

$$T_q = \frac{T_q^l + 0.5 \cdot h}{2}, \quad (2.12)$$

где T_q^l – значение, соответствующее левой границе подинтервала.

Выборочную дисперсию вычисляют по формуле:

$$\tilde{D}_T = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{q=1}^m n_q \cdot (T_q - \tilde{T})^2. \quad (2.13)$$

Также вычисляют среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_T = \sqrt{\tilde{D}_T}. \quad (2.14)$$

В результате подстановки вычисленных значений статистических моментов в формулу теоретического распределения вероятности его следует конкретизировать. Результат представлен на рисунке 2.3.

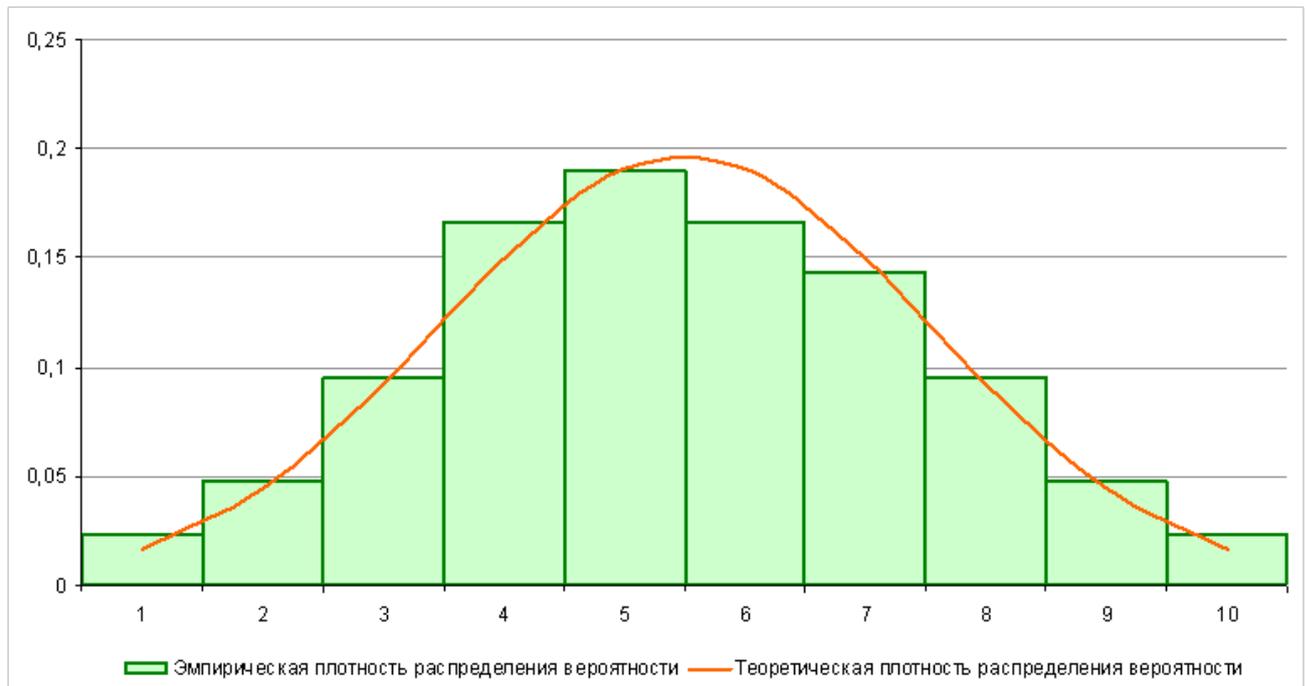


Рисунок 2.3 – Эмпирическая и теоретическая плотность распределения вероятности

В случае, если параметры теоретического распределения $\tilde{f}(T)$ не есть непосредственно моменты случайной величины, то они определяются через соответствующие формулы взаимосвязи.

Примеры аналитической записи и графического представления типовых вероятностных распределений с их основными характеристиками представлены в таблице П.2.1 Приложения 2.

После подбора теоретического распределения следует обязательно осуществить проверку адекватности модели, которая осуществляется путем проверки состоятельности гипотезы о характере использованного теоретического вероятностного распределения.

Для этого выдвигают гипотезу H_0 о том, что распределение подобрано правильно, а расхождение результатов обусловлено только ограниченностью выборки. Эту гипотезу и проверяют. Для проверки гипотезы следует использовать

статистические критерии. Статистический критерий представляет собой случайную величину K , служащую для проверки гипотезы. Вся совокупность значений критерия разбивается на две области:

- область принятия гипотезы – область значений критерия, при которых гипотезу H_0 принимают;
- критическая область – совокупность значений критерия, при которых гипотезу H_0 отвергают (может быть левосторонней, правосторонней и двусторонней).

Граничная точка между двумя указанными областями есть критическая точка $k_{кр}$.

Следует помнить, что при проверке гипотезы H_0 могут быть случиться ошибки первого и второго рода:

- ошибка первого рода заключается в том, что отвергнута правильная гипотеза H_0 . Вероятность ошибки первого рода называют уровнем значимости и обозначают α ;
- ошибка второго рода заключается в том, что принята неправильная гипотеза H_0 . Вероятность ошибки второго рода обозначают β . Вероятность события, заключающегося в отсутствии ошибки второго рода $1 - \beta$, называется мощностью критерия.

Статистический критерий для проверки гипотезы H_0 следует применять в следующей последовательности:

- по эмпирическим выборкам вычисляют эмпирические значения критерия $k_{набл}$.
- задаются уровнем значимости α и ищут критические точки из следующих соотношений:

а) для правосторонней критической области:

$$P(K > k_{кр}) = \alpha \quad (k_{кр} > 0), \quad (2.15)$$

б) для левосторонней критической области:

$$P(K < k_{кр}) = \alpha \quad (k_{кр} < 0), \quad (2.16)$$

в) для двусторонней симметричной области:

$$P(K > k_{кр}) = \alpha / 2 \quad (k_{кр} > 0), \quad P(K < -k_{кр}) = \alpha / 2. \quad (2.17)$$

– Сравнивают наблюдаемое значение со значением критической точки и формулируют вывод об адекватности теоретического распределения.

Часто для решения задач статистической проверки гипотез используют критерий согласия Пирсона или по-другому χ^2 (хи-квадрат).

В этом случае количественной мерой расхождения между экспериментальными статистическими теоретическим вероятностным распределениями является величина статистики χ^2 , рассчитываемая по формуле:

$$\chi^2 = \sum_{q=1}^m \frac{(n_q - N \cdot p_q)^2}{N \cdot p_q}, \quad (2.18)$$

где n_q – количество измеренных значений случайной величины, попавших в q -ый интервал гистограммы;

$$N = \sum_{q=1}^m n_q \text{ – общее количество измерений;}$$

p_q – теоретическая вероятность попадания случайной величины в q -ый интервал, определяемая по функции $\tilde{f}(T)$.

Распределение χ^2 зависит от числа степеней свободы r . Число степеней свободы r определяется разностью между количеством подинтервалов рассматриваемой гистограммы m и числом использованных при подборе теоретического распределения $\tilde{f}(T)$ независимых условий. К таким условиям относят: равенство единице суммы площадей всех столбцов гистограммы (должно выполняться всегда), равенство моментов теоретического распределения их соответствующим статистическим оценкам (математическое ожидание, дисперсия и т.д.) и т.д. Если число таких условий s , то число степеней свободы вычисляют по формуле:

$$r = m - s. \quad (2.19)$$

Применяют критерий Пирсона в соответствии со следующей схемой:

– по формуле (2.18) вычисляют наблюдаемое значение критерия $\chi_{набл}^2$;

- определяют число степеней свободы r ;
- задают уровень значимости и по таблице критических точек находят $\chi_{кр}^2$.

Если $\chi_{набл}^2 > \chi_{кр}^2$, то гипотеза отвергается как несостоятельная, следовательно, необходимо для «сглаживания» воспользоваться иным теоретическим распределением, если иначе – принимается.

Важно заметить, что статистические критерии лишь указывают на то, что подобранная теоретическая функция распределения случайной величины не противоречит результатам наблюдений. При этом следует иметь в виду, что состоятельная гипотеза не является единственно верной и не исключено, что какое-то другое теоретическое вероятностное распределение лучше опишет наблюдаемые значения.

В соответствии с приведенной методикой в рамках настоящей работы проводилась экспериментальная проверка распределений случайных величин, приведенных в таблице 2.4, на примере систем железнодорожной автоматики и телемеханики.

Статистические данные об отказах, замечаниях и инцидентах первой категории обрабатывались совместно. Указанные исходные данные по станции Лом Северной железной дороги приведены в таблице П.3.1 Приложения 3. Предотказные состояния по данной станции не регистрировались, так как отсутствует система автоматического контроля состояния объектов. Замечания регистрировались только со второй половины 2014 года. В таблице П.3.1 Приложения 3 приведены результаты вычисления реализаций случайных величин, представленных в таблице 2.4. При расчете принято, что началом расчетного периода является 01 января 2013 года.

В качестве сглаживающего распределения использовано показательное (экспоненциальное) распределение с вычисленным значением параметра $\lambda_T = 0.0012741/\text{ч}$. Гистограмма эмпирического и кривая теоретического распределений интервалов времени между отказами, замечаниями и инцидентами по указанной станции приведены на рисунке П.3.1 Приложения 3.

Несмотря на ограниченность статистического материала, представленная модель наглядно показывает применимость для изучаемого участка экспоненциальной модели отказов, часто используемой в качестве модели надежности для технических систем на этапе нормальной эксплуатации (когда закончилась приработка, но не началось старение).

Замечания и предотказные состояния фиксируются группами, в связи с чем для имитационной модели требуется определить распределение количества замечаний (предотказных состояний) в группе. Для определения закона распределения указанной случайной величины обработаны замечания из таблицы П.3.2 Приложения 3, выбранные из отчета по той же станции по станции Лом Северной железной дороги за 2014 год.

В качестве адекватного сглаживающего распределения также можно применить показательное (экспоненциальное) распределение, но со значением численного параметра $\lambda_N = 0.374$ 1/раз. Гистограмма эмпирического и кривая теоретического распределений количества замечаний приведены на рисунке П.3.2 Приложения 3.

Количества статистических данных для выявления вероятностного распределения времени до восстановления из таблицы П.3.1 Приложения 3 недостаточно. Поэтому в данной работе были использованы результаты имитационного моделирования с использованием среды имитационного моделирования времени восстановления IMAVRv1.0, внедренной на участке Северной железной дороги. Данная среда при проведении моделирования учитывает квалификацию персонала, местонахождение отказа, время устранения отказа и включения объекта в работу, время возврата персонала с места отказа и ряд иных факторов [45]. Исходные (смоделированные) статистические данные для станции Лом Северной железной дороги приведены в таблице П.3.3 Приложения 3. Адекватным является нормальный закон распределения с параметрами: математическое ожидание 0.95, среднее квадратическое отклонение 0.3.

Сведения о параметрах движения поездов по станции Лом Северной железной дороги отсутствуют. Поэтому в настоящей диссертации приведены

результаты обработки статистических данных по Рижскому направлению Московской железной дороги на интервале: платформа «Москва Рижская» - платформа «Красный Балтиец» за одни сутки по состоянию на 11.01.2016. Исходные данные приведены в таблице П.3.4 Приложения 3. Участок характеризуется преимущественно пригородным движением поездов. Интервалы времени между поездами следует задавать гамма-распределением с параметрами $\alpha = 0.11$ и $\beta = 1$. Аппроксимирующая функция в этом случае имеет вид, представленный на рис. П.3.4. Полученное распределение будет характеризовать интервалы времени пассивного состояния железнодорожной инфраструктуры, то есть интервалы времени, когда движения поездов не происходит.

Имеются данные о том, что на других участках железных дорог характер поездной работы может описываться законом Эрланга второго порядка, либо показательным распределением [54]. Следует отметить, что закон Эрланга и показательное распределение являются частными случаями гамма-распределения, поэтому при последующем моделировании целесообразно использовать именно гамма-распределение, тем более, что при больших значениях параметра α (10 и более) распределение сходится к нормальному, то есть позволяет смоделировать наиболее распространенные случаи. Тогда обработка статистических данных будет сводиться только к определению коэффициентов гамма-распределения, без изменения модели соответствующего генератора случайных величин.

Интервалы активного состояния железнодорожной инфраструктуры совпадают с временем занятия, оборудованного ей участка железных дорог. Были проведены натурные измерения времени занятия участка в районе платформы «Красный Балтиец» Московской железной дороги. Статистические данные приведены в таблице П.3.5 и получены 11 и 12 января 2016 года. Сглаживающее вероятностное распределение является нормальным с параметрами: математическое ожидание 2.8 (мин) и средним квадратическим отклонением 0.7 (мин). Аналогично рассмотренному примеру следует построить распределения интервалов движения для грузовых и пассажирских поездов, так как экономические издержки от их задержки различны.

Таким образом, определены все вероятностные распределения, которые требуется использовать при синтезе имитационной модели.

Аналогичным образом могут быть описаны процессы отказов и восстановлений в хозяйстве пути и электроснабжения.

Полученные распределения позволят реализовать моделирование случайных процессов, связанных с реализацией управления движением поездов, отказами и восстановлениями железнодорожной инфраструктуры. Это даст возможность в результате моделирования определить типы и характеристики вероятностных распределений результирующего потока событий в виде:

- отказов, не приводящих к дополнительным косвенным издержкам, связанным с задержками в движении поездов;
- отказов, связанных с появлением событий, когда в процессе использования железнодорожной инфраструктуры происходит отказ, в течение которого возникает задержка в движении;
- опасных отказов.

Вместе с тем, величина экономического риска определяется не только вероятностями рискованных событий, но и затратами, которые происходят, если наступил рискованный случай. Так как прямые затраты существенно различны для разных хозяйств, обслуживающих инфраструктуру, то из таблицы П.3.1 Приложения 3, полученной по объектам, относящимся к каждому из хозяйств, следует вычислить количество событий «отказ» и «инцидент первой категории» по каждому хозяйству:

- $N_{отк}^{ам}$ – количество отказов по хозяйству автоматики и телемеханики;
- $N_{отк}^э$ – количество отказов по хозяйству электроснабжения;
- $N_{отк}^п$ – количество отказов по хозяйству пути.

Тогда вероятность отказа объекта, относящегося к ведению соответствующего хозяйства можно оценить по формулам:

- Вероятность отказа по хозяйству автоматики и телемеханики:

$$P_{отк}^{am} = \frac{N_{отк}^{am}}{N_{отк}^{am} + N_{отк}^{\vartheta} + N_{отк}^n}. \quad (2.20)$$

– Вероятность отказа по хозяйству электроснабжения:

$$P_{отк}^{\vartheta} = \frac{N_{отк}^{\vartheta}}{N_{отк}^{am} + N_{отк}^{\vartheta} + N_{отк}^n}. \quad (2.21)$$

– Вероятность отказа по хозяйству пути:

$$P_{отк}^n = \frac{N_{отк}^n}{N_{отк}^{am} + N_{отк}^{\vartheta} + N_{отк}^n}. \quad (2.22)$$

При этом:

$$P_{отк}^{am} + P_{отк}^{\vartheta} + P_{отк}^n = 1. \quad (2.23)$$

Следовательно, образуют полную группу несовместных событий.

В этом случае интенсивность отказов, можно рассматривать, как сумму интенсивностей отказов по объектам инфраструктуры всех типов:

$$\lambda_{отк} = \lambda_T^{am} + \lambda_T^{\vartheta} + \lambda_T^n. \quad (2.24)$$

Так как статистические данные об отказах, замечаниях и предотказных состояниях обрабатывались совместно, то для получения интенсивностей отказов, замечаний, предотказных состояний и инцидентов можно выполнить вероятностное разряжение потока интенсивностью λ_T по формуле:

$$\lambda_o = \lambda_T \cdot \frac{n_o}{N}. \quad (2.25)$$

$$\lambda_{зам} = \lambda_T \cdot \frac{n_{зам}}{N}. \quad (2.26)$$

$$\lambda_{пред} = \lambda_T \cdot \frac{n_{пред}}{N}. \quad (2.27)$$

$$\lambda_{ино} = \lambda_T \cdot \frac{n_{ино}}{N}. \quad (2.28)$$

$$\lambda_{инп} = \lambda_T \cdot \frac{n_{инп}}{N}. \quad (2.29)$$

В формулах $n_o, n_{зам}, n_{пред}, n_{ино}$ - количество зарегистрированных отказов, замечаний и предотказных состояний, инцидентов первого рода опасных

соответственно, причем:

$$N = n_o + n_{зам} + n_{пред} + n_{ино} + n_{инт}. \quad (2.30)$$

$\lambda_{ино}$ - это интенсивность потока опасных отказов, которые приводят к нарушению безопасности движения поездов и могут повлечь катастрофу.

Приведенные величины могут быть использованы при оценке технических рисков. Экономические риски должны представляться в денежном выражении. Переход от технического риска к экономическому можно обеспечить, если определить, как технические последствия связаны с экономическими.

2.3.4 Определение затрат, связанных с уровнем надежности и безопасности железнодорожной инфраструктуры

Любой отказ требует затрат, в том числе и денежных, на его устранение. В случае, если задержек в движении поездов нет, то имеют место затраты на замену – прямой экономический ущерб. Если задержки возникли, то к прямому добавляется косвенный ущерб, связанный с задержками в движении поездов.

Денежные затраты целесообразно выразить в удельных единицах. Прямые затраты удобно привести на один отказ. Для оценки косвенных рисков, связанных с остановками и задержками поездов, денежные затраты целесообразно выразить в удельных единицах, определяемых на количество остановок и длительность задержек поездов.

Прямые экономические издержки существенно различаются для разных хозяйств, поэтому должны рассчитываться отдельно.

– Прямые удельные экономические издержки на устранение одного отказа по хозяйству автоматики определяются из выражения:

$$C_{пр}^{ам} = (C_{зип}^{ам} + C_{рем}^{ам} + C_{дост}^{ам}) \cdot k_{изб}^{ам}, \quad (2.31)$$

где $C_{зип}^{ам}$ – средняя стоимость запасных частей и приспособлений для одного ремонта систем автоматики и телемеханики;

$C_{рем}^{ам}$ – средняя стоимость самого ремонта системы автоматики и

телемеханики;

$C_{дост}^{ам}$ – средняя стоимость доставки материалов и персонала к месту ремонта;

$k_{изб}^{ам}$ – коэффициент избыточных замен в хозяйстве автоматики.

– Прямые удельные издержки на устранение одного отказа по хозяйству электроснабжения определяются из выражения:

$$C_{пр}^э = (C_{зип}^э + C_{рем}^э + C_{дост}^э) \cdot k_{изб}^э, \quad (2.32)$$

где $C_{зип}^э$ – средняя стоимость запасных частей и приспособлений для одного ремонта систем электроснабжения;

$C_{рем}^э$ – средняя стоимость самого ремонта системы электроснабжения;

$C_{дост}^э$ – средняя стоимость доставки материалов и персонала к месту ремонта;

$k_{изб}^э$ – коэффициент избыточных замен в хозяйстве электрификации.

$$C_{пр}^н = (C_{зип}^н + C_{рем}^н + C_{дост}^н) \cdot k_{изб}^н, \quad (2.33)$$

где $C_{зип}^н$ – средняя стоимость запасных частей и приспособлений для одного ремонта пути;

$C_{рем}^н$ – средняя стоимость самого ремонта пути;

$C_{дост}^н$ – средняя стоимость доставки материалов и персонала к месту ремонта;

$k_{изб}^н$ – коэффициент избыточных замен в хозяйстве пути.

Прямые экономические издержки будут возникать всегда при возникновении отказа, независимо вызвал он задержку поезда или нет.

Экономические издержки, связанные с задержками и дополнительными остановками поездов существенно различны для грузовых и пассажирских поездов, поэтому моделирование целесообразно провести отдельно для каждого типа поездов, а затем результаты обобщить.

Экономические издержки из-за задержек в движении поездов могут быть как внутренние, происходящие по другим подразделениям компании, так и внешние.

Удельную величину внутренних затрат, связанных с задержками поездов, следует определять по схеме расчетов укрупненных норм эксплуатационных

расходов на одну остановку грузового или пассажирского поезда, представленную в таблицах 2.6-2.8.

Таблица 2.6 – Расчет укрупненных норм эксплуатационных расходов на одну остановку грузового или пассажирского поезда

| Учитываемый измеритель | Единичная расходная ставка, руб. | Формула расчёта измерителя | Сумма расходов, руб. |
|---|----------------------------------|---|---|
| Киловатт-час электроэнергии (килограмм условного топлива) | $L_{\text{Э}}$ | $M_{\text{Э}} = \frac{3.8 \cdot (P_{\text{л}} + Q_{\text{бр}}) \cdot V_m^2}{10^6} \cdot K_{\text{Э}}$ | $C_{\text{Э}} = L_{\text{Э}} \cdot M_{\text{Э}}$ |
| На токоприёмнике | $L_{\text{разг}}$ | $M_{\text{Э}(m)} = \frac{3.8 \cdot (P_{\text{л}} + Q_{\text{бр}}) \cdot V_m^2}{10^6} \cdot K_{\text{Э}(m)}$ | $C_{\text{Э}(m)} = L_{\text{Э}(m)} \cdot M_{\text{Э}(m)}$ |
| Бригадо-час локомотивной бригады | $L_{\text{бр-ч}}$ | $M_{\text{пз}} = \frac{t_{\text{пз}}}{60}$ | $C_{\text{пз}} = L_{\text{бр-ч}} \cdot M_{\text{пз}}$ |
| Итого | | | $C_o^n = C_{\text{Э}} + C_{\text{Э}(m)} + C_{\text{пз}}$ |

В таблице 2.6 приняты следующие обозначения:

$K_{\text{Э}} = 3.36 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ – удельный расход электроэнергии на вводах тяговых подстанций в расчёте на $1 \text{ т} \cdot \text{км}$ механической работы;

$K_{\text{Э}(m)} = 3.20 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ – удельный расход электроэнергии на токоприёмнике в расчёте на $1 \text{ т} \cdot \text{км}$ механической работы;

$t_{\text{пз}} = 2.5 \text{ мин}$ – время на замедление и разгон поезда;

$P_{\text{л}}$, т – средний вес локомотивов, обращающихся на участке;

$Q_{\text{бр}}$, т – средний вес поездов, обращающихся на участке

V_m , км/ч – средняя скорость поездов по участку.

В таблицах 2.7 - 2.8 приведены схемы укрупненных норм эксплуатационных расходов на один поездо-час простоя грузового и пассажирского поезда соответственно.

Таблица 2.7 – Расчет укрупнённых норм эксплуатационных расходов на один поездо-час простоя грузового поезда

| Учитываемый измеритель | Единичная расходная ставка, руб. | Формула расчёта измерителя | Сумма расходов, руб. |
|---|----------------------------------|--------------------------------|--|
| Вагоно-час | $L_{в-ч}$ | $M_{в-ч} = m$ | $C_{в-ч} = L_{в-ч} \cdot m$ |
| Локомотиво-километр условного пробега | $L_{л-км}$ | $M_{л-км} = 1 + \varphi_{всп}$ | $C_{л-км} = L_{л-км} \cdot M_{л-км}$ |
| Локомотиво-час | $L_{л-ч}$ | $M_{л-ч} = 1 + \varphi_{всп}$ | $C_{л-ч} = L_{л-ч} \cdot M_{л-ч}$ |
| Бригадо-час локомотивной бригады | $L_{бр-ч}$ | $M_{бр-ч} = 1 + \varphi_l$ | $C_{бр-ч} = L_{бр-ч} \cdot M_{бр-ч}$ |
| Киловатт-час электроэнергии (килограмм условного топлива) | $L_{э(m)}$ | $M_{э(m)} = A_{э(m)}^ч$ | $C_{э(m)} = L_{э(m)} \cdot M_{э(m)}$ |
| Итого | | | $C_{эпн} = C_{в-ч} + C_{л-км} + C_{л-ч} + C_{бр-ч} + C_{э(m)}$ |

В таблице 2.7 дополнительно приняты следующие обозначения:

m , шт. – среднее количество вагонов в поезде;

$\varphi_{всп} = 0.112$ доли единицы – коэффициент, представляющий собой отношение пробега вторых локомотивов, работающих по системе многих единиц, в двойной тяге и подталкивании к пробегу локомотивов, следующих в голове поездов;

$\varphi_l = 0.3$ доли единицы – коэффициент, представляющий собой отношение пробега локомотивов в двойной тяге и подталкивании к пробегу локомотивов, следующих в голове поездов.

$A_{э(m)}^ч = 124.8$ кВт·ч – расход электроэнергии (условного топлива) на 1 ч простоя поезда.

В таблице 2.8 приведен расчет укрупненных норм эксплуатационных расходов на один поезд-час простоя пассажирского поезда

Таблица 2.8 – Расчет укрупнённых норм эксплуатационных расходов на один поезд-час простоя пассажирского поезда

| Учитываемый | Единичная | Формула расчёта | Сумма расходов, руб. |
|-------------|-----------|-----------------|----------------------|
|-------------|-----------|-----------------|----------------------|

| измеритель | расходная ставка, руб. | измерителя | |
|---|------------------------|--|--|
| Вагоно-час | $L_{в-ч}$ | $M_{в-ч} = m_n$ | $C_{в-ч} = L_{в-ч} \cdot m$ |
| Локомотиво-километр условного пробега | $L_{л-км}$ | $M_{л-км} = 1 + \varphi_{всп}$ | $C_{л-км} = L_{л-км} \cdot M_{л-км}$ |
| Локомотиво-час | $L_{л-ч}$ | $M_{л-ч} = 1 + \varphi_{всп}$ | $C_{л-ч} = L_{л-ч} \cdot M_{л-ч}$ |
| Бригадо-час локомотивной бригады | $L_{бр-ч}$ | $M_{бр-ч} = 1 + \varphi_l$ | $C_{бр-ч} = L_{бр-ч} \cdot M_{бр-ч}$ |
| Бригадо-час проводников | $L_{пр}$ | $M_{пр} = H \cdot \gamma_{пр} \cdot m_n$ | $C_{пр} = L_{пр} \cdot M_{пр}$ |
| Бригадо-час механика-бригадира | L_M | $M_M = 1$ | $C_M = L_M \cdot M_M$ |
| Киловатт-час электроэнергии (килограмм условного топлива) | $L_{э(m)}$ | $M_{э(m)} = A_{э(m)}^4$ | $C_{э(m)} = L_{э(m)} \cdot M_{э(m)}$ |
| Итого | | | $C_{нас\ n} = C_{в-ч} + C_{л-км} +$ $+ C_{л-ч} + C_{бр-ч} + C_{э(m)} +$ $+ C_{пр} + C_M$ |

В таблице 2.8 дополнительно приняты следующие обозначения:

H – количество проводников, обслуживающих один пассажирский вагон;

$\gamma_{пр}$ – доля рабочего времени проводника от общего времени в пути

следования;

m_n – состав пассажирского поезда, вагонов.

Внешний экономический ущерб обусловлен необходимостью уплаты различных штрафов, компенсаций в связи с потерей качества грузов, срывом сроков доставки или перевозки, рекламациями пассажиров, в том числе по упущенной выгоде. Удельная величина ущерба в первую очередь определяется временем задержки поезда $T_{зад}$ и характер зависимости должен определяться экспериментально:

$$C_{ком}(t) = f(T_{зад}). \quad (2.34)$$

Для этого следует использовать данные по величине всех перечисленных выплат по каждому случаю задержки поезда с учетом длительности задержки. Затем следует выполнить аппроксимацию функции $C_{\text{ком}}(t)$ одним из известных методов, например, методом наименьших квадратов.

Кроме указанного ущерба следует учесть недополученный доход самой компании вследствие ненадлежащего выполнения услуг. В первую очередь недополученный доход обусловлен потерянными премиями по договорам перевозки, уменьшением количества клиентов, отказавшихся от услуг компании, увеличением времени оборота подвижного состава и невозможности использования его для перевозки новых грузов и пассажиров.

Величина упущенной выгоды $C_{\text{утиц}}(t, f)$ будет определяться средним временем задержки грузов и пассажиров $T_{\text{зад}}$ и количеством срывов сроков в единицу времени $f_{\text{зад}}$. Для описания удельной величины издержек $C_{\text{утиц}}(t, f)$ целесообразно выполнить двумерную регрессию по любой известной методике.

Опасные отказы помимо задержек в движении поездов вызывают прямые издержки на ликвидацию последствий. Целесообразно оценивать удельные затраты на ликвидацию последствий, используя принцип аналогии. Для этого целесообразно взять величину ущерба по известным случаям за несколько лет. В простейшем случае можно взять среднюю величину максимального ущерба по железным дорогам – структурным подразделениям ОАО «РЖД» на один случай нарушения безопасности в виде схода вагонов в организованных поездах:

$$C_{\text{лик}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{\text{лик } i}}{n}. \quad (2.35)$$

Так, в 2011 году материальный ущерб от нарушения правил безопасности движения поездов составил 61.956 млн. руб. Причем, на два крушения грузовых поездов на Восточно-Сибирской и Куйбышевской дорогах повлекли ущерб в 45.209 млн.руб., а 12 сходов в организованных поездах 9.011 млн.руб. [40].

Тогда по состоянию на 2011 год средняя величина ликвидации последствий составила: $C_{\text{лик}} = 22.6$ млн. руб.

Эта величина должна корректироваться с учетом новых случаев, а также текущего уровня инфляции. Полученные удельные величины экономических издержек в последующем используются для оценки экономических рисков. Для этого надо провести моделирование работы железнодорожной инфраструктуры с учетом ее отказов и восстановлений, чтобы в последующем выявить:

- вероятность отказа, приводящего к задержке в движении поезда;
- плотность вероятности распределения времени задержки поезда;
- плотность вероятности количества задержек поездов.

2.4 Выводы по главе

Вторая глава посвящена разработке моделей и методов анализа и формализации процессов и устранения возникновения различных инцидентов.

1. В рамках проведенного анализа выявлены и классифицированы исходные данные, необходимые для оценки технических рисков функционирования объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры и определена их взаимосвязь с исходными данными, используемыми при оценке экономических рисков.

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.

2. Предложена методика формализации процессов функционирования железнодорожной инфраструктуры для использования ее по назначению, позволяющая единообразно описывать временные характеристики указанных процессов, как случайные величины, распределенные по разным случайным законам.

3. Проведена обработка статистических данных по методике формализации, в результате получены соответствующие распределения случайных величин для станции Лом Северной железной дороги и найдены их численные характеристики. Установлено, что временные интервалы между отказами,

моментами регистрации отклонений от норм содержания и предотказными состояниями адекватно описываются экспоненциальным законом распределения. Время восстановления объекта железнодорожной инфраструктуры на данной станции адекватно описывается нормальным распределением. Интервалы времени между поездами распределены в соответствии с гамма-распределением, а интервалы времени занятого состояния участка – по нормальному закону.

4. Предложено с помощью имитационного моделирования осуществлять оценку технических рисков, а экономические риски определять на основе технических с использованием удельных величин внешних и внутренних затрат, связанных с задержками в движении поездов

5. Полученные и изложенные в данной 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 функционированием объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ

3.1 Общие положения

Разрабатываемая с использованием метода Монте-Карло модель является алгоритмической. Алгоритм увязывает между собой отдельные случайные subprocessы и неслучайные subprocessы в модели. Для моделирования составляющих модель случайных subprocessов используют специальным образом разработанные генераторы случайных чисел.

Предлагаемая к разработке модель в процессе работы должна позволять моделировать отдельные реализации процесса функционирования железнодорожной инфраструктуры при ее эксплуатации, а множество реализаций в этом случае представляют собой симитированную статистику. Модель будет обладать свойством адекватности и достаточной точностью, если разработанные генераторы случайных чисел формируют реализации случайных величин, адекватные реальным процессам, происходящим при эксплуатации железнодорожной инфраструктуры, а алгоритмическая взаимосвязь логически верна.

При разработке математической модели процесса функционирования железнодорожной инфраструктуры в соответствии с системным подходом следует выполнить следующие операции:

- Разработать алгоритм модели, позволяющий учесть причинно-следственные связи между отдельными процессами, предоставить инструмент формирования и удобного представления искусственной статистики по свойствам исследуемых процессов, связанных с моделируемыми процессами, которые позволят оценить соответствующие экономические риски.

- Разработать генераторы случайных величин, позволяющие реализовать реализации отдельных subprocessов в модели в соответствии с заданными

вероятностными распределениями.

– Определить численные параметры генераторов случайных величин (выполнить настройку), для того, чтобы численные значения смоделированных реализаций случайных величин соответствовали диапазонам реальных реализаций.

Процесс моделирования на основе разработанной модели будет заключаться в многочисленных ее прогонах с целью получения и регистрации статистической совокупности, описывающей изучаемые случайные явления. Моделирование при этом осуществляется в псевдореальном масштабе времени. Полученная в результате моделирования статистика должна быть обработана статистическими методами для получения искомых распределений времени и количества задержек поездов из-за отказа, а также вероятностей отказов и опасных отказов. На основе этого должны быть вычислены экономические риски, связанные с надежностью и безопасностью функционирования железнодорожной инфраструктуры.

3.2 Синтез имитационной модели

3.2.1 Разработка алгоритма модели

Процесс моделирования случайных явлений в имитационной модели основан на использовании с последующим накоплением отдельной случайной реализации моделируемого явления, по сути, – отдельном экземпляре случайного явления. Такие реализации формируют генераторы случайных величин. При этом генератор случайной величины представляет собой математическую модель и реализуется в виде отдельной локальной процедуры. Имитационная модель представляет собой совокупность логически увязанных и формируемых генераторами случайных величин случайных реализаций. Логическая взаимосвязь позволяет учитывать влияние исхода моделирования одного случайного явления на другие, в том числе, не случайные, а обусловленные ранее смоделированными событиями явления. Следовательно, при разработке имитационной модели необходимо выявить логическую взаимосвязь между явлениями, а реализацию способов получения случайных величин отложить на последние этапы. Это позволит реализовать

синтез имитационной модели в соответствии с системным подходом – от общего к частному. Таким образом, сначала разработаем общую структуру модели в виде общего алгоритма, затем локальные алгоритмы отдельных процедур моделирования subprocessов, после этого следует разработать генераторы случайных величин и определить их параметры.

При разработке алгоритма модели первоначально следует определить, какие явления будут моделироваться. В главе 2 выявлены основные случайные величины, которые требуется моделировать при реализации имитационной статистической модели. Эти величины перечислены в таблице 2.4 и представляют собой интервалы времени: наработок железнодорожной инфраструктуры между отказами, времен до восстановления железнодорожной инфраструктуры после отказов, наработок между предотказными состояниями и замечаниями к работе устройств железнодорожной инфраструктуры, интервалов времени активного и пассивного состояния железнодорожной инфраструктуры и проч. В главе 2 выполнена обработка статистических данных и формализация случайных процессов, описывающих поведение всех перечисленных в таблице 2.4 случайных величин. В результате формализации определены соответствующие вероятностные законы распределения. Для моделирования каждого вероятностного закона распределения должен использоваться свой генератор случайной величины.

Основные состояния, учитываемые в имитационной модели, характеристики, а также выявленные при формализации законы распределения и обозначения соответствующих генераторов случайных величин представлены в таблице 3.1. Там же приведены условные обозначения генераторов случайных величин. Эти обозначения при разработке алгоритма модели использованы в качестве обозначений соответствующих алгоритмических процедур.

Таблица 3.1 – Основные события, характеристики и законы распределения случайных величин, моделируемых в имитационной модели процесса функционирования железнодорожной инфраструктуры

| Состояние | Характеристика | Обоз- | Закон | Тип | Номер |
|-----------|----------------|-------|-------|-----|-------|
|-----------|----------------|-------|-------|-----|-------|

| | | наче- ние | распреде- ления | генератора случайной величины | генера- тора |
|--|---|--------------|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Пассивное состояние железнодорожной инфраструктуры | Время нахождения железнодорожной инфраструктуры в пассивном состоянии | | | Г | 1 |
| Активное состояние железнодорожной инфраструктуры | Время нахождения железнодорожной инфраструктуры в активном состоянии | T_i^a | Нормальное распределение | Н | 1 |
| Работоспособное состояние | Наработка между двумя последовательными отказами | T_i^o | Экспоненциальное распределение | Э | 1 |
| | Наработка между предотказными состояниями | T_i^{np} | Экспоненциальное распределение | Э | 2 |
| | Наработка между замечаниями к функционированию | T_i^z | Экспоненциальное распределение | Э | 3 |
| | Наработка между инцидентами первой категории неопасными | $T_i^{ин}$ | Экспоненциальное распределение | Э | 4 |
| | Наработка между инцидентами первой категории опасными | $T_i^{он}$ | Экспоненциальное распределение | Э | 5 |

Продолжение таблицы 3.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------|--------------------------|---|---|
| Неработоспособное состояние | Время восстановления работоспособного | T_i^e | Нормальное распределение | Н | 2 |

| | | | | | |
|--|---|------------|--------------------------------|---|---|
| | состояния после i -ого отказа (инцидента) | | | | |
| | Количество замечаний | N_i^z | Экспоненциальное распределение | Э | 6 |
| | Количество предотказных состояний | N_i^{np} | Экспоненциальное распределение | Э | 7 |

Помимо явлений, указанных в таблице 3.1, при разработке алгоритма имитационной модели учтем следующее.

Замечания к функционированию инфраструктуры и предотказные состояния по-отдельности, как правило, отказа не влекут. Однако при накоплении указанных состояний может возникнуть отказ. При моделировании процесса накопления замечаний и предотказных состояний целесообразно воспользоваться моделью Генриха (см. рисунок 3.1), которая применяется при решении задач риск-менеджмента в авиации, судоходстве и других областях. Пирамида Генриха получена эмпирически при анализе производственного травматизма. Установлено, что на 300 происшествий на производстве приходится 30 случаев легких травм и 1 случай с тяжелыми последствиями.

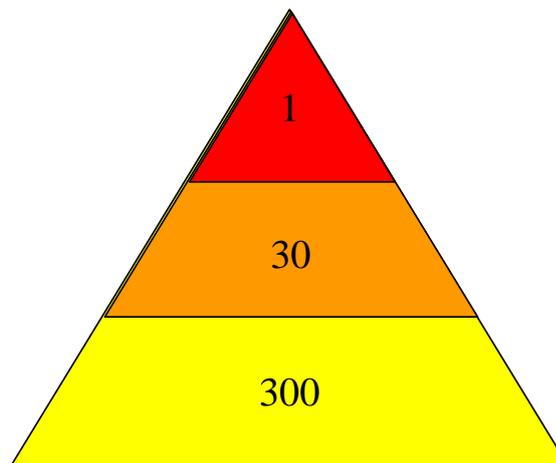


Рисунок 3.1 – Модель Генриха

Соответственно, при разработке моделей появления отказов из-за накопления предотказных состояний и замечаний учитывается следующее соотношение: на тридцать предотказных состояний, либо замечаний приходится в среднем один отказ, что не противоречит собранным автором статистическим

данным.

Для удобства восприятия представим разрабатываемые алгоритмы в виде блок-схем.

3.2.2 Общий алгоритм имитационной модели

Блок-схема общего алгоритма работы модели представлена на рисунке 3.2.

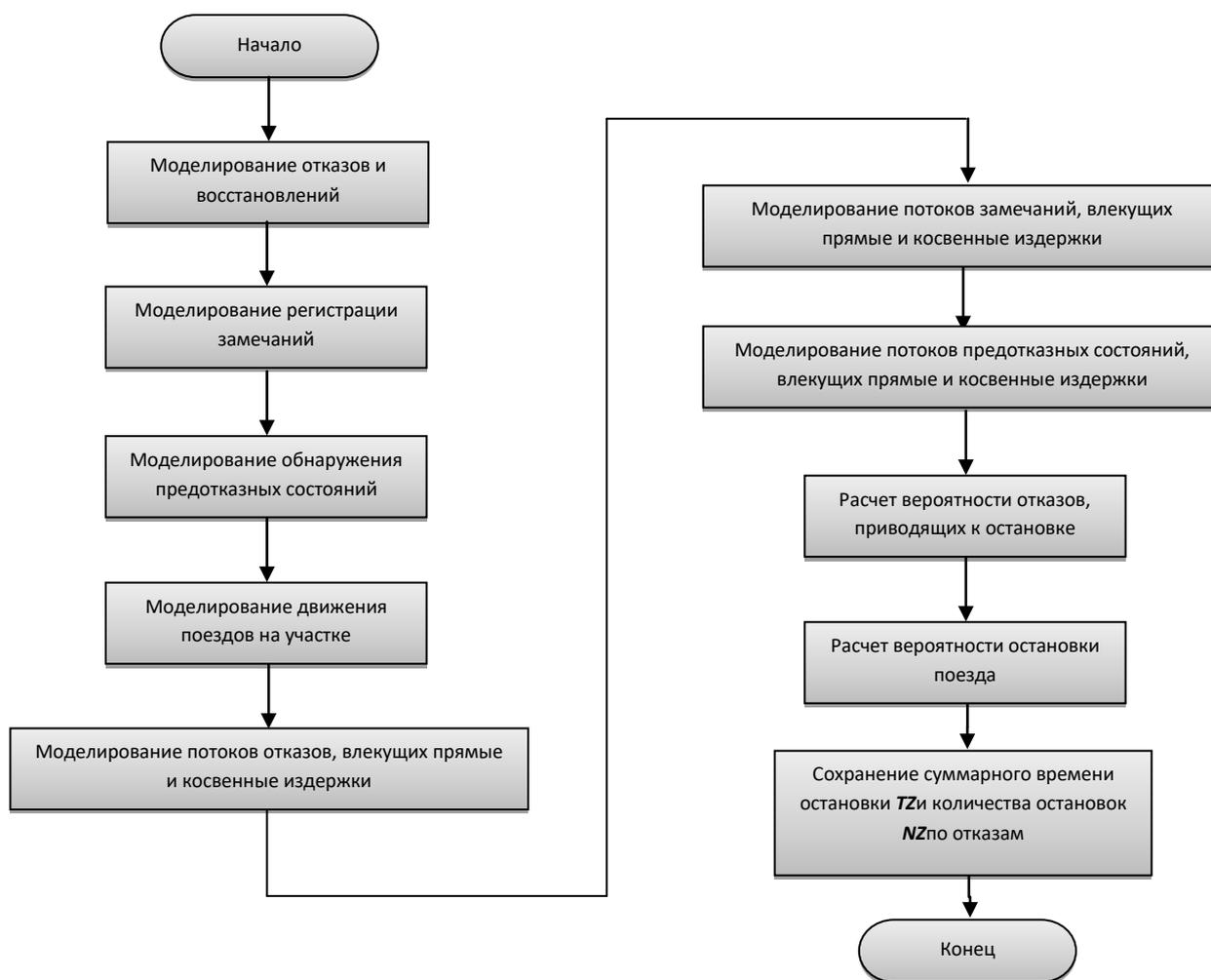


Рисунок 3.2 – Общий алгоритм имитационной модели

Как видно из блок-схемы, последовательно реализуются следующие процессы:

- моделируют отказы и восстановления железнодорожной инфраструктуры;
- моделируют процесс регистрации замечаний к функционированию

железнодорожной инфраструктуры. В процессе моделирования должен формироваться дополнительный поток отказов, обусловленный накоплением замечаний;

– моделируют процесс появления предотказных состояний железнодородной инфраструктуры. В процессе моделирования должен формироваться дополнительный поток отказов, обусловленный накоплением предотказных состояний;

– моделируют процесс движения поездов по участку, оборудованному исследуемой железнодородной инфраструктурой. В результате должна формироваться статистическая совокупность реализаций поездных передвижений;

– осуществляют моделирование потоков отказов, не приводящих к задержкам в движении поездов и приводящих к ним. Первый поток характеризуется событиями, когда нахождение железнодородной инфраструктуры в неработоспособном состоянии совпадает с ее нахождением в пассивном состоянии, а второй – в активном. Как следствие, первый поток влечет за собой только прямые экономические издержки, а второй – дополнительно внутренние и внешние косвенные экономические издержки;

– моделирование потоков отказов, приводящих к задержкам в движении поездов и не приводящих к ним и формирующихся из-за накопления замечаний, осуществляют аналогичным образом;

– моделируют потоков отказов, возникающих из-за накопления предотказных состояний и приводящих к задержкам в движении поездов, либо не приводящих к ним;

– обобщают результаты моделирования и вычисляют вероятность отказа, приводящего к задержкам в движении поездов и, как следствие, дополнительным косвенным экономическим издержкам;

– вычисляют вероятность задержки поезда из-за возможного возникновения отказа железнодородной инфраструктуры во время его движения.

– сохраняют смоделированные статистические данные о суммарном количестве задержанных поездов NZ и времени их задержки TZ по каждому из

смоделированных отказов, в качестве его дополнительных свойств. Эти данные и представляют собой искомую статистику о влиянии различных отказов на процесс движения поездов.

Алгоритм закончен.

Полученная в модели статистика в дальнейшем должна обрабатываться для определения экономических рисков.

Далее рассмотрим алгоритмические реализации отдельных блоков общего алгоритма.

3.2.3 Алгоритм моделирования отказов и восстановлений железнодорожной инфраструктуры

Алгоритм представлен на рисунке 3.3 и реализуется в следующей последовательности:

– устанавливают начальные условия в основных переменных. Все переменные устанавливают в ноль. Перечень переменных: переменной f описывается счетчик количества отказов, в котором после моделирования сохранится количество смитированных отказов; переменной t описывается счетчик времени, фиксирующего моменты возникновения событий в модели (моменты появления отказов и моменты восстановлений); переменной z описывается признак, служащий для того, чтобы можно было отличить тип события: отказ или восстановление (значения признака указаны в алгоритме;

– моделируют одну реализацию интервала времени между отказами T_1 . Для этого используется генератор случайной величины Э.1 (см.таблицу3.1);

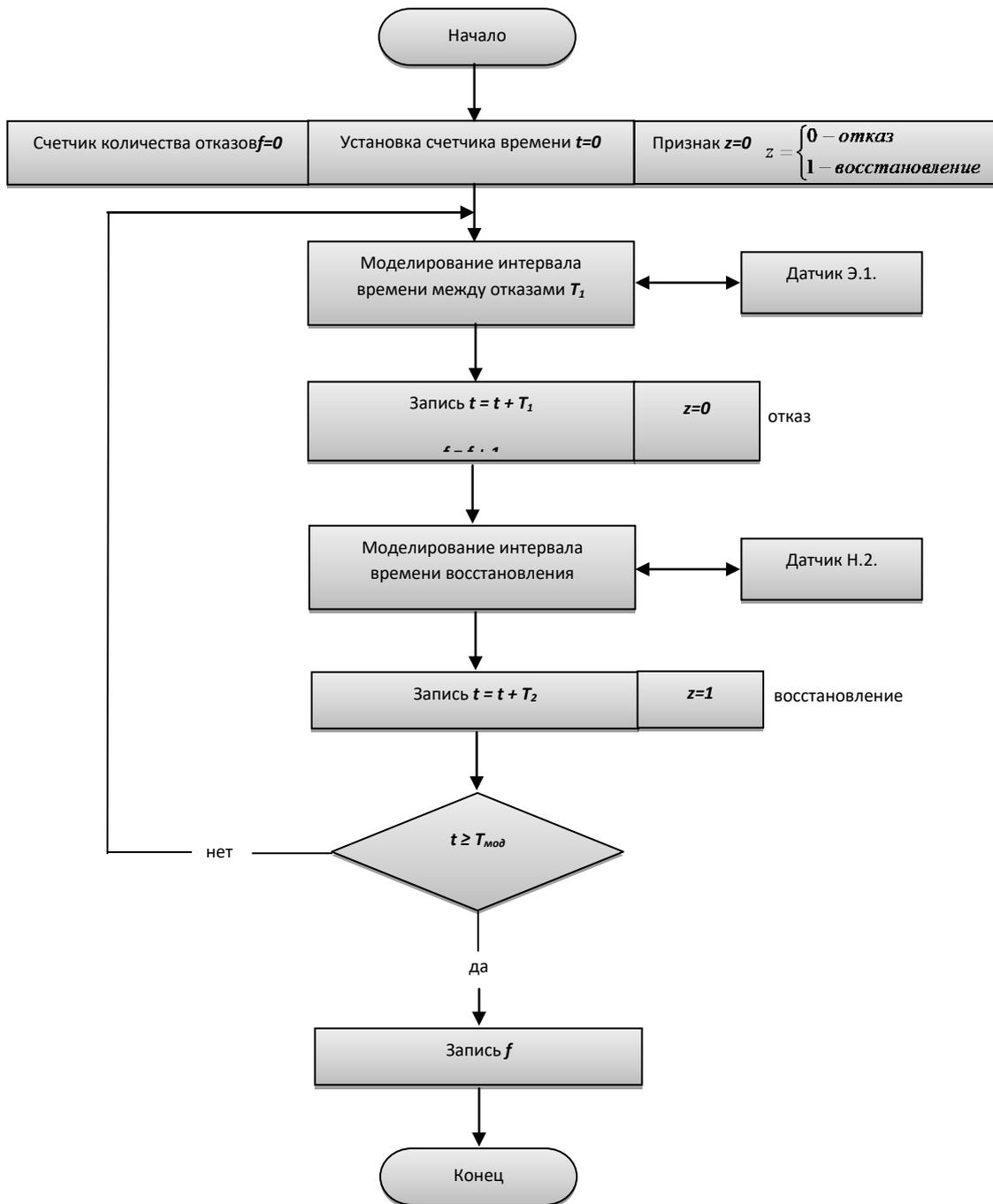


Рисунок 3.3 – Алгоритм моделирования отказов и восстановлений железнодорожной инфраструктуры

- записывают время возникновения отказа с учетом уже прошедшего от начала моделирования времени $t = t + T_1$, увеличивают значение счетчика отказов на единицу $f = f + 1$, а также устанавливают признак события $z=0$ (отказ);
- моделируют одну реализацию интервала времени восстановления T_2 . Для

этого используется генератор случайной величины $H.2$;

- записывают время восстановления с учетом уже прошедшего от начала моделирования времени $t = t + T_2$, а также устанавливают признак события $z=1$ (восстановление)

- если текущее значение в счетчике времени t меньше заданного времени моделирования, то происходит возврат к операции моделирования интервала времени между отказами с целью формирования новой реализации, иначе происходит переход к операции по ветке «да»;

- в память ЭВМ записывается количество смоделированных отказов f для последующей обработки.

Алгоритм завершается.

Рассмотренный алгоритм используется также для моделирования опасных отказов. Алгоритм при этом моделирует исходные данные с целью оценки рисков по безопасности движения поездов. В этом случае вместо генератора Э.1 необходимо использовать Э.5 без изменения остальных частей алгоритма. Кроме того, данный алгоритм используется для моделирования инцидентов первой категории неопасных. В этом случае вместо генератора Э.1. используют Э.4.

3.2.4 Алгоритм моделирования замечаний к функционированию

Алгоритм представлен на рисунке 3.4 и реализуется в следующей последовательности:

- устанавливают начальные условия в основных переменных. Все переменные устанавливают в ноль. Перечень переменных: переменной f_1 описывается счетчик дополнительного количества отказов, в котором после моделирования сохранится количество смитированных отказов вследствие накопления замечаний; переменной t описывается счетчик времени, фиксирующего моменты возникновения отказов; переменной z описывается признак, служащий для того, чтобы можно было отличить тип события;

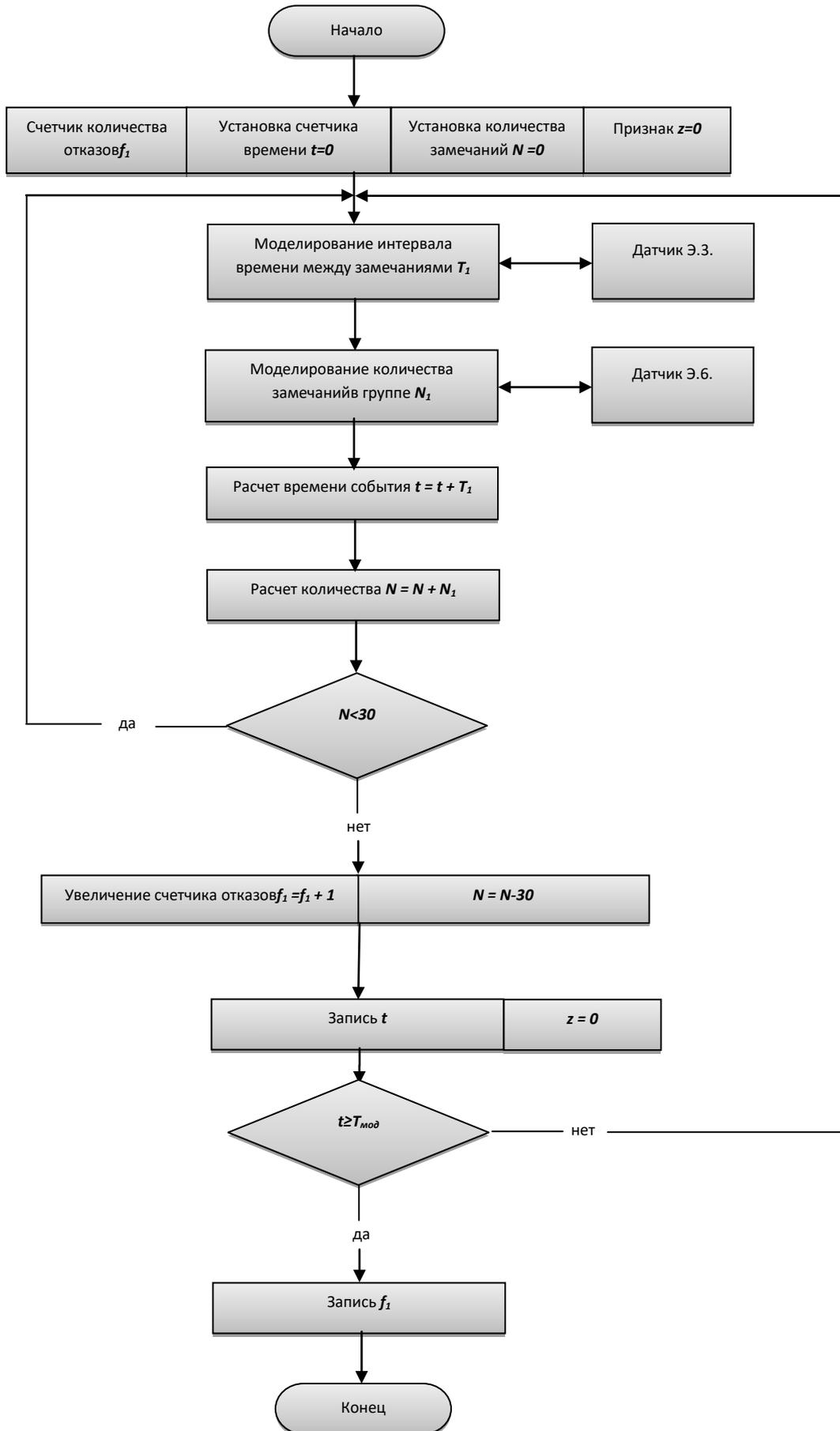


Рисунок 3.4 – Алгоритм моделирования замечаний к функционированию

- моделируют одну реализацию интервала времени между замечаниями $T1$. Для этого используется генератор случайной величины $\Theta.3$;
- моделируют одну реализацию количества замечаний $N1$. Для этого используется генератор случайной величины $\Theta.6$;
- рассчитывают текущее время наступления события, которое в последующем, если количество замечаний превысит допустимое, может рассматриваться как отказ. Время рассчитывают с учетом уже прошедшего с начала моделирования: $t = t + T1$;
- рассчитывают текущее количество накопленных замечаний с учетом ранее смоделированных: $N = N + N1$;
- если количество накопленных замечаний $N < 30$, то это означает, что отказ не произошел и происходит переход по ветке «да» к выполнению нового моделирования интервала времени между замечаниями, иначе считается, что отказ произошел и происходит переход по ветке «нет»;
- количество накопленных замечаний уменьшают на 30, так как из них сформировался отказ, а значение счетчика отказов $f1$ увеличивают на единицу;
- записывают в память ЭВМ значение времени сформированного отказа t и признака отказа $z=0$;
- если текущее значение в счетчике времени t меньше заданного времени моделирования, то происходит возврат к операции моделирования интервала времени между замечаниями с целью формирования новой реализации, иначе происходит переход к операции по ветке «да»;
- в память ЭВМ записывается количество смоделированных отказов из замечаний $f1$ для последующей обработки.

Алгоритм завершается.

3.2.5 Алгоритм моделирования предотказных состояний инфраструктуры

Алгоритм представлен на рисунке 3.5. В целом реализуется данный алгоритм аналогично алгоритму моделирования замечаний к функционированию, поэтому

отдельно не описывается.

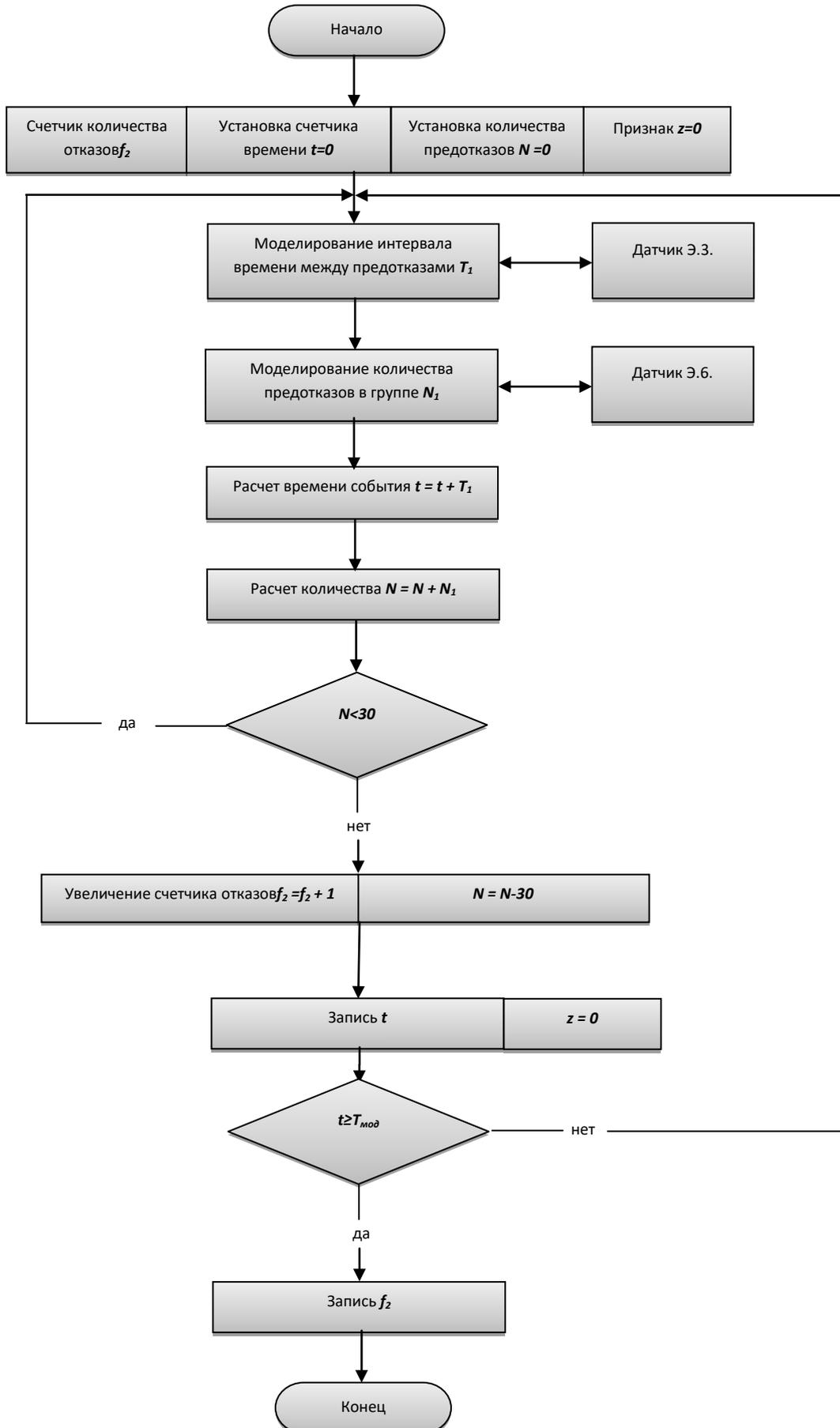


Рисунок 3.5 – Алгоритм моделирования предотказных состояний инфраструктуры

3.2.6 Алгоритм моделирования движения поездов

Алгоритм представлен на рисунке 3.6 и реализуется в следующей последовательности:

– устанавливают начальные условия в основных переменных. Все переменные устанавливают в ноль. Перечень переменных: переменной g описывается счетчик количества проследовавших поездов, в котором после моделирования сохраняется количество симитированных передвижений; переменной t описывается счетчик времени, фиксирующего моменты возникновения событий в модели (моменты появления отказов и моменты восстановлений); переменной z описывается признак, служащий для того, чтобы можно было отличить тип события: пассивное состояние железнодорожной инфраструктуры или активное состояние (значения признака указаны в алгоритме);

– моделируют одну реализацию интервала времени между поездами $T1$. Для этого используется генератор случайной величины $G.1$;

– записывают время занятия участка (перехода из пассивного состояния в активное) с учетом уже прошедшего от начала моделирования времени $t = t + T1$, а также устанавливают признак события $z=0$ (пассивное состояние);

– моделируют одну реализацию интервала времени занятости $T2$. Для этого используется генератор случайной величины $H.1$;

– записывают время освобождения участка (перехода из активного состояния в пассивное) с учетом уже прошедшего от начала моделирования времени $t = t + T2$, устанавливают признак события $z=1$ (активное состояние), а значение счетчика поездов g увеличивают на единицу;

– если текущее значение в счетчике времени t меньше заданного времени моделирования, то происходит возврат к операции моделирования интервала времени между поездами с целью формирования новой реализации, иначе происходит переход к операции по ветке «да»;

– в память ЭВМ записывается количество смоделированных передвижений поездов g для последующей обработки.

Алгоритм завершается.

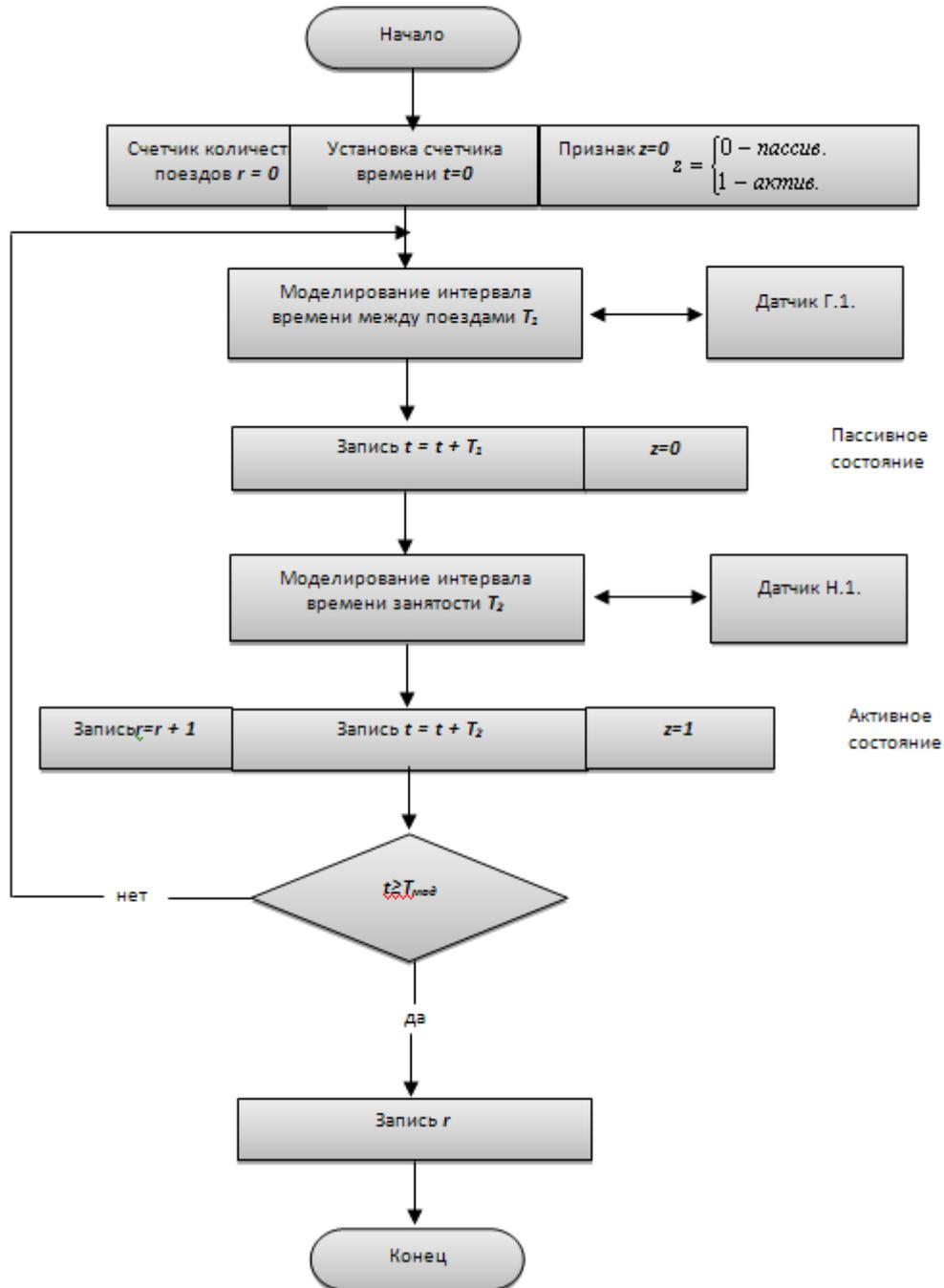


Рисунок 3.6 – Алгоритм моделирования движения поездов на участке железных дорог

3.2.7 Алгоритм моделирования потока отказов, влекущих прямые и косвенные экономические издержки.

Блок-схема алгоритма представлена на рисунках 3.7-3.8. Реализуется алгоритм в следующей последовательности:

- устанавливают начальные условия в основных переменных. Все переменные устанавливают в ноль, за исключением переменных r и f . Перечень переменных: переменной u описывается признак влияния отказа на поток движения поездов ($u=1$ – влияет, $u=0$ – нет); переменной t описывается счетчик времени, фиксирующего моменты возникновения событий в модели (моменты появления отказов и моменты восстановлений); переменной m описывается текущее значение счетчика проанализированных отказов, а переменной x содержимое счетчика проанализированных поездных передвижений, в переменной TZ_m фиксируется суммарное время задержки из-за отказа m , а в переменной NZ_m фиксируется суммарное количество задержек из-за отказа m . В переменной r указано количество смоделированных ранее проследовавших поездов, а в переменной f – количество смоделированных отказов;

- выполняют поиск времени возникновения отказа T_1 , используя для этого признак $z=0$;

- считывают из памяти ЭВМ ранее сохраненные значения суммарного времени задержки и количества задержек поездов NZ_m и NZ_m по данному отказу;

- выполняют поиск момента времени восстановления после отказа m , используя для этого признак $z=1$;

- выполняют поиск момента времени занятия поездом участка T_x , используя для этого признак $z=0$ (при первом прогоне алгоритма отыскивается первый момент времени, остальные будут проанализированы при возврате в алгоритме);

- выполняют поиск момента времени занятия поездом участка T_y , используя для этого признак $z=1$ (при первом прогоне алгоритма отыскивается первый момент времени, остальные будут проанализированы при возврате в алгоритме);

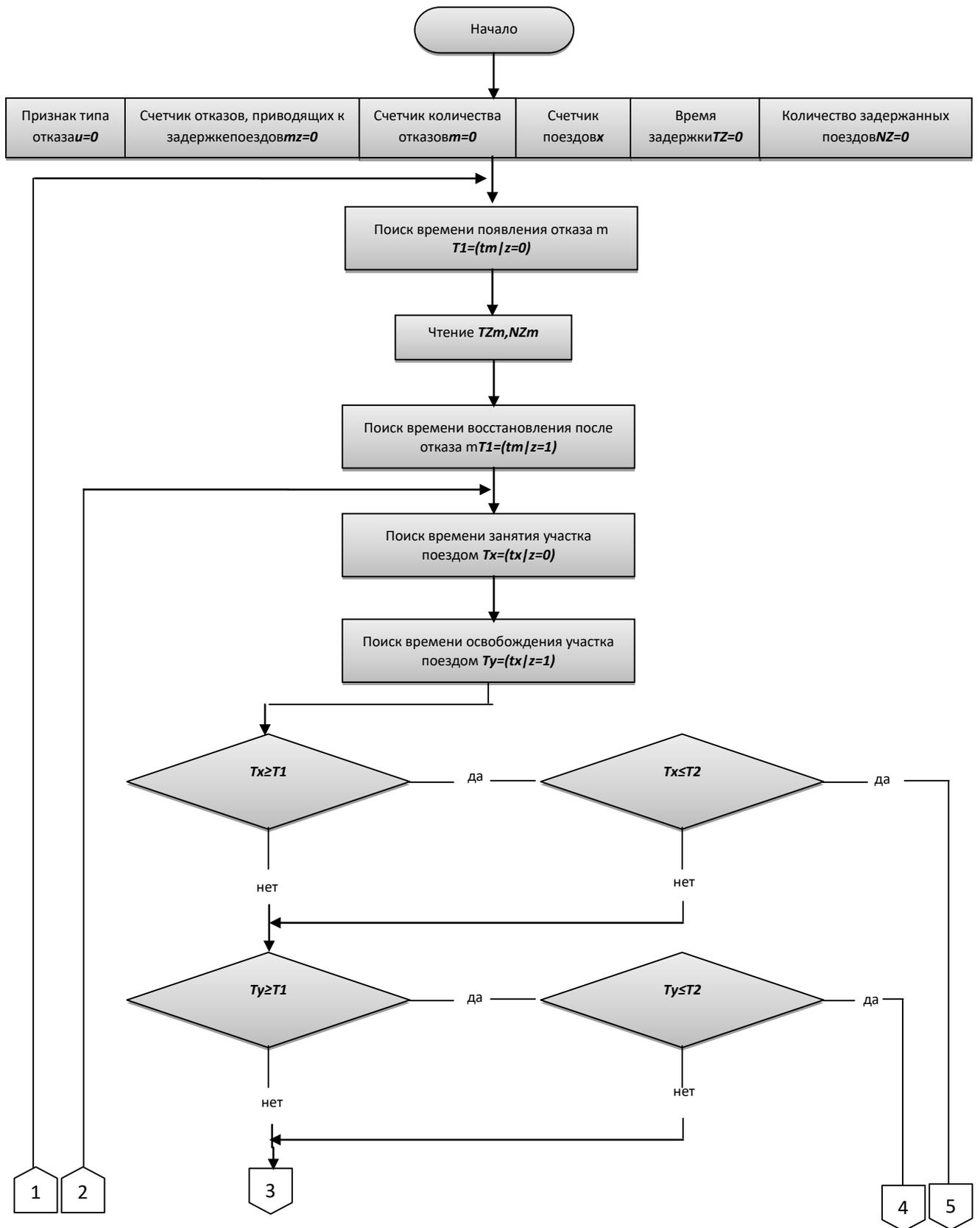


Рисунок 3.7 – Алгоритм моделирования потока отказов, влекущих прямые и косвенные экономические издержки (начало)

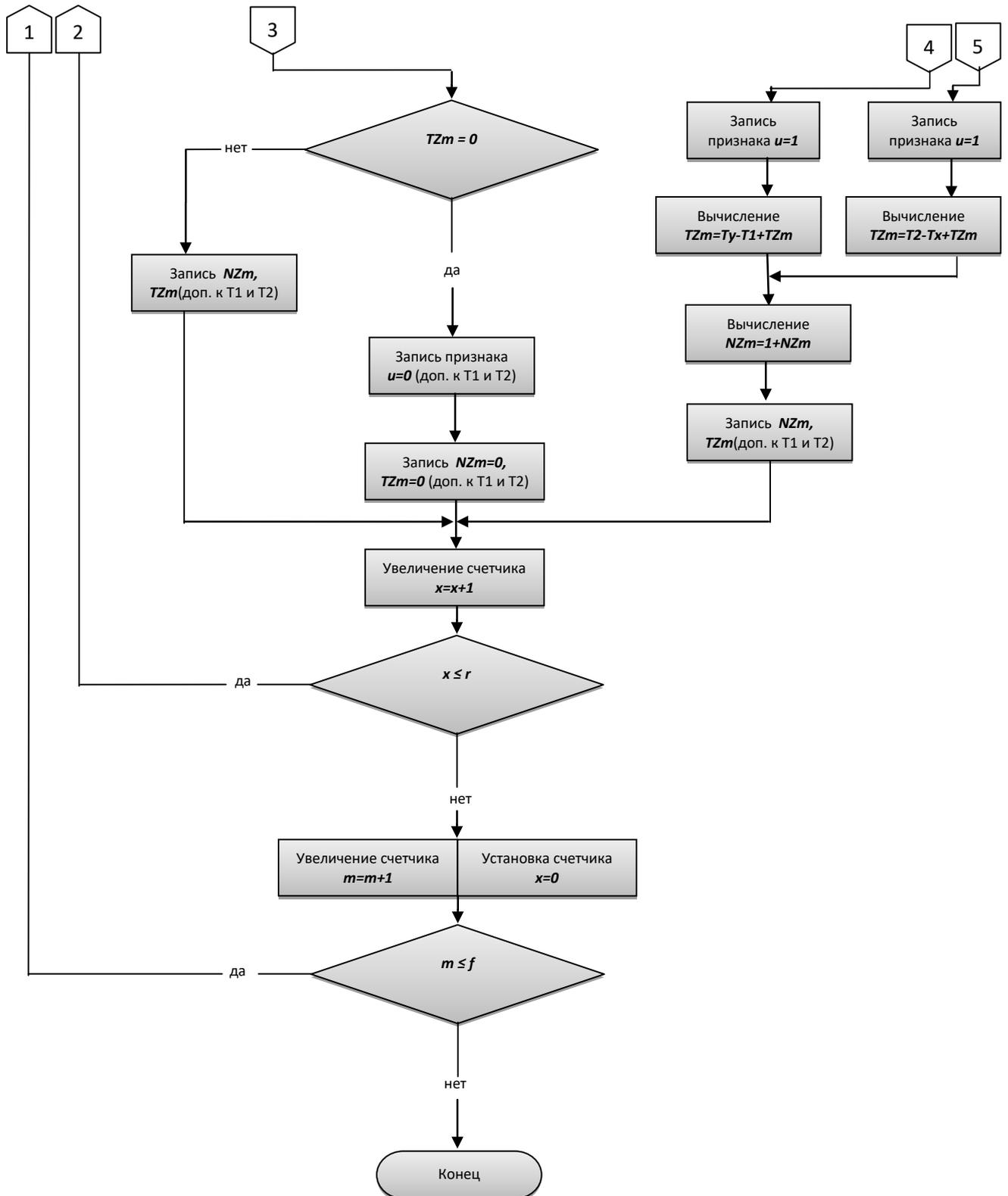


Рисунок 3.8 – Алгоритм моделирования потока отказов, влекущих прямые и косвенные экономические издержки (окончание)

– если $T_x \geq T1$ и $T_x \leq T2$, то осуществляется переход по веткам «да», иначе – переход на ветку «нет». При переходе на ветку «да» устанавливается признак $u=1$ и вычисляется новое суммарное время задержки с учетом уже накопленного ранее по формуле: $TZm = T2 - T_x + TZm$.

Затем осуществляется запись в память к отказу m нового значения TZm .

Кроме того, увеличивается на единицу накопленное количество задержек поездов по формуле: $NZm = 1 + NZm$.

Результат также записывается в память с сопоставлением отказом.

– Если $T_y \geq T1$ и $T_y \leq T2$, то осуществляется переход по веткам «да», иначе – переход на ветку «нет». При переходе на ветку «да» устанавливается признак $u=1$ и вычисляется новое суммарное время задержки с учетом уже накопленного ранее по формуле: $TZm = T_y - T1 + TZm$.

Результат записывается в память к отказу m .

Кроме того, увеличивается на единицу накопленное количество задержек поездов по формуле: $NZm = 1 + NZm$.

Результат также записывается в память к отказом.

– В случае, если оба предыдущих ветвления завершились с выходом «нет», устанавливается признак $u=0$, а значения TZm и NZm записываются без изменений;

– все ветвления замыкаются на операции увеличения счетчика проанализированных поездов на единицу $x=x+15$;

– если количество проанализированных поездов не превышает смоделированного количества r , то происходит возврат по ветке «да» к поиску момента занятия участка следующим поездом, иначе происходит выход из цикла по ветке «нет»;

– текущее значение счетчика проанализированных отказов увеличивается на единицу, а счетчик количества поездов сбрасывается на ноль для того, чтобы проанализировать влияние на поток поездов следующего отказа;

– если текущее значение счетчика количества проанализированных отказов не превышает смоделированного количества f , то происходит возврат к поиску

момента времени появления следующего отказа, иначе все отказы считаются проанализированными.

Алгоритм завершается.

3.2.8 Алгоритм моделирования потока замечаний, влекущих прямые и косвенные экономические издержки

Данный алгоритм аналогичен алгоритму 3.2.7 за исключением содержимого соответствующих счетчиков, поэтому его описание не приводится.

3.2.9 Алгоритм моделирования потока предотказных состояний, влекущих прямые и косвенные экономические издержки.

Данный алгоритм аналогичен алгоритму 3.2.7 за исключением содержимого соответствующих счетчиков, поэтому его описание не приводится.

3.2.10 Алгоритм расчета вероятности отказов, приводящих к задержке движения поездов

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.9. Алгоритм реализуется следующим образом:

– устанавливают начальные условия в основных переменных. Все переменные устанавливают в ноль, за исключением переменной f . Перечень переменных: переменной mz описывается счетчик количества отказов, приводящих к задержкам поездов из-за отказов; переменной m описывается счетчик проанализированных отказов, а переменной f – количество смоделированных отказов;

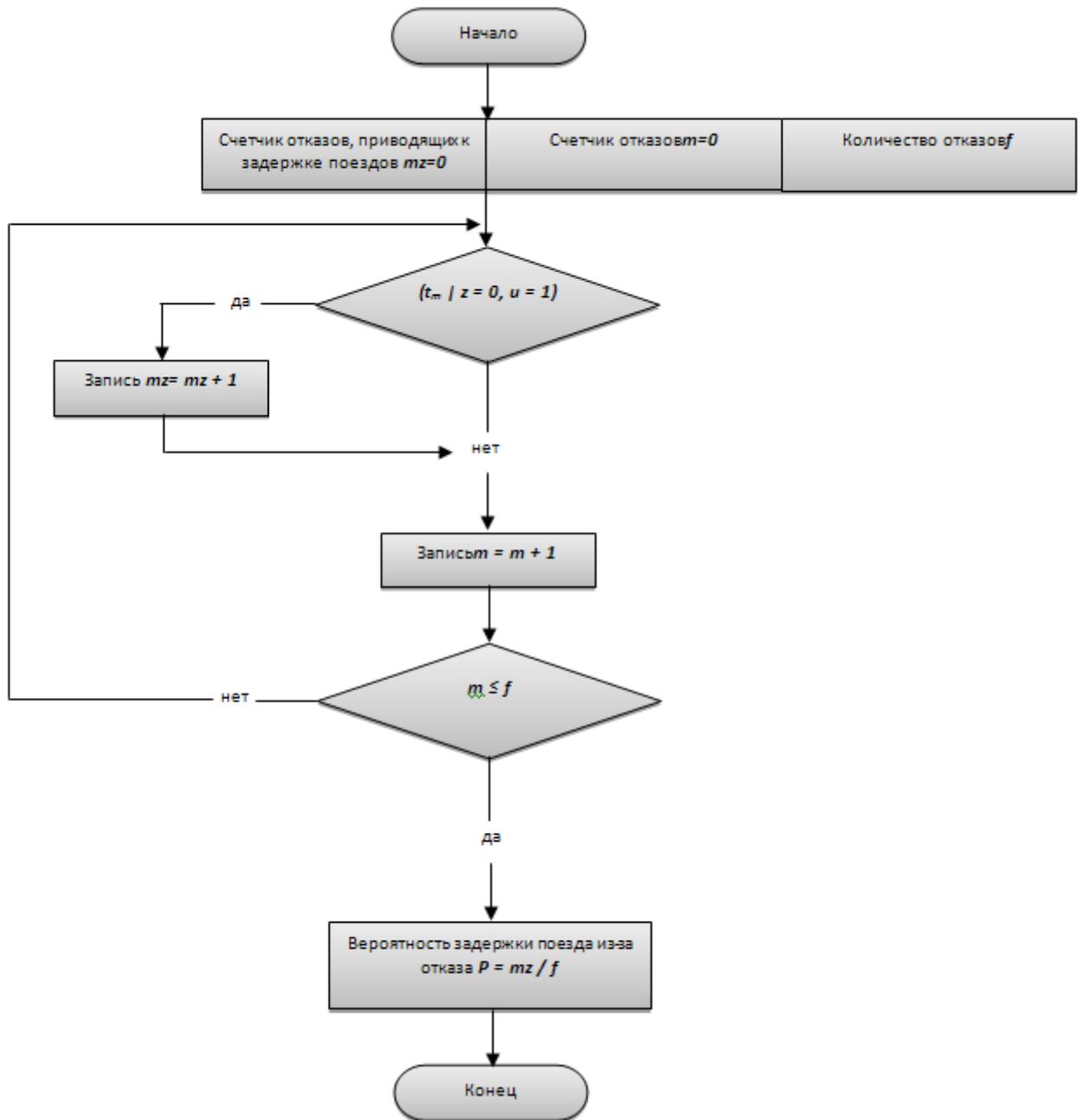


Рисунок 3.9 – Алгоритм вычисления вероятности отказа, приводящего к задержке движения поездов

– выполняют поиск времени возникновения отказа, приведшего к задержке в движении поездов t_m , используя для этого признаки $z=0$ (отказ), $u=1$ (отказ вызвал задержку);

– если отказ m имеет указанные признаки, то происходит переход по ветке «да» и значение переменной mz увеличивается на единицу, иначе происходит выход по ветке «нет» без изменения содержимого переменной mz ;

– содержимое счетчика проанализированных отказов увеличивается на единицу для перехода к анализу следующего отказа.

– если содержимое счетчика m не превышает количество смоделированных отказов f , то происходит возврат к поиску нового времени возникновения отказа, иначе происходит выход из цикла по ветке «да»;

– вычисляют вероятность того, что отказ приведет к задержкам поездов:

$$P_{oa} = \frac{mz}{f}. \quad (3.1)$$

Алгоритм завершается.

3.2.11 Алгоритм расчета вероятности задержки поезда из-за отказов железнодорожной инфраструктуры

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.10. Алгоритм реализуется следующим образом:

– устанавливают начальные условия в основных переменных. Все переменные устанавливают в ноль, за исключением переменных f и g . Перечень переменных: переменной xz описывается счетчик количества задержек поездов из-за отказов; переменной m описывается счетчик проанализированных отказов; переменной f – количество смоделированных отказов, а переменной g – количество смоделированных передвижений поездов.

– Выполняют поиск времени возникновения отказа, приведшего к задержке в движении поездов tm , используя для этого признаки $z=0$ (отказ), $u=1$ (отказ вызвал задержку);

– если отказ m имеет указанные признаки, то происходит переход по ветке «да» и считывается значение переменной NZm и значение переменной xz увеличивается по формуле: $xz=xz+ NZm$, иначе происходит выход по ветке «нет» без изменения содержимого переменной xz ;

– содержимое счетчика проанализированных отказов увеличивается на единицу для перехода к анализу следующего отказа;

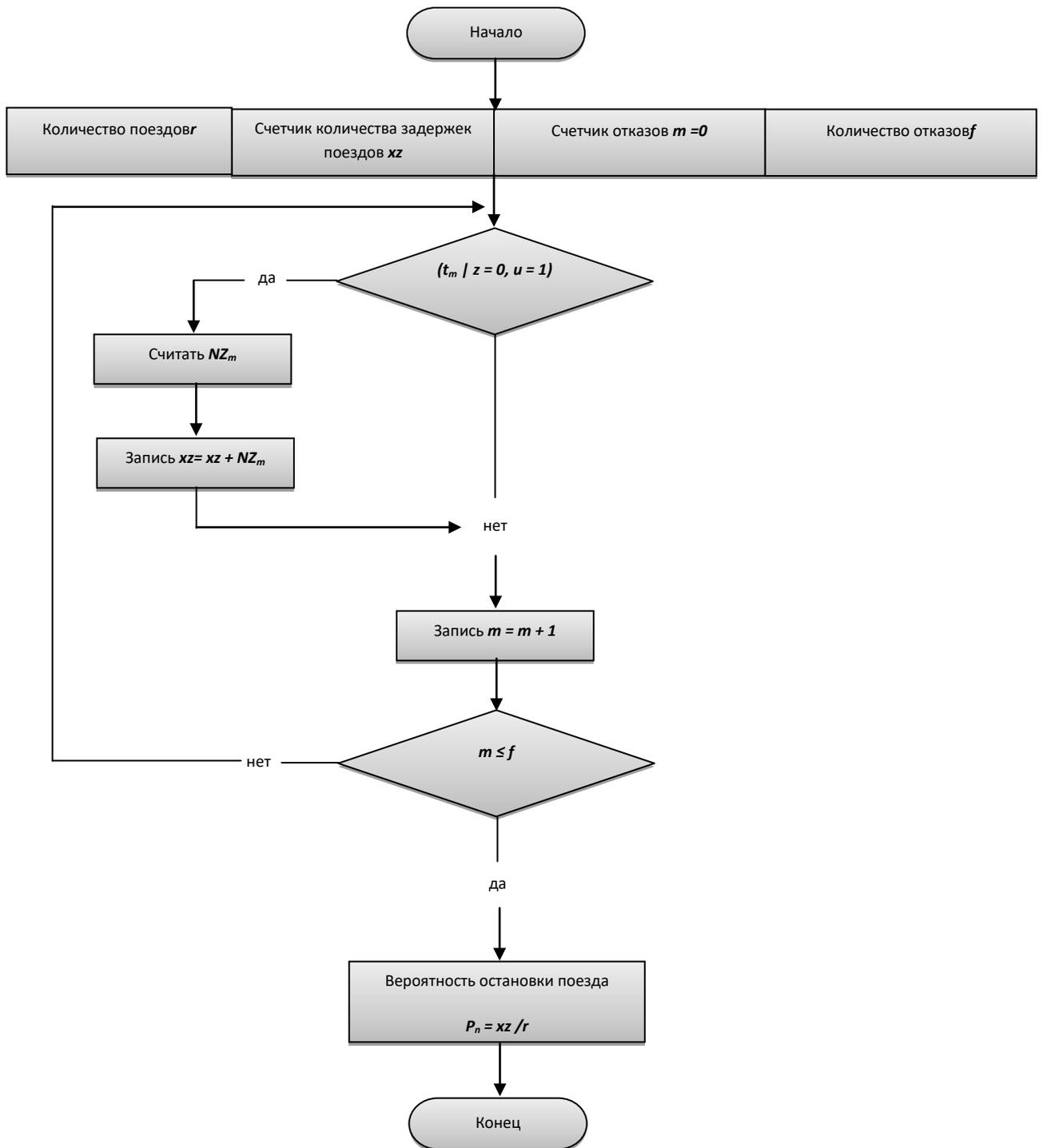


Рисунок 3.10 – Алгоритм вычисления вероятности задержки поезда из-за отказа

– если содержимое счетчика m не превышает количество смоделированных отказов f , то происходит возврат к поиску нового времени возникновения отказа, иначе происходит выход из цикла по ветке «да»;

– вычисляют вероятность задержки поезда из-за отказа по формуле:

$$P_3 = \frac{xz}{r}. \quad (3.2)$$

Алгоритм завершается.

Примечание: указанные в разделе 3.2.1 формулы являются алгоритмическими. В них справа от знака равенства указывается значение переменной из предыдущего шага, а слева – вычисляемое на текущем шаге (оба значения обозначены одинаково).

3.2.12 Разработка генераторов случайных величин

Отдельная реализация случайной величины в генераторе случайной величины реализуется с помощью специальной процедуры, в основе которой лежит «бросание единичного жребия». Единичные жребии бывают различных видов. С их помощью разыгрываются значения отдельных случайных величин, либо совокупности значений нескольких. Результат реализации процедуры эквивалентен срабатыванию датчика, поэтому генераторы случайных величин также называют датчиками случайных величин.

Единичный жребий различных видов можно реализовать на основе отдельной реализации числа R из заданного диапазона значений, которое подчинено закону равномерного распределения. Плотность равномерного распределения в интервале (a, b) описывается соотношением:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{при } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{при } x < a \text{ и } x > b \end{cases}, \quad (3.3)$$

Функция распределения равномерно распределенной случайной величины при этом имеет следующий вид:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{при } a \leq x \leq b, \\ 1 & \text{при } x > b \end{cases}, \quad (3.4)$$

Как правило, равномерно распределенная случайная величина R приводится к диапазону от 0 до 1: $a = 0$ и $b = 1$. Тогда формулы (3.3) и (3.4) примут такой вид:

$$f(r) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq r \leq 1 \\ 0 & \text{при } r < 0 \text{ и } r > 1 \end{cases}, \quad (3.5)$$

$$F(r) = \begin{cases} 0 & \text{при } r < 0 \\ r & \text{при } 0 \leq r \leq 1, \\ 1 & \text{при } r > 1 \end{cases}, \quad (3.6)$$

Основные виды жребиев, которые можно моделировать на основе равномерно распределённого случайного числа с описанием методик, позволяющих реализовать генераторы случайных величин, представлены в таблице 3.2.

Легко заметить, что все методики реализации генераторов случайных величин из таблицы 3.2 [18] сводятся к однократному или многократному розыгрышу случайного числа R с равномерным законом распределения в диапазоне от 0 до 1 и соответствующему пересчету по формулам взаимосвязи. В результате формализации, выполненной в главе 2, были получены распределения случайных величин. Эти результаты представлены в таблице 3.1. Очевидно, что для реализации генераторов соответствующий случайных величин требуется использовать жребий вида 3.

Генератор случайной величины вида (Э) из таблицы 3.1 должен формировать экспоненциально распределенную случайную величину.

Плотность распределения экспоненциально распределенной случайной величины описывается следующим выражением[51]:

$$f_{\text{э}}(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad t \geq 0, \quad (3.7)$$

где λ – интенсивность потока событий, подчиненных экспоненциальному распределению.

| № жребия | Название | Описание |
|----------|---|--|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | «Произошло или нет событие A ?» | <p>Исходные данные: Пусть известна вероятность события $p(A)$.</p> <p>Методика реализации жребия:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Сгенерировать случайное число R в диапазоне от 0 до 1. 2. Вычислить результат: $y = \begin{cases} R \leq P(A) & \Rightarrow 1 \\ R > P(A) & \Rightarrow 0 \end{cases}$ <p>где y – результат, причем при $y = 1$ событие считается произошедшим, иначе не произошедшим.</p> |
| 2 | «Какое из нескольких несовместных событий появилось?» | <p>Исходные данные: Пусть известны вероятности событий $p(A_1), p(A_2), \dots, p(A_n)$, причем выполняется условие: $p(A_1) + p(A_2) + \dots + p(A_n) = 1$</p> <p>Методика реализации жребия:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Сгенерировать случайное число R в диапазоне от 0 до 1. 2. Вычислить результат: $y = \begin{cases} 0 \leq R \leq P(A_1) & \Rightarrow 1 \\ P(A_1) < R \leq P(A_2) & \Rightarrow 2 \\ P(A_2) < R \leq P(A_3) & \Rightarrow 3 \\ \dots & \dots \end{cases}$ <p>где y – результат, возвращаемое число указывает номер произошедшего события</p> |

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| 3 | «Какое значение приняла случайная величина X ?» | <p>Исходные данные: Пусть известна плотность вероятности случайной величины $f(x)$</p> <p>Методика реализации жребия:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Сгенерировать случайное число R в диапазоне от 0 до 1 2. Вычислить функцию распределения случайной величины: $F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$ <ol style="list-style-type: none"> 3. Выполнить преобразование Смирнова Н.В.: $\psi(x) = F^{-1}(x)$ 4. Очередной реализацией случайной величины, заданной функцией распределения $F(x)$ является число x_i, которое следует вычислить как: $x_i = F^{-1}(r_i)$ <p>где r_i – реализация случайного числа R, полученная на шаге 1.</p> |
| 4 | «Какую совокупность значений приняли случайные величины X_1, X_2, \dots, X_k ?» | <p>Исходные данные:</p> <p>Пусть:</p> <ol style="list-style-type: none"> а) случайные величины независимы; б) случайные величины зависимы. <p>Методика реализации жребия:</p> <ol style="list-style-type: none"> а) k раз выполнить процедуру, описывающую жребий 3. б) перед каждым последующим выполнением процедуры, описанной жребием 3, проверяется, что все предыдущие значения приняли значения, заданные в условии (условная вероятность), иначе событие X_k считается не произошедшим. |

Функция распределения экспоненциально распределенной случайной величины имеет вид:

$$F_0(t) = 1 - e^{-\lambda_0 t}, \quad (3.8)$$

Интенсивность потока событий λ является единственным численным параметром, который необходимо определить для того, чтобы конкретизировать распределение.

Реализации распределённых по экспоненциальному закону случайных чисел

моделируют с помощью следующей расчетной формулы[19]:

$$t_{\varepsilon i} = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln r_i, \quad (3.9)$$

С использованием формулы (3.9) формируются реализации случайных величин генераторами Э.1-Э.7 из таблицы 3.1. Разница между расчетами будет заключаться в разных значениях параметра распределения λ .

Генератор случайной величины вида (Н) из таблицы 3.1 должен формировать нормально распределенную случайную величину.

Плотность вероятности нормально распределенной случайной величины описывается формулой:

$$f_n(t) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-m_n)^2}{2\sigma_n^2}}, \quad (3.10)$$

где m_n – математическое ожидание случайной величины;

σ_n – среднее квадратическое отклонение случайной величины.

Функция распределения нормально распределенной случайной величины представляет собой соотношение:

$$F_n(t) = 0.5 + \Phi_0\left(\frac{t-m_n}{\sigma_n}\right) \quad (3.11)$$

где $\Phi_0(x)$ – функция Лапласа.

Параметрами, конкретизирующими распределение, являются математическое ожидание случайной величины m_n и среднее квадратическое отклонение случайной величины σ_n .

Моделирование стандартных нормальных случайных чисел t_i на основе стандартных равномерных случайных чисел r_i можно осуществлять по формуле:

$$t_i = \sqrt{\frac{12}{n}} \left(\sum_{i=1}^n r_i - \frac{n}{2} \right), \quad (3.12)$$

Получить две реализации стандартных нормальных чисел t_i и t_{i+1} на основе

двух реализаций стандартных равномерных случайных чисел можно и с помощью преобразования Бокса – Мюллера[81]:

$$t_i = \sqrt{-2 \ln r_i} \sin(2\pi r_{i+1}), \quad (3.13)$$

$$t_{i+1} = \sqrt{-2 \ln r_i} \cos(2\pi r_{i+1}) \quad (3.14)$$

Нормально распределенные случайные числа с параметрами m_n и σ_n получают с использованием дополнительной корректирующей формулы:

$$t_{ni} = m_n + \sigma_n \cdot t_i, \quad (3.15)$$

С использованием формул (3.12)-(3.15) формируются реализации случайных величин генераторами Н.1-Н.2 из таблицы 3.1. Разница между расчетами будет заключаться в разных параметрах распределений генераторов.

Генератор случайной величины вида (Г) из таблицы 3.1 должен формировать распределенную случайную величину с гамма-распределением.

Плотность вероятности гамма-распределения имеет вид:

$$f(t) = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{t}{\beta}}, \quad (3.16)$$

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера;

α, β - параметры распределения.

Параметры распределения α, β связаны с математическим ожиданием и дисперсией следующими соотношениями:

$$m = \alpha \cdot \beta, \quad D = \alpha \cdot \beta^2. \quad (3.17)$$

Генерация случайной величины с гамма-распределением осуществляется в два этапа.

Сначала моделируют распределение с использованием целых частей параметров распределения. В этом случае распределение соответствует распределению Эрланга, которое является суммой экспоненциальных распределений.

Следовательно:

$$t_{1,i} = \sum_{j=1}^n -\ln r_j, \quad (3.18)$$

где n – целая часть параметра, задающего порядок распределения Эрланга (целая часть параметра α).

Затем моделируют гамма-величину в интервале от 0 до 1. Для этого выполняют следующие действия:

1. Полагают переменную z равной единице.
2. Генерируют независимые равномерно распределенные случайные величины из интервала 0-1: V_{2m-1}, V_{2m} .

3. Если:

$$V_{2m-1} \leq \frac{e}{e + \delta}, \quad (3.19)$$

то далее следует перейти к шагу 4, иначе – к шагу 5.

4. Вычислить:

$$\xi_m = \left(\frac{V_{2m-1}(e + \delta)}{e} \right)^{\frac{1}{\delta}}, \quad \eta_m = V_{2m} \cdot \xi_m^{\delta-1}. \quad (3.20)$$

Затем перейти к шагу 6.

5. Вычислить:

$$\xi_m = 1 - \ln \frac{V_{2m-1} - \frac{e}{e + \delta}}{1 - \frac{e}{e + \delta}}, \quad \eta_m = V_{2m} \cdot e^{-\xi_m}. \quad (3.21)$$

6. Если:

$$\eta_m > e^{-\xi_m} \cdot \xi_m^{\delta-1}, \quad (3.22)$$

то увеличить z на единицу и вернуться к шагу 2.

7. $\xi = \xi_m$ - есть реализация гамма-распределения с параметрами $\alpha = \delta$ и $\beta = 1$

Тогда окончательно случайная величина с гамма-распределением и нецелым α может быть сгенерирована по формуле:

$$t_{\alpha i} = \beta \left(\xi - \sum_{j=1}^{\lfloor n \rfloor} \ln r_j \right), \quad (3.23)$$

где ξ - вычисляют по приведенному выше алгоритму;

$[n]$ - целая часть параметра α .

Таким образом, определены математические модели всех генераторов случайных величин, входящих в имитационную модель. Эти модели должны быть включены в общую модель в соответствующих местах алгоритма.

Однако, полученные модели имеют один существенный недостаток при проведении моделирования. Дело в том, что они позволяют получать числа в диапазоне от 0 до $+\infty$, что не соответствует реальным условиям эксплуатации и функционирования железнодорожной инфраструктуры. Так, отказ не может длиться бесконечное время, также как и процесс его устранения пусть и крайне редко. Например, допустимое время устранения отказов четко регламентировано и не может превышать наперед заданных величин. Также некоторые операции не могут выполняться мгновенно. Следовательно, все реализации времени, формируемые в соответствии с перечнем из таблицы 3.1, должны быть ограничены диапазоном $t_n - t_k$. Появление значений за границами области невозможно в силу физических, технических и организационных причин.

По этой причине при моделировании следует использовать усеченные распределения. Такого рода распределения получают в результате ограничения с одной или двух сторон интервала возможных значений случайной величины.

Усеченная плотность распределения случайной величины получается в результате нормирования исходного распределения на множитель c :

$$\bar{f}(t) = c \cdot f(t). \quad (3.24)$$

Множитель c определяют из условия равенства единице площади под плотностью распределения усеченной случайной величины:

$$c = \frac{1}{\int_{t_n}^{t_k} f(t) dt}. \quad (3.25)$$

Тогда усеченная плотность вероятности может быть описана так:

$$\bar{f}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_n, t > t_k; \\ \frac{f(t)}{F(t_k) - F(t_n)} & \text{при } t_n \leq t \leq t_k. \end{cases}, \quad (3.26)$$

А функция распределения – так:

$$\bar{F}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_n, \\ \frac{F(t) - F(t_n)}{F(t_k) - F(t_n)} & \text{при } t_n \leq t \leq t_k, \\ 1 & \text{при } t > t_k. \end{cases} \quad (3.27)$$

Сделанное замечание позволяет выполнить коррекцию моделей генераторов случайных величин.

Это возможно сделать, как минимум, двумя способами:

– отбрасывать реализации, не входящие в допустимый диапазон $t_n \leq t \leq t_k$ путем повторного моделирования реализаций случайной величины t до тех пор, пока полученное значение не станет удовлетворять указанному условию.

– скорректировать значения используемой в жребиях равномерно распределённой случайной величины к интервалу при котором результат моделирования с учетом формулы Смирнова (при ее применении) будет приведен к заданному диапазону значений:

$$R \in [0, 1] \rightarrow R_{corr} \in [r_{min}, r_{max}], \quad (3.28)$$

где r_{min}, r_{max} – минимальное и максимальное значение скорректированного значения параметра R с равномерным распределением.

После того, как модели генераторов случайных величин определены, необходимо определить их параметры, что позволит генерировать случайные величины, адекватные исходным статистическим данным, которые использовались при формализации.

3.2.13 Определение параметров датчиков случайных чисел на основе данных об исследуемом участке железной дороги

Для того, чтобы модель генератора случайной величины могла генерировать реализации случайной величины необходимо выполнить настройку параметров генератора. Для этого достаточно подставить в математические модели генераторов вычисленные на этапе формализации (см. главу 2) значения параметров соответствующих случайных распределений. Это позволит привязать генераторы к эмпирическим данным. Кроме того, в предыдущем параграфе указано, что настройка параметров генераторов должна учитывать то, что генерируемые ими реализации должны описывать соответствующие усеченные распределения случайных величин.

Числовые параметры различных генераторов случайных величин для удобства сведены в таблицу 3.3.

Таким образом, имитационная модель полностью определена. Следовательно, можно приступать к проведению моделирования с ее применением.

3.3 Моделирование процесса функционирования железнодорожной инфраструктуры

Перед началом моделирования следует установить время моделирования $T_{\text{мод}}$, определяющее объем смоделированных имитационной моделью статистических данных. Время моделирования не должно быть маленьким и должно составлять десятки лет (в часовом выражении), а при оценке рисков по безопасности сотни лет.

Моделирование осуществляется путем многократного прогона алгоритмов, описывающих имитационную модель с целью накопления статистики.

Таблица 3.3 – Параметры настройки генераторов случайных величин

| Характеристика | Тип генератора случайной величины | Номер генератора | Параметры | Ограничения |
|---|-----------------------------------|------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Время нахождения железнодорожной инфраструктуры в пассивном состоянии | Г | 1 | $\alpha = 0.11$ $\beta = 1$ | $t_n = 0,0166$ ч $t_k = 120$ ч |
| Время нахождения железнодорожной инфраструктуры в активном состоянии | Н | 1 | $m = 0.0467$ ч $\sigma = 0.0117$ ч | $t_n = 0,0166$ $t_k = 120$ ч |
| Наработка между двумя последовательным и отказами | Э | 1 | $\lambda_o = 0.00013$ 1/ч | $t_n = 0$ ч $t_k = 10000$ ч |
| Наработка между предотказными состояниями | Э | 2 | $\lambda_{пред} = 0.000451$ 1/ч | $t_n = 0$ ч $t_k = 2160$ ч |
| Наработка между замечаниями к функционированию | Э | 3 | $\lambda_{зам} = 0.00068$ | $t_n = 0$ ч $t_k = 2160$ ч |
| Наработка между инцидентами первой категории неопасными | Э | 4 | $\lambda_{инп} = 0.00011$ | $t_n = 0$ ч $t_k = 10000$ ч |
| Наработка между инцидентами первой категории опасными | Э | 5 | $\lambda_{ино} = 0.00002$ | $t_n = 0$ ч $t_k = 100000000$ ч |
| Время восстановления работоспособного состояния после i-го отказа (инцидента) | Н | 2 | $m = 0.9$ ч $\sigma = 0.3$ ч | $t_n = 0.1$ ч $t_k = 3$ ч |
| Количество замечаний | 5 | 6 | $\lambda_N = 0.374$ 1/раз | $N_n = 0$ $N_k = 100$ |
| Количество предотказных | Э | 7 | $\lambda_N = 0.374$ 1/раз | $N_n = 0$ $N_k = 100$ |

| | | | | |
|-----------|--|--|--|--|
| состояний | | | | |
|-----------|--|--|--|--|

В силу различия численных значений исходных данных, описывающих процессы функционирования и величины последствий при отказах для объектов железнодорожной инфраструктуры на исследуемом участке железных дорог, соотнесенных с различными хозяйствами: хозяйством автоматики и телемеханики, хозяйством электроснабжения, хозяйством пути, моделирование следует осуществлять отдельно для каждого из объектов. Кроме того, размеры и соотношение последствий из-за задержки и остановки для грузовых и пассажирских поездов также различны, поэтому необходимо по-отдельности моделировать процессы функционирования железнодорожной инфраструктуры с каждым типом поездов. Результаты моделирования следует обобщить по его завершении.

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

$$Z = \langle t, z, u, Tz, Nz \rangle. \quad (3.29)$$

и также включают в себя вычисленные значения вероятностей P_{oa} , P_z и исходные данные, полученные при формализации случайных распределений.

Вероятность P_{oa} – есть вероятность рискованного события, приводящего к косвенным экономическим издержкам.

На основе этих статистических данных осуществляется оценка и, при необходимости, анализ экономических рисков.

3.4 Представление результатов моделирования

Исходными данными для оценки экономических рисков являются результаты моделирования, выполненные для каждого типа поездов и различных хозяйств: хозяйства автоматики и телемеханики, хозяйства электроснабжения и путевого хозяйства. Результаты оформлены в виде кортежа (3.29) и могут быть представлены в виде таблиц, аналогичных таблице 3.4 по каждому из указанных случаев.

Таблица 3.4 – Результаты имитационного моделирования

| № п/п | Время возникновения события t | Тип события z (отказ или восстановление) | Влияние события на поток движения поездов u | Суммарное время задержки поезда Tz | Суммарное количество задержанных поездов Nz |
|-------|---------------------------------|--|---|--------------------------------------|---|
| | | | | | |

На основе таблицы 3.4 определяют вероятность отказа приводящего к задержке движения поездов и вероятность отказа к ней не приводящую, а также строят распределения вероятности времени задержки поезда и количества задержек поездов.

Обработка указанных данных позволяет вычислить прямые и косвенные экономические риски.

Оценку экономических рисков следует выполнять в следующей последовательности:

- выявить типы распределений величин Tz и Nz , а также вероятности отказов приводящих и не приводящих к задержкам в движении поездов;
- выполнить оценку прямого экономического ущерба;
- выполнить оценку косвенного экономического ущерба;
- оценить результирующий экономический риск, связанный с надежностью и безопасностью функционирования железнодорожной инфраструктуры.

3.5 Выявление распределений случайных величин времени задержки поездов и количества задержек поездов из-за отказов, предотказных состояний и замечаний к функционированию железнодорожной инфраструктуры

Для выявления распределений указанных случайных величин следует выполнить обработку статистических данных из двух правых столбцов таблицы 3.4 при этом таблицу предварительно подвергают прореживанию, вычеркнув из нее строки, где отказы не вызвали задержек в движении поездов, для чего следует использовать признак ($u=0$).

Обработка статистических данных выполняется в соответствии с методикой, рассмотренной при формализации случайных процессов в главе 2.

Результатом применения методики являются функции плотности распределения времени задержки поезда $f_s(t)$ и плотности распределения количества задержек поездов $f_o(N)$.

Вероятности отказа $P_{отк}$ и опасного отказа $P_{опотк}$, как вероятности рискованных событий, определяются с использованием ранее выявленной экспоненциальной модели надежности:

$$P_{отк} = 1 - e^{-\lambda_o \cdot t} . \quad (3.30)$$

$$P_{опотк} = 1 - e^{-\lambda_{ино} \cdot t} . \quad (3.31)$$

После этого можно переходить к оценке экономического ущерба.

3.6 Оценка экономического ущерба

3.6.1 Оценка прямого экономического ущерба

Оценка прямого экономического ущерба, связанного с надежностью железнодорожной инфраструктуры, за расчетный интервал времени T_p осуществляется по формуле:

$$C_{пр}^н = (C_{пр}^{ам} \cdot \lambda_o^{ам} + C_{пр}^э \cdot \lambda_o^э + C_{пр}^н \cdot \lambda_o^n) \cdot T_p . \quad (3.32)$$

Оценка прямого экономического ущерба, связанного с безопасностью эксплуатации железнодорожной инфраструктуры, за тот же интервал времени осуществляется как:

$$C_{пр}^б = (C_{лик}^{ам} \cdot \lambda_{ино}^{ам} + C_{лик}^э \cdot \lambda_{ино}^э + C_{лик}^н \cdot \lambda_{ино}^н) \cdot T_p . \quad (3.33)$$

3.6.2 Оценка косвенного экономического ущерба

Косвенный экономический ущерб, как указано ранее, определяется временем и количеством задержек движения поездов, которые описаны с помощью

вероятностных распределений. Следовательно, величина ущерба имеет вероятностный характер. При этом косвенный ущерб может быть как внутренним, так и внешним.

В связи с этим полученные вероятностные распределения обрабатываются с целью получения интервальных оценок.

Интервальная оценка случайного параметра заключается в задании так называемого доверительного интервала, границы которого заданы двумя числами – концами интервала.

Как известно, доверительная вероятность связана с доверительным интервалом следующим соотношением, определяемым на основе функции плотности распределения случайной величины:

$$P(\beta - \Delta_1 \leq \beta \leq \beta + \Delta_2) = \int_{\beta - \Delta_1}^{\beta + \Delta_2} f(z) dz, \quad (3.34)$$

где $P(\beta - \Delta_1 \leq \beta \leq \beta + \Delta_2)$ – доверительная вероятность того, что случайная величина z будет находиться в некотором наперед заданном интервале $\beta - \Delta_1 \leq \beta \leq \beta + \Delta_2$;

β – математическое ожидание величины z ;

$f(z)$ – плотность распределения случайной величины z ;

Δ_1, Δ_2 – левая и правая границы интервала соответственно.

Графическая интерпретация интервальной оценки приведена на рисунке 3.11.

Таким образом, задавая границы интервала можно определять доверительную вероятность того, что случайная величина окажется в их пределах, а также можно решить и обратную задачу. Для этого нужно предварительно свести в таблицу доверительные вероятности, меняя ширину доверительного интервала с определённым шагом, что и требуется выполнить в нашем случае.

Тогда задавая доверительную вероятность, можно определять величину Δ_2 :

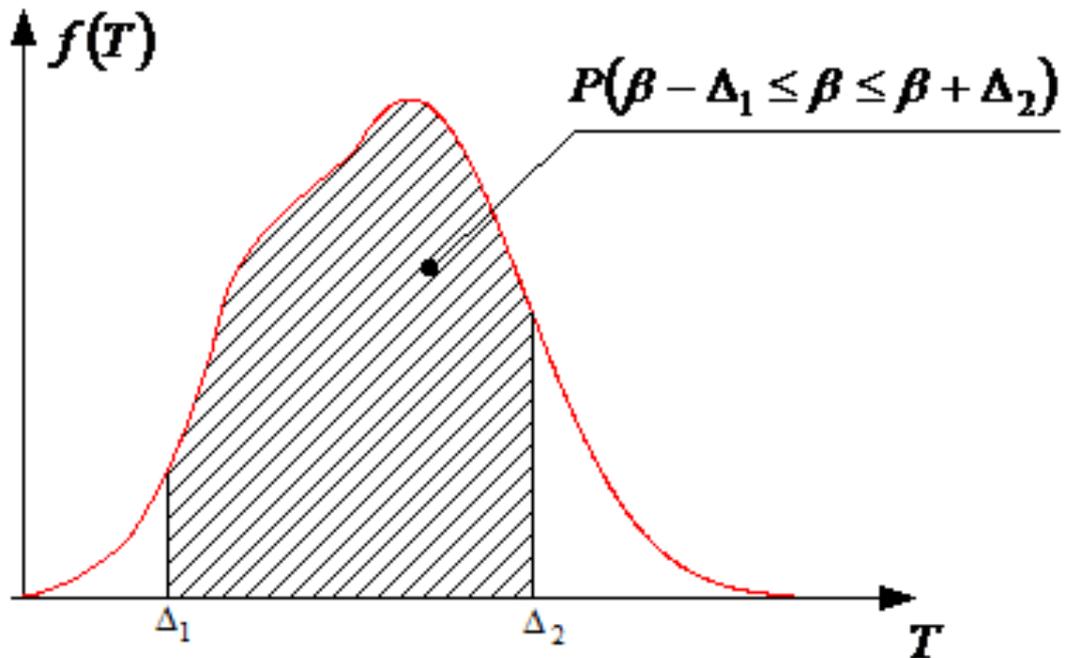


Рисунок 3.11 –Графическая интерпретация интервальной оценки случайной величины

- $\Delta_2 = T_n(P)$ времени задержки на основе распределения времени задержки поездов;
- $\Delta_2 = N_n(P)$ количества задержек на основе распределения количества задержек поездов.

При этом интервальную оценку можно давать двумя способами

– задавая минимальные значения количества задержек и минимального времени задержки равными нулю $\Delta_1 = 0$. Тогда интервальная оценка будет звучать, как «случайная величина с установленной доверительной вероятностью не превысит Δ_2 ».

– задавать оценку в виде интервала, начинающегося с одного значения $\Delta_1 \neq 0$ и заканчивая другим Δ_2 . Тогда интервальная оценка будет звучать, как «случайная величина с установленной доверительной вероятностью будет не менее Δ_1 и не более Δ_2 ».

Доверительная вероятность при этом будет выступать уровнем гарантии оценки того, что соответствующая случайная величина не превысит значения Δ_2 и не будет меньше Δ_1 .

Целесообразно уровень доверительной вероятности указывать не менее 0.95.

Оценку внутренних экономических издержек следует осуществлять с использованием следующих формул.

Составляющая цены отказов железнодорожной инфраструктуры, обусловленная ущербом в поездной работе по приведённым затратам:

$$C_{\Sigma}^n = C_{zp\ n}^n \cdot T_{zp} + C_{zp\ o}^n \cdot N_{zp} + C_{nac\ n}^n \cdot T_{nac} + C_{nac\ o}^n \cdot N_{nac}, \quad (3.35)$$

где $C_{nac\ o}^n$, $C_{nac\ n}^n$, $C_{zp\ o}^n$, $C_{zp\ n}^n$ - вычисляемые по схеме укрупненных расходов соответствующие удельные затраты;

$T_n(P) = T_{zp}$, $N_n(P) = N_{zp}$ - для грузовых поездов;

$T_n(P) = T_{nac}$, $N_n(P) = N_{nac}$ - для пассажирских поездов.

Составляющая цены по дополнительным эксплуатационным расходам:

$$C_{\Sigma}^{\varepsilon} = C_{zp\ n}^{\varepsilon} \cdot T_{zp} + C_{zp\ o}^{\varepsilon} \cdot N_{zp} + C_{nac\ n}^{\varepsilon} \cdot T_{nac} + C_{nac\ o}^{\varepsilon} \cdot N_{nac}. \quad (3.36)$$

Суммарные удельные затраты по всем хозяйствам:

$$C_{внут} = C_{\Sigma}^{\varepsilon\ am} + C_{\Sigma}^{\varepsilon} + C_{\Sigma}^{\varepsilon\ n} + C_{\Sigma}^{n\ am} + C_{\Sigma}^{n\ \varepsilon} + C_{\Sigma}^{n\ n}, \quad (3.37)$$

Оценка внешних косвенных экономических издержек должна осуществляться с использованием эмпирических моделей издержек от времени задержки поездов и частоты задержки:

$$C_{внеш} = C_{комп}(T_{zp}) + C_{комп}(T_{nac}) + C_{утиц}(T_{zp}, f) + C_{утиц}(T_{nac}, f). \quad (3.38)$$

Далее можно переходить к оценке результирующих экономических рисков.

3.7 Оценка результирующего экономического риска

Результирующий экономический риск определяется путем умножения вероятности рискового события на последствия. Отдельно можно определить прямые и косвенные экономические риски по надежности и безопасности.

– Прямой экономический риск по надежности железнодорожной инфраструктуры определяется как:

$$R_{пр\ n} = P_{отк} \cdot C_{пр}^n. \quad (3.39)$$

– Прямой экономический риск по безопасности определяется как:

$$R_{пр н} = P_{опотк} \cdot C_{пр}^{\delta}. \quad (3.40)$$

– Косвенный экономический риск по надежности вычисляется как:

$$R_{кос н} = P_{оа} \cdot (C_{внут} + C_{внеш}). \quad (3.41)$$

– Косвенный экономический риск по безопасности вычисляется как:

$$R_{кос \delta} = P_{опа} \cdot (C_{внут} + C_{внеш}). \quad (3.42)$$

Анализ рисков может осуществляться с помощью кривых, либо матриц рисков. При этом можно рассматривать составляющие риска по-отдельности, как вероятность рискового события и последствия, которые возникнут с этой вероятностью.

Взаимосвязь между уровнями соответствующих экономических рисков и показателями надежности и безопасности функционирования железнодорожной инфраструктуры выявляется путем подстановки в имитационную модель соответствующих уровней надежности и безопасности в виде интенсивности отказов λ_o и интенсивности опасных отказов $\lambda_{ино}$ с последующим вычислением уровней экономических рисков по надежности и безопасности R_n и R_δ . Проведя таблицу результатов при изменении интенсивности отказов и интенсивности опасных отказов можно решать и обратную задачу – оценивать допустимые уровни надежности $\lambda_o = f_1(R_n)$ и безопасности $\lambda_{ино} = f_2(R_\delta)$ на основе заданных величин экономических рисков.

В последующем на основе табулированных результатов для каждого участка железных дорог, включающего в себя тот или иной объект железнодорожной инфраструктуры, можно построить эмпирические модели с учетом конкретных вероятностных распределений случайных факторов, например, методом наименьших квадратов.

Применение модели в качестве одной из компонент информационных систем, обрабатывающих статистические данные, позволит автоматически планировать объем денежного запаса, необходимого на компенсацию последствий функционирования железнодорожной инфраструктуры на конкретном участке

железных дорог, а также оценивать допустимые уровни надежности и безопасности функционирования железнодорожной инфраструктуры.

3.8 Выводы по главе

В третьей главе получены следующие основные результаты:

1. Синтезирована имитационная модель, позволяющая оценивать уровень экономических рисков в зависимости от уровня надежности объектов железнодорожной инфраструктуры, характеристик процесса восстановления и характеристик процесса железнодорожных перевозок по участку. В отличие от известных аналитических моделей данная модель логически учитывает причинно-следственную связь между отдельными процессами, позволяет единообразно выполнять моделирование независимо от того, по каким законам распределены случайные величины, описывающие временные характеристики исходных взаимодействующих процессов. В отличие от применявшихся ранее для оценки технического ущерба из-за задержек в движении поездов имитационных детерминированных моделей, данная модель позволяет получить вероятностное описание результатов моделирования и, как следствие, осуществить оценку технических и экономических рисков. В отличие от известных имитационных статистических моделей, применявшихся для оценки среднего времени до восстановления объектов железнодорожной инфраструктуры разработанная модель учитывает характеристики перевозочного процесса.

2. Использована модель Генриха при разработке имитационной модели для оценки взаимосвязи между показателями надежности объектов железнодорожной инфраструктуры, процессом перевозок и экономическими рисками для учета влияния отдельных отклонений от норм содержания технических средств и предотказных состояний, которая широко применяется в риск-менеджменте.

3. Разработаны технологические алгоритмы, описывающие реализацию предложенной имитационной модели, математические модели генераторов

случайных величин, формирующих потоки событий в соответствии с усеченными вероятностными распределениями.

4. Разработана методика обработки результатов имитационного моделирования, которая, в отличие от известных, позволяет определять широкий перечень характеристик, дающих возможность оценивать как прямой, так и косвенный экономический риск: вероятности появления отказа и опасного отказа в процессе движения поезда и при его отсутствии, распределения случайных величин времени задержки поездов и количества задержек поездов, распределения затрат, связанных с задержкой в движении поездов и устранением отказов, а также позволяющая осуществить расчет экономических рисков. Методика позволяет количественно оценить влияние надежности объектов железнодорожной инфраструктуры на движение поездов на конкретном участке железной дороги и выразить его в денежном эквиваленте, а также принципиально позволяет решить и обратную задачу – определить, какой уровень надежности требуется обеспечить объекту железнодорожной инфраструктуры на заданном участке железной дороги, чтобы не превысить заданный уровень экономических рисков при реализации процесса железнодорожных перевозок.

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

4 ОЦЕНКА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО РЕСУРСА ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

4.1 Функциональный ресурс инфраструктуры железнодорожного транспорта

Качество подсистем инфраструктуры железнодорожного транспорта непосредственно влияет на процесс их функционирования и, как следствие, на качество предоставления услуг железнодорожной перевозки.

В качестве комплексного показателя качества подсистем инфраструктуры железнодорожного транспорта целесообразно использовать понятие «функциональный ресурс» объекта железнодорожной инфраструктуры.

Функциональный ресурс определяет потенциальную возможность применения подсистемы транспортной инфраструктуры в различных условиях эксплуатации и характеризует количество и качество реализуемых ей функций, то есть, иными словами, характеризует качество функционирования различных технических систем обеспечения движения поездов на железнодорожном транспорте. Рассмотрим методику оценки функционального ресурса подсистем инфраструктуры железнодорожного транспорта на примере систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ).

Оценка функционального ресурса для систем ЖАТ, наряду с оценкой их остаточного ресурса, оценкой экономической эффективности и соответствующих рисков, является обязательным этапом при проведении обследования, связанного с принятием решения о продлении назначенного срока службы действующих устройств и объектов ЖАТ, либо решения об их модернизации и замене.

4.2 Система показателей оценки функционального ресурса

Функциональный ресурс оценивают на основе совокупности количественных и качественных показателей, учитывающих специфику функциональных требований, предъявляемых к системам ЖАТ на станции или перегоне. Перечень основных характеристик систем ЖАТ и соответствующих им типов показателей приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Перечень характеристик и типов показателей, применяемых при оценке функционального ресурса систем ЖАТ

| Тип показателя | Характеристика | Пояснение |
|----------------|--|---|
| Количественный | Пропускная и провозная способность железнодорожной линии | Определяется расчетом |
| | Надёжность | Определяется расчетом |
| | Безопасность | Подтверждается расчетом или доказательством в соответствии с СТО РЖД 1.02.032-2010 |
| Качественный | Обязательные функциональные требования, предъявляемые к системам ЖАТ | Определяются ГОСТ 33894-2016 для станционных и ГОСТ 33895-2016 для перегонных систем ЖАТ, классом и специализацией железнодорожной линии в соответствии с [1] |
| | Дополнительные функциональные требования, предъявляемые к системам ЖАТ | Определяются для перегонных и станционных систем ЖАТ с учетом класса и специализации железнодорожной линии [1] |

Количественные показатели выражаются их численными значениями (интервалами значений). Перечень количественных показателей, используемых при оценке функционального ресурса систем ЖАТ приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Перечень количественных показателей, учитываемых при оценке функционального ресурса систем ЖАТ

| № п/п | Характеристика | Показатель | Обозначение |
|-------|--|--|-------------|
| 1 | Пропускная и провозная способность железнодорожной линии | Коэффициент использования пропускной способности железнодорожной линии | k |
| 2 | Надёжность | Интенсивность отказов системы ЖАТ | λ |
| 3 | Безопасность | Интенсивность опасных отказов системы ЖАТ | λ^o |

Перечень значений количественных показателей, используемых при оценке функционального ресурса систем ЖАТ, приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Перечень значений количественных показателей, используемых при оценке функционального ресурса систем ЖАТ

| № п/п | Значение показателя | Обозначение |
|-------|--|--------------------|
| 1 | Проектное значение коэффициента использования пропускной способности железнодорожной линии | k_{np} |
| 2 | Фактическое значение коэффициента использования пропускной способности железнодорожной линии | k_{ϕ} |
| 3 | Проектное значение интенсивности отказов системы ЖАТ | λ_{np} |
| 4 | Допустимое значение интенсивности отказов системы ЖАТ в предполагаемых или фактических условиях применения | λ_o |
| 5 | Фактическое значение интенсивности опасных отказов | λ_{ϕ}^o |
| 6 | Допустимое значение интенсивности опасных отказов | λ_o^o |

Оценка функционального ресурса для находящихся в эксплуатации систем ЖАТ и новых систем ЖАТ, предназначенных для модернизации или замены выработавших свой ресурс аналогичных систем, осуществляется на основе различных совокупностей значений количественных показателей. Перечни

значений показателей, используемых при оценке функционального ресурса для новых и находящихся в эксплуатации системам ЖАТ приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Перечни значений показателей, применяемых при оценке функционального ресурса для новых и находящихся в эксплуатации систем ЖАТ

| Характеристика | Перечень значений количественных показателей | |
|--|--|--|
| | Новая система ЖАТ | Находящаяся в эксплуатации система ЖАТ |
| Пропускная способность железнодорожной линии | k_{np} | k_{ϕ} |
| Надежность | λ_{np}, λ_o | —* |
| Безопасность | —** | $\lambda_{\phi}^o, \lambda_o^o$ |

Примечание: *

– Расчет и анализ надежности для находящихся в эксплуатации систем ЖАТ при оценке их функционального ресурса не осуществляется. Расчет и анализ соответствующих показателей производится при оценке остаточного ресурса в соответствии с Методикой оценки остаточного ресурса устройств и систем ЖАТ.

** – Уровень безопасности для новых систем ЖАТ оценивается и подтверждается на основе доказательства безопасности в соответствии с [80].

Перечень качественных показателей, используемых при оценке функционального ресурса систем ЖАТ, соответствует функциональным требованиям или дополнительным (потенциальным) функциональным возможностям систем ЖАТ. Каждый из качественных показателей, используемых при оценке функционального ресурса систем ЖАТ, может принимать одно из возможных значений: «ДА» и «НЕТ». Значение «ДА» означает, что соответствующее функциональное требование (возможность) для данной системы ЖАТ выполняется (имеется), значение «НЕТ» означает, что соответствующее функциональное требование (возможность) для данной системы ЖАТ не выполняется или не подтверждается (отсутствует).

Качественные показатели, учитываемые при оценке функционального ресурса систем ЖАТ, подразделяются на обязательные и дополнительные.

Обязательные качественные показатели формируются на основе функциональных требований к системам ЖАТ на станции и перегоне, в соответствии с ГОСТ[43] с учетом класса и специализации железнодорожной линии. Дополнительные качественные показатели оценивают потенциальные функциональные возможности системы ЖАТ к расширению предъявляемых к ней функциональных требований, технических и технологических возможностей.

В зависимости от класса и специализации железнодорожной линии одни и те же качественные показатели включаются в перечень обязательных или дополнительных показателей.

Оценка функционального ресурса систем ЖАТ базируется на использовании количественных показателей, указанных в таблице 4.4 и совокупности качественных показателей. Исходные данные при определении значений этих показателей приведены в таблице 4.5.

Тип системы ЖАТ определяется ее размещением: на станции или перегоне. Класс и специализация железнодорожной линии определяется в зависимости от характера поездной работы [53].

Исходные данные об участке железных дорог для определения коэффициента использования пропускной способности железнодорожной линии различаются для станций и железнодорожных участков по перегонам.

Таблица 4.5 – Исходные данные

| Исходные данные | Область применения |
|---|---|
| 1 | 2 |
| Тип системы ЖАТ | Определение количественных и качественных показателей |
| Класс и специализация железнодорожной линии | Определение количественных и качественных показателей |

Продолжение таблицы 4.5

| 1 | 2 |
|---|---|
|---|---|

| | |
|---|---|
| Данные об участке железной дороги | Определение проектного для новых и фактического – для эксплуатируемых систем ЖАТ значения коэффициента использования пропускной способности железнодорожной линии |
| Данные о предполагаемых условиях применения системы ЖАТ | Определение проектной интенсивности отказов новой системы ЖАТ в предполагаемых условиях эксплуатации. |
| Статистические данные об отказах, предотказных состояниях, инцидентах, замечаниях в работе систем ЖАТ в процессе эксплуатации за расчетный интервал времени | Расчет фактических значений интенсивности отказов и интенсивности опасных отказов |
| Допустимые значения интенсивности отказов и интенсивности опасных отказов | Оценка функционального ресурса системы ЖАТ |

Для перегонов:

- количество главных путей;
- средства сигнализации и связи по движению поездов;
- путевое развитие промежуточных отдельных пунктов;
- принятый тип графика движения;
- времена хода поездов по перегонам;
- станционные и межпоездные интервалы;
- особые условия организации движения поездов (подталкивание или двойная тяга поездов, обслуживание примыканий на перегоне, порядок следования по сплетениям путей, перегонам с однопутными мостами на двухпутных линиях и др.).

Для станций:

- схемы станции и технико-распорядительный акт станции;
- технические нормы технологического процесса работы станции;
- технического оснащения станции и прилегающих участков;

– исходные данные для расчета размеров движения в виде диаграммы поездопотоков.

Данные о предполагаемых условиях применения системы ЖАТ должны включать в себя сведения о климатической зоне, о классе и специализации железнодорожной линии.

Данные об отказах, предотказных состояниях, замечаниях и инцидентах, возникавших в системе ЖАТ в процессе эксплуатации за расчетный интервал времени, представляют собой сведения о моментах наступления (обнаружения) отказов и опасных отказов в изучаемой ЖАТ, а также моментов восстановления ее работоспособного состояния. На основе оценки надежности и безопасности функционирования системы ЖАТ получают фактическое значение интенсивности опасных отказов λ_{ϕ}^o допустимые значения интенсивности отказов λ_o и опасных отказов λ_o^o .

Коэффициент использования пропускной способности участка железнодорожных линий, оборудованных системами ЖАТ как для новых систем ЖАТ, так и для находящихся в эксплуатации вычисляется по формуле:

$$k = \frac{n_n}{n_n}, \quad (4.1)$$

где n_n – наличная пропускная участка железных дорог (станции или перегона);
 n_n – потребная пропускная способность участка железных дорог.

Для новых систем ЖАТ наличная пропускная способность определяется применительно к предполагаемым условиям эксплуатации, а для находящихся в эксплуатации – к фактическим.

Наличная пропускная способность участка железных дорог вычисляется на основе исходных данных таблицы 4.5 в соответствии с Инструкцией по расчету наличной пропускной способности железных дорог [50].

Значение потребной пропускной способности n_n задается для участка железнодорожных линий в качестве исходных данных при оценке функционального ресурса системы ЖАТ.

Определение проектного значения интенсивности отказов осуществляется только для новых систем ЖАТ. Для систем ЖАТ, находящихся в эксплуатации, производится оценка остаточного ресурса [32, 36, 37,39].

В качестве исходных данных для расчета используется проектное значение интенсивности отказов системы ЖАТ λ_n – определяемое производителем и заданное в качестве технико-эксплуатационного показателя новой системы ЖАТ, а также сведения о предполагаемых условиях применения, оформленные в виде таблицы 4.6.

Таблица 4.6 – Общая характеристика ЖАТ и условий её применения

| Характеристика | Примечание |
|---|---|
| Тип системы | Тип |
| Климатическая зона | Номер зоны от 1 до 9 |
| Класс и специализация железнодорожной линии | Класс: 1, 2, 3, 4, 5. Специализация: В, С, П, Г, О, Т, М |

Проектное значение интенсивности отказов системы ЖАТ в предполагаемых условиях эксплуатации λ_{np} определяется путем корректировки, применяемой по отношению к проектному значению интенсивности отказов системы ЖАТ λ_n – технико-эксплуатационному показателю, системой поправочных коэффициентов, учитывающих влияние предполагаемых условий применения.

Система поправочных коэффициентов включает в себя следующий перечень:

- k_k – поправочный климатический коэффициент;
- k_n – поправочный коэффициент нагруженности участка железной дороги.

Поправочный климатический коэффициент k_k служит для учета влияния климатических особенностей района применения на надежность функционирования аппаратуры системы ЖАТ. Поправочный коэффициент нагруженности участка железной дороги k_n определяется классом и специализацией железнодорожной линии. Класс и специализация железнодорожной линии определяется из таблицы 4.6.

Проектное значение интенсивности отказов системы ЖАТ в предполагаемых условиях применения вычисляется с использованием расчетной формулы:

$$\lambda_{np} = \lambda_n \cdot k_n \cdot k_k \quad (4.2)$$

Далее рассмотрено определение качественных показателей, используемых при оценке функционального ресурса систем ЖАТ.

Обязательные качественные показатели определяются требованиями ГОСТ к системам ЖАТ на станциях и перегонах и приведены в Приложении 4 (таблицах П.4.1-П.4.4.). В таблицах П.4.1 и П.4.3 Приложения 4 приведены качественные показатели систем ЖАТ на перегонах и станциях соответственно, а в таблицах П.4.2 и П.4.4 Приложения 4 вышеуказанные перечни приведены для новых систем ЖАТ и систем ЖАТ, находящихся в эксплуатации с указанием методов контроля.

В таблице П.4.5 Приложения 4 приведено распределение основных и дополнительных качественных показателей, используемых при оценке функционального ресурса систем ЖАТ на станции и перегоне в зависимости от класса и специализации железнодорожной линии. Если для системы ЖАТ при использовании ее на железнодорожной линии соответствующего класса и специализации, в таблице П.4.5 указано значение «О», то соответствующий качественный показатель является основным, если в таблице П.4.5 указано значение «Д», то данный показатель является дополнительным.

Результаты расчета количественных показателей сводят в таблицу 4.7.

На основе таблиц П.4.1-П.4.5 в зависимости от типа системы ЖАТ, класса и специализации железнодорожной линии формируются таблицы для фиксации значений качественных показателей, отдельно для основных и для дополнительных качественных показателей в виде таблицы 4.8.

Таблица 4.7 – Вычисленные значения количественных показателей системы ЖАТ

| № п/п | Обозначение показателя | Вычисленное значение |
|-------|------------------------|----------------------|
| 1 | k_{np} | |

| | | |
|---|------------------------------|--|
| 2 | k_{ϕ} | |
| 3 | λ_{np} | |
| 4 | λ_{∂} | |
| 5 | λ_{ϕ}° | |
| 6 | $\lambda_{\partial}^{\circ}$ | |

Таблица 4.8 – Значения основных (дополнительных) качественных показателей системы ЖАТ

| № п/п | Обозначение | Определенное значение |
|-------|-------------|-----------------------|
| 1 | z_1 | |
| 2 | z_2 | |
| ... | ... | |
| n | z_n | |

Исходные данные для оценки функционального ресурса систем ЖАТ включают в себя данные из таблиц 4.7 и 4.8.

4.3 Количественная оценка функционального ресурса систем железнодорожной автоматики и телемеханики

Оценка функционального ресурса системы ЖАТ осуществляется на основе критериев (правил) и получаемых на их основе результирующих показателей.

Результирующие количественные показатели системы ЖАТ представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Результирующие показатели, используемые при оценке функционального ресурса систем ЖАТ

| | |
|--|-------------|
| | Система ЖАТ |
|--|-------------|

| Результирующий показатель | 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 | $Z_2 = \begin{cases} \lambda_{np} \leq \lambda_{\phi} \Rightarrow \frac{\lambda_{\phi}}{\lambda_{np}} \\ \lambda_{np} > \lambda_{\phi} \Rightarrow 0 \end{cases}$ | $Z_2 = \begin{cases} T_o \text{ имеется} \Rightarrow 1 \\ T_o \text{ отсутствует} \Rightarrow 0 \end{cases}^{(*)}$ |
| Z_3 | $Z_3 = \begin{cases} C. \text{ имеется} \Rightarrow 1 \\ C. \text{ отсутствует} \Rightarrow 0 \end{cases}$ (**) | $Z_3 = \begin{cases} \lambda_{\phi} \leq \lambda_{\phi} \Rightarrow \frac{\lambda_{\phi}}{\lambda_{\phi}} \\ \lambda_{\phi} > \lambda_{\phi} \Rightarrow 0 \end{cases}$ |

Примечание: * - T_o – остаточный ресурс системы ЖАТ [32,39].

** - $C.$ – документ установленного образца.

\Rightarrow – знак присваиваемого значения соответствующему показателю Z_i при выполнении условия слева от самого знака.

Интегральный количественный показатель определяется путем перемножения частных показателей из таблицы 4.8:

$$Z = Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3. \quad (4.3)$$

Если хотя бы один из результирующих показателей равен нулю, то и интегральный показатель также равен нулю. В остальных случаях значения показателя $Z \geq 1$.

Величина запаса по количественным критериям вычисляется на основе формулы:

$$\Delta Z = \begin{cases} Z \geq 1 \Rightarrow Z - 1; \\ Z = 0 \Rightarrow 0. \end{cases} \quad (4.4)$$

При оценке качественных показателей отдельно формируют интегральный показатель по основным и дополнительным качественным показателям:

– обязательные качественные показатели:

$$Z_o = \begin{cases} \text{все } z_i \text{ определены в значении "да"} & \Rightarrow 1; \\ \text{хотя бы один } z_i \text{ определен в значении "нет"} & \Rightarrow 0; \end{cases} \quad (4.5)$$

– дополнительные качественные показатели:

$$Z_o = \begin{cases} 0.75 \leq \eta \leq 1 & \Rightarrow 3; \\ 0.5 \leq \eta < 0.75 & \Rightarrow 2; \\ 0.25 \leq \eta < 0.5 & \Rightarrow 1; \\ 0 \leq \eta < 0.25 & \Rightarrow 0. \end{cases} \quad (4.6)$$

Причем,

$$\eta = \frac{m_z}{M_z}, \quad (4.7)$$

где m_z – количество дополнительных качественных показателей в значении «да» для железнодорожной линии соответствующего класса и специализации;

M_z – общее количество дополнительных качественных показателей для железнодорожной линии соответствующего класса и специализации.

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

$$R = \Delta Z \cdot Z_o. \quad (4.8)$$

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 4.10.

Результаты оценки функционального ресурса для находящихся в эксплуатации систем ЖАТ совместно с результатами оценки их остаточного ресурса являются основой для расчета экономической эффективности продления назначенного срока службы, либо принятия решения об их модернизации или замене.

Оценка функционального ресурса для новых систем ЖАТ позволяет определить их применимость в зависимости от функциональных возможностей в конкретных условиях эксплуатации.

Для находящихся в эксплуатации систем ЖАТ, у которых функциональный ресурс, характеризуется как «незначительный», может рассматриваться вопрос их модернизации. Для тех же систем, но характеризующихся значением функционального ресурса «средний» и «высокий», рекомендуется продление срока службы с учетом результатов расчета остаточного ресурса систем ЖАТ.

Таблица 4.10 – 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 систем ЖАТ, у которых функциональный ресурс отсутствует, выполняется дополнительный анализ причин и выдача рекомендаций в соответствии с таблицей 4.11.

Таблица 4.11 – Рекомендации при отсутствии функционального ресурса

| Значение фактора | Пояснение | Рекомендация |
|------------------|---|--|
| $Z_1 = 0$ | Неудовлетворительная пропускная способность участка железнодорожной линии | 1. Рекомендуется комплексная модернизация объектов инфраструктуры с учетом требований по обеспечению наличной пропускной способности, предъявляемых к системам ЖАТ на перегонах и станциях. |
| $Z_2 = 0$ | Недостаточный уровень надежности | 1. Для новой системы ЖАТ ее применение не рекомендуется в данных условиях. 2. Для находящейся в эксплуатации системы ЖАТ рекомендуется модернизация или замена на основе результатов расчета остаточного ресурса. |
| $Z_3 = 0$ | У системы ЖАТ неудовлетворительный уровень безопасности | 1. Для новой системы ЖАТ ее применение не рекомендуется в данных условиях. 2. Для находящейся в эксплуатации системы ЖАТ рекомендуется модернизация или замена. |
| $Z_o = 0$ | Функционал системы ЖАТ не удовлетворяет требованиям ГОСТ | Рекомендуется заменить систему ЖАТ |

4.4 Выводы по главе

Основные результаты, изложенные в главе, заключаются в следующем:

1. Предложено для оценки качества подсистем инфраструктуры железнодорожного транспорта использовать новый, ранее не применявшийся термин - «функциональный ресурс», который определяет потенциальную возможность применения подсистемы транспортной инфраструктуры в различных условиях эксплуатации, приведено определение термина и разработана методика его оценки.

2. Разработана система показателей для оценки функционального ресурса, включающая в себя качественные показатели, характеризующие такие свойства подсистемы, как пропускную и провозную способность, надежность и безопасность, а также количественные, которые в свою очередь классифицированы на обязательные и дополнительные функциональные требования.

3. Выявлено, что перечень показателей для новых и находящихся в эксплуатации подсистем транспортной инфраструктуры различен.

4. На примере систем железнодорожной автоматики и телемеханики разработан перечень обязательных и дополнительных качественных показателей функционального ресурса, который зависит от типа системы (подсистемы транспортной инфраструктуры) класса и специализации железнодорожной линии.

5. Приведены общие методики расчета количественных и оценки качественных показателей функционального ресурса, а также методика определения интегральных показателей.

6. Разработана модель анализа функционального ресурса, представляемая в виде матрицы с различной раскраской, цвет которой определяет величину функционального ресурса конкретной подсистемы транспортной инфраструктуры.

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

8. Предложенные в работе методы и модели прошли апробацию и нашли практическое применение на сети железных дорог Российской Федерации, что подтверждено актами о практическом использовании результатов работы, приведенными в Приложении 5.

Результаты диссертационного исследования нашли практическое применение при разработке и эксплуатации технических средств интервального регулирования движения поездов, при реализации проекта модернизации железнодорожного участка Хойт – Замын Ууд Улан-Баторской железной дороги.

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».

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. Математические модели для оценки количественных показателей надежности технических средств железнодорожной автоматики использованы при разработке технических требований к различным объектам железнодорожного транспорта.

2. Разработана имитационная модель, позволяющая проводить статистический анализ взаимосвязи между уровнем технических рисков в виде задержек в движении поездов в течении времени устранения отказов объектов железнодорожной 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 функционированием объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

4. Предложен и обоснован метод анализа уровня надежности для повышения объективности оценки функционирования 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. Предложено ввести понятие «функциональный ресурс» для объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры в качестве комплексной характеристики качества производственного процесса технической эксплуатации железнодорожной 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». Внедрены разработки технических и функциональных требований к системе интервального регулирования движения поездов, методики оценки технических рисков, а также рисков прямых и косвенных экономических потерь. Результаты нашли практическое применение при разработке и эксплуатации технических средств интервального регулирования движения поездов, при реализации проекта модернизации железнодорожного участка Хойт – Замын Ууд Улан-Баторской железной 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альмеев С.А. Внедрение системы УРРАН на полигоне Северной железной дороги / Альмеев С.А. // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 10. – С. 23-39.
2. Анализ эксплуатационной деятельности хозяйства автоматики и телемеханики Центральной дирекции инфраструктуры за декабрь и 12 месяцев 2019 года // М.: ОАО «РЖД». – 2020. – 60 с.
3. Болотский Д.Н. Статистическая оценка остаточного ресурса устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Безродный Б.Ф., Болотский Д.Н., Веселова А.С., Голубев А.С., Горелик А.В., Журавлев И.А., Орлов А.В., Неваров П.А., Савченко П.В., Шалягин Д.В. – М., 2013. Деп. в ВИНТИ 25.10.2013, № 293–В2013.
4. Болотский Д.Н. Методика определения статистической оценки текущего состояния систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Безродный Б.Ф., Горелик А.В., Неваров П.А., Болотский Д.Н., Голубев А.С., Веселова А.С.//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
5. Болотский Д.Н. Повышение надежности функционирования объектов инфраструктуры хозяйства железнодорожной автоматики и телемеханики с учетом эффективности инвестиций/ Безродный Б.Ф., Горелик А.В., Неваров П.А., Болотский Д.Н., Голубев А.С., Веселова А.С./ 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
6. Болотский Д.Н. Оценка рисков, связанных с функционированием систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Болотский Д.Н., Горелик А.В., Журавлев И.А., Неваров П.А., Орлов А.В., Савченко П.В., Тарадин Н.А./ МИИТ – Москва, 2015. – 16 с.: 1 ил. – Библиогр. 2 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 10.11.15 № 187-В2015

7. Болотский Д.Н., Оценка функционального ресурса систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Болотский Д.Н., Горелик А.В., Журавлев И.А., Неваров П.А., Орлов А.В., Савченко П.В., Тарадин Н.А. / МИИТ – Москва, 2015. – 27 с.: 0 ил. – Библиогр. 6 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 10.11.15 № 188-B2015
8. Болотский Д.Н. Общие принципы управления ресурсами и рисками в хозяйстве автоматики и телемеханики / Болотский Д.Н., Горелик А.В., Журавлев И.А., Неваров П.А., Орлов А.В., Савченко П.В., Тарадин Н.А. / МИИТ – Москва, 2015. – 17 с.: 3 ил. – Библиогр. 2 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 10.11.15 № 186-B2015
9. Болотский Д.Н. Оценка показателей надежности и безопасности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Болотский Д.Н., Горелик А.В., Журавлев И.А., Неваров П.А., Орлов А.В., Савченко П.В., Тарадин Н.А. / МИИТ – Москва, 2015. – 20 с.: 0 ил. – Библиогр. 16 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 10.11.15 № 189-B2015
10. Болотский Д.Н. Мониторинг и оценка эффективности функционирования объектов транспортной инфраструктуры / Болотский Д.Н., Веселова А.С., Орлов А.В., Орлов В.В., Охотников И.В. / МИИТ – Москва, 2016. – 112 с.: 27 ил. – Библиогр. 53 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 28.01.16 № 25-B2016
11. Болотский, Д.Н. Алгоритм декодирования сигналов автоматической локомотивной сигнализации / Доклад на научно-технической конференции «Наука МИИТа – транспорту – 2007» – М.:МИИТ, 2007.
12. 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.
13. 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.
14. 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.

15. Болотский, Д.Н. Перспективы модернизации системы интервального регулирования / Д.Н. Болотский, С.В. Кузнецов, Г.С. Лодыгин // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – №5 – С. 29–31.

16. 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.

17. Бондарь О.В. Ситуационный менеджмент // www.uchebnikionline.com [электронный ресурс]

18. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров // М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. –1988. – 480 с.

19. Галанов, Ю.И. Статистическое моделирование: учебное пособие / Ю.И. Галанов. // 2-е изд., доп. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2010. – 42с.

20. Гапанович В.А. Методология анализа работы структурных подразделений / Гапанович В.А., Безродный Б.Ф., Горелик А.В., Шалягин Д.В., // Автоматика, связь, информатика – 2013. – №1. –С.2-5.

21. Гапанович В.А. Внедрение методологии УРРАН в хозяйстве АТ / В.А. Гапанович, Б.Ф. Безродный., А.В. Горелик, Д.В. Шалягин // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – №4. – С. 12-15.

22. Гапанович, В.А. Универсальный инструмент поддержки принятия решений/ В.А. Гапанович // Железнодорожный транспорт.– 2012. – №10. – С. 16-22.

23. Гармонин Э. Обеспечение безопасности движения – один из ключевых приоритетов РЖД // Пульт управления. Журнал для руководителей компаний транспортной отрасли. 2014. – №6. – 119 с.www.pult.gudok.ru [электронная версия журнала]

24. Годовой отчет ОАО «РЖД» за 2018 год. <https://ar2018.rzd.ru>.

25. Горелик, А.В. Методика оценки рисков, связанных с ненадежной работой систем железнодорожной автоматики / А.В. Горелик, И.А Журавлев, А.В. Орлов, А.С. Веселова, Н.А. Тарадин, П.А. Неваров // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2016 – Т.2. С. 178–179.

26. Горелик, А.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.

27. Горелик, А.В. Нормирование, оценка и анализ показателей надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики на основе данных, предоставляемых системами железнодорожного транспорта/ А.В. Горелик, Д.В. Солдатов, А.В. Орлов // РУТ (МИИТ) – Москва – 2017. – С.474.

28. Горелик, А.В. Нормирование показателей надежности объектов железнодорожной инфраструктуры / А.В. Горелик, А.С. Веселова, И.А Журавлев, А.В. Орлов, Д.В. Солдатов // НТТ – Наука и техника транспорта. –2017. – № 2 – С. 32–36.

29. Горелик, А.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 // РУТ (МИИТ), ВИНТИ – Москва – 2016.

30. Горелик, А.В. Определение эффективности эксплуатации и модернизации систем железнодорожной автоматики и телемеханики в зависимости от классификации железнодорожных линий / А.В. Горелик, И.А Журавлев, А.В. Орлов, А.С. Веселова, В.С. Дорохов, П.В. Савченко, Н.А. Тарадин, П.А. Неваров // РУТ (МИИТ), ВИНТИ – Москва – 2016.

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

32. Горелик, А.В. Оценка остаточного ресурса стрелочных

электроприводов / А.В. Горелик, В.С. Дорохов, Н.В. Бугреев, А.В. Орлов, В.С. Смагин // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – №4(94). – С. 35–40.

33. Горелик, А.В. Оценка рисков, связанных с функционированием систем электрической централизации / А.В. Горелик, В.Ю. Горелик, Д.В. Шалягин // Электротехника. – 2018. – №9. – С. 49–53.

34. Горелик А.В. Оценка целесообразности и эффективности инвестиций, направленных на повышение безотказности объектов хозяйства железнодорожной автоматики и телемеханики / Б.Ф. Безродный, А.В. Горелик, И.А. Журавлев, П.А. Неваров, А.В. Орлов, П.В. Савченко, Н.А. Тарадин, Д.В. Шалягин. // М.: ВИНТИ – 2011.– №533-В2011 – 17 с.

35. Горелик, А.В. Принципы управления качеством функционирования инфраструктуры в хозяйстве автоматики и телемеханики / А.В. Горелик, В.В. Аношкин, А.В. Орлов, Н.А. Тарадин, А.С. Веселова // Железнодорожный транспорт. – 2018.– №9. – С. 55–61.

36. Горелик, А.В. Проблемы эффективного планирования капитального ремонта и модернизации объектов железнодорожной автоматики и телемеханики / А.В. Горелик, В.И. Линьков, В.С. Дорохов, П.А. Неваров // Транспорт Урала. – 2019. – №1. – С. 36–40.

37. Горелик, А.В. Прогнозирование сроков замены аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики / А.В. Горелик, А.В. Орлов, Ю.С. Смагин, А.Н. Малых // РУТ (МИИТ), ВИНТИ – Москва – 2018. – С. 82–86.

38. Горелик, А.В. Реализация методологии УРРАН в хозяйстве автоматики и телемеханики / А.В. Горелик, В.В. Аношкин, Д.М. Поменков, С.Б. Смагин // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – № 6. – С. 2–6.

39. Горелик, А.В. Статистическая оценка ресурса стрелочных электроприводов / А.В. Горелик, В.С. Дорохов, А.В. Орлов, В.С. Смагин // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – №9. – С. 58–63.

40. Горьканова Т.Н. Анализ состояния безопасности движения поездов в путевом хозяйстве ОАО «РЖД» в 2011 г./Горьканова Т.Н.// Путь и путевое хозяйство 2012.– №5. – С.2-8.

41. ГОСТ33433-2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте»

42. ГОСТ 33893-2016 Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных переездах. Требования безопасности и методы контроля.

43. ГОСТ 33895-2016 Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на перегонах железнодорожных линий. Требования безопасности и методы контроля.

44. ГОСТ 33894-2016 Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях. Требования безопасности и методы контроля.

45. Журавлев, И.А. Принципы имитационного моделирования среднего времени до восстановления устройств железнодорожной автоматики/ И.А. Журавлев // НТТ – Наука и техника транспорта. – 2012. –№3. – С. 86 – 89.

46. Журавлев И.А. Модели и методы оценки показателей надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики /дисс. на соискание ученой степени канд.техн.наук. – М.: МГУПС –2013. – 244 с.

47. Журавлев, И.А. Управление надежностью функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики по экономическому критерию / А.В. Горелик, И.А. Журавлев, П.А. Неваров // Экономика железных дорог. – 2011. – №3. – С.60-69.

48. Замышляев А.М. Прикладные информационные системы управления надежностью, безопасностью, рисками и ресурсами на железнодорожном транспорте/ А.М. Замышляев. – Ульяновск: Областная типография «Печатный двор» – 2013. – 143 с.

49. Замышляев А.М., Построение системы управления рисками в ОАО «РЖД» на базе платформы SAS. / Замышляев А.М., Синицина Е.В. // Презентация доклада с форума SASForumRussia. Москва. – 13.09.2011.

50. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог, утверждена первым вице-президентом ОАО «РЖД» В.Н. Морозовым 10

ноября 2010 г.

51. Крылов В.В. Теория телетрафика и её приложения / В.В. Крылов, С.С. Самохвалова. // СПб.: БХВ-Петербург. – 2012. – 288с.

52. Матвеев Н.В. Экономическая безопасность предприятия. /Диссертация канд.эк.наук. // М. –1999. – С.15.

53. Методика классификации железнодорожных линий ОАО «РЖД», утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 4 марта 2015 года № 551р.

54. Неваров, П.А. Методы анализа эффективности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / дисс. на соиск. уч. степени кандидата техн. наук. // М.: МГУПС. – 2010. – 220с.

55. Орлов А.В.Методика расчета показателей надежности, безопасности и оценки рисков функционирования горочных систем автоматики / Безродный Б.Ф., Горелик А.В., Шалягин Д.В., Журавлев И.А и др.// М.: ВИНТИ. – 2012.– № 299-В2012.

56. Орлов А.В. Методика расчета показателей надежности, безопасности и оценки рисков функционирования систем интервального регулирования // Безродный Б.Ф., Горелик А.В., Шалягин Д.В., Журавлев И.А и др.// М.: ВИНТИ. – 2012. – № 298-В2012.

57. Орлов А.В. Методы оценки рисков для систем электрической и диспетчерской централизации / Б.Ф. Безродный, А.В. Горелик, И.А. Журавлев, П.А. Неваров, А.В. Орлов, Н.А. Тарадин, Д.В Шалягин. // М.:ВИНТИ. – 2011. – № 532 - В2011. -35 с.

58. Орлов А.В. Метод определения среднего времени до восстановления объектов железнодорожной автоматики / Б.Ф. Безродный, А.В. Горелик, И.А. Журавлев, П.А. Неваров, А.В. Орлов, Д.В. Солдатов, Н.А. Тарадин, Д.В Шалягин. // М.: ВИНТИ. – 2012. – № 297 –В2012. – 62 с.

59. Патент 2701887 РФ Система и способ непрерывного мониторинга состояния контактной сети рельсового транспорта / Д.Н. Болотский и др. – № 2018129315; заявл. 10.08.2018; опубл. 02.10.2019.

60. Патент 2721440 РФ Система внешнего блокирования

железнодорожной стрелки / Д.Н. Болотский и др. – № 2019128919; заявл. 13.09.2019; опубл. 19.05.2020.

61. Плетнев С. Собственные поездные формирования нужно тарифицировать по-новому // www.gudok.ru

62. Расписание движения пригородных поездов // www.tutu.ru

63. Розенберг Е.Н. УРРАН оценит риски // Пульт управления. Журнал для руководителей компаний транспортной отрасли. –2014 – №4. – 122 с. // www.pult.gudok.ru/ [электронная версия журнала]

64. Розенберг Е.Н. Экономические критерии принятия решений /Розенберг Е.Н., Рачковский М.Ю., Никифорова М.С. // Железнодорожный транспорт. 2012. – № 10. –С. 29-33.

65. Розенберг И.Н. Создание АС УРРАН / И.Н. Розенберг, А.М. Замышляев, С.В. Калинин // Железнодорожный транспорт.–2012.–№10. –С.41-44.

66. Система УРРАН. Управление ресурсами, рисками и надежностью объектов железнодорожного транспорта на всех этапах жизненного цикла. В.А. Гапанович, старший вице-президент ОАО «РЖД». Использование методологии УРРАН // Тематическая подборка. инв.№ 299113. Западно-Сибирский центр научно-технической информации и библиотек. Новосибирск, 2014.

67. Смит Д. Дж. Безотказность, ремонтпригодность и риск. Практические методы для инженеров, включая вопросы оптимизации надёжности и систем, связанных с безопасностью. // М.: ООО «Группа ИДТ». – 2007. – 432 с.

68. СТО РЖД 10.001-2011 Система управления экономической безопасностью. Основные положения. Утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 28 октября 2011 г. № 2326р.

69. СТО РЖД 1.02.031-2010 Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Программа обеспечения функциональной безопасности объектов железнодорожного транспорта. // М.: Трансинфо. – 2011.

70. СТО РЖД 1.02.033-2010 Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Порядок идентификации

опасностей и рисков. // М.: Трансинфо. – 2011.

71. СТО РЖД 1.02.034-2010 Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Общие правила оценки и управления рисками. // М.: Трансинфо. – 2011.

72. СТО РЖД 1.02.035-2010 Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Порядок определения допустимого уровня риска. // М.: Трансинфо. – 2011.

73. СТО РЖД 02.037-2011 «Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Управление стоимостью жизненного цикла систем, устройств и оборудования хозяйств ОАО «РЖД». // М.: Трансинфо. – 2012.

74. СТО РЖД 02.044-2011 «Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Термины и определения». // М.: Трансинфо. – 2012.

75. СТО РЖД 1.02.032-2010 Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта.

76. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р). // М.: Трансинфо. – 2008.

77. Управление ресурсами, рисками на всех этапах жизненного цикла на основе анализа надежности УРРАН. Инновационный дайджест:http://www.rzd-expo.ru/innovation/accelerating_and_increasing_the_reliability_of_the_service_life_of_facilities/resource_management_risk_to_the_life_cycle_and_reliability_analysis_of_urr

78. Чепланова М. РЖД не хватает на рельсы. // Ведомости № 3471 от 12.11.2013

79. Шубинский, И.Б. Основные научные и практические результаты разработки системы УРРАН / И.Б. Шубинский, А.М. Замышляев // Железнодорожный транспорт. –2012. – № 10. – С.23-28.

80. CSN EN 50126-1 - Railway applications - The specification and

demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS), 2001.

81. Golder, E.R. The Box-Muller Method for Generating Pseudo-Random Normal Deviates / E.R. Golder, J. G. Settle // Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), –1976, –Vol. 25. –No. 1.– pp. 12-20.

82. ISO 9000: Quality management and quality assurance standards. 1991.

83. UK Defence Standard 00-56 Safety Management Requirements, 1999.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

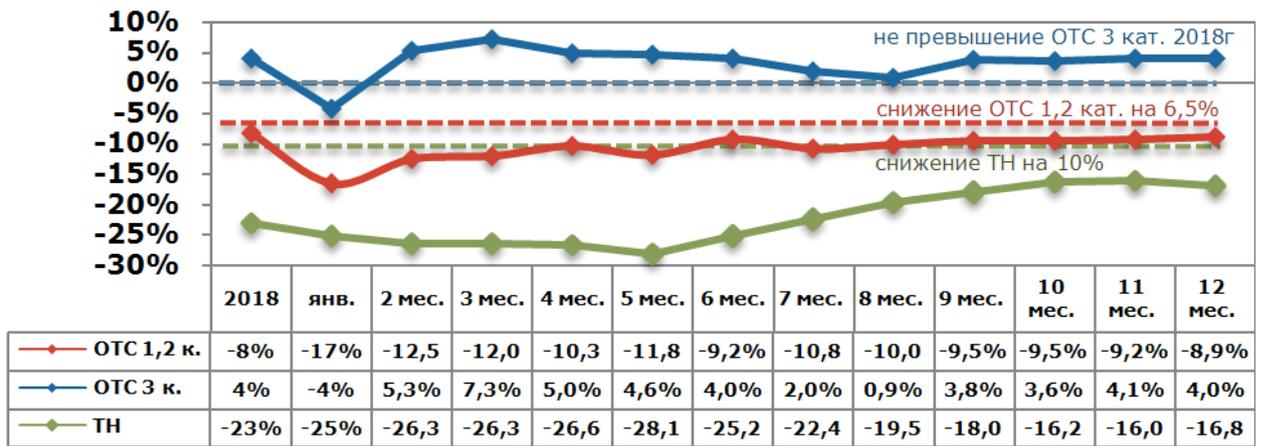


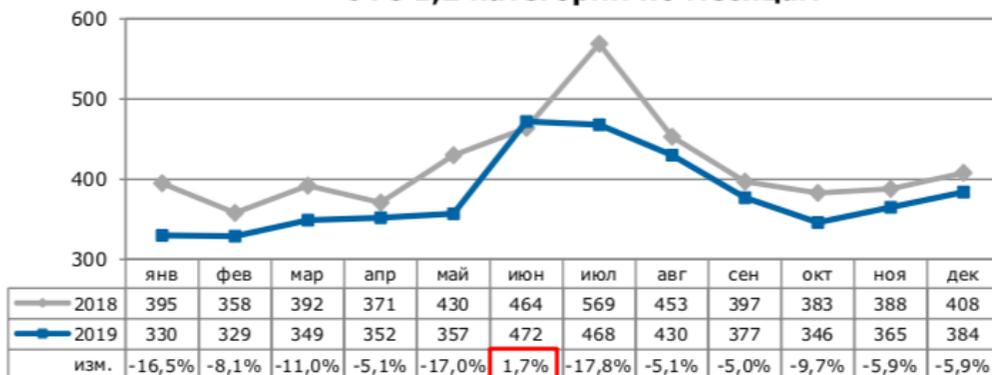
Рисунок П1.1 – Динамика отказов технических средств и технологических нарушений по вине хозяйства автоматики и телемеханики в 2019 году

Таблица П1.1 – Справка о количестве отказов технических средств на сети железных дорог ОАО «РЖД» по хозяйству автоматики и телемеханики

| Показатель | Фактическое значение | | |
|--|----------------------|----------|--------------|
| | 2018 | 2019 | Изменение, % |
| События | 13 | 9 | -30,8% |
| Отказы 1 и 2 категорий (ОТС) | 5008 | 4560 | -8,9% |
| Отказы 3 категории (ОТС) | 5040 | 5201 | +3,2% |
| Технологические нарушения (ТН) | 1400 | 1165 | -16,8% |
| Общие потери поездо-часов из-за отказов всех категорий и технологических нарушений | 14401,54 | 14465,89 | +0,4% |



ОТС 1,2 категорий по месяцам



ОТС 3 категории по месяцам

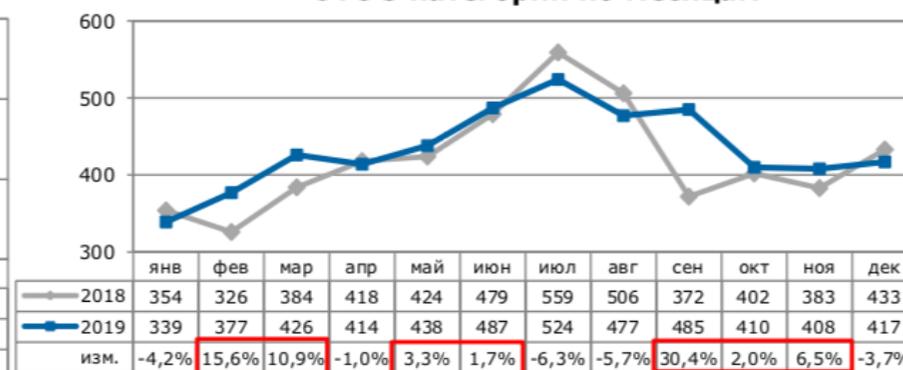


Рисунок П1.2 – Динамика отказов в работе технических средств всех категорий по годам и месяцам в хозяйстве автоматике и телемеханики

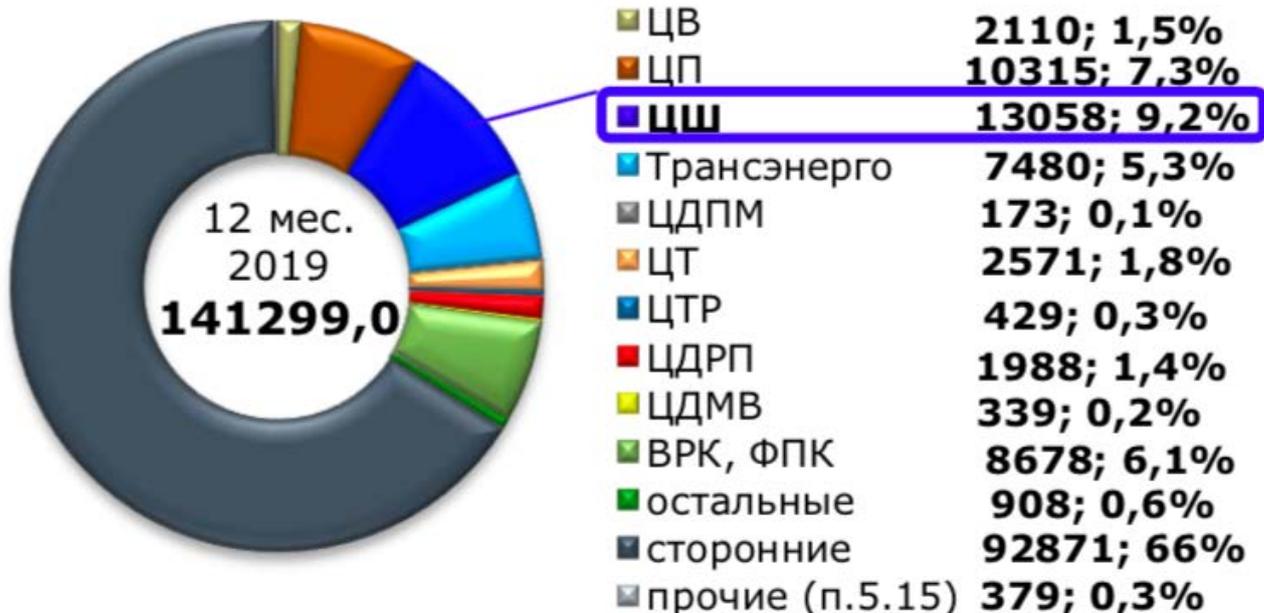


Рисунок П1.3 – Распределение потерь поездо-часов от отказов 1 и 2 категории в ОАО «РЖД»

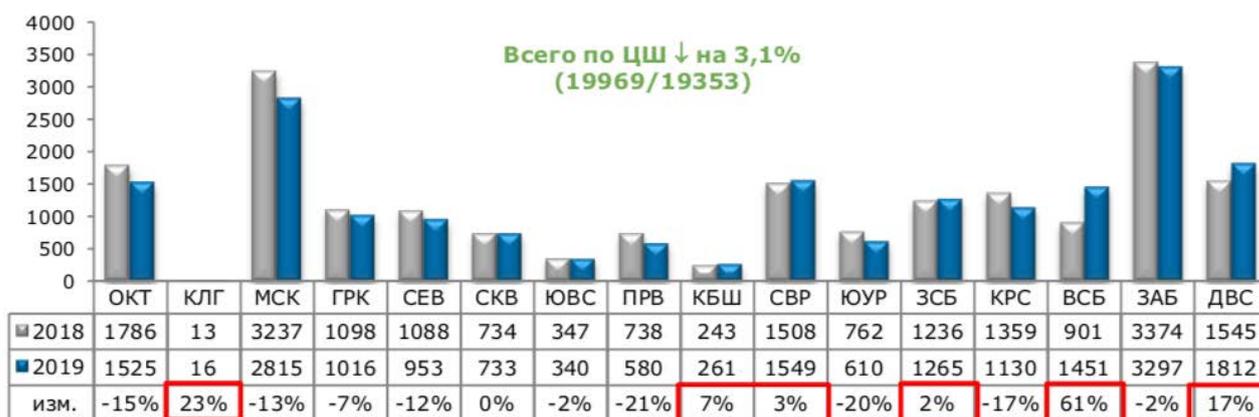


Рисунок П1.4 – Общее количество задержанных поездов за 2019 год по хозяйству автоматики и телемеханики

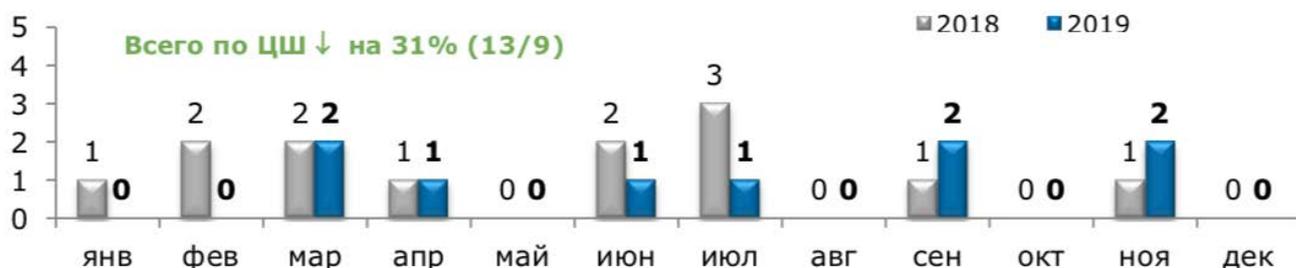


Рисунок П1.5 – Распределение количества событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта

Таблица П1.2 – Характеристики событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта в 2019 году

| Дорога | Событие | Причина |
|--------|--|---|
| 1 | 2 | 3 |
| МОСК | 13.03.2019 на станции Рыбное допущен перевод стрелки № 29 перед движущимся маневровым тепловозом, с последующим ее взрезом. | Исключение контактов повторителей путевого реле 29СПР и замыкающего реле 29ЗР из зависимости в схеме управления стрелками |
| СКАВ | 25.03.2019 по станции Гниловская произошло возгорание релейного помещения поста ЭЦ. Очаг возгорания – шкаф с технической документацией, установленный у стены между панелью питания и стивом. | Несоблюдение требований пожарной безопасности, низкое качество профилактической работы по исключению доступа посторонних лиц в служебные помещения. |
| СВЕРД | 02.04.2019 на сортировочной горке станции Серов-Сортировочный при роспуске вагонов на стрелочном переводе № 100 при скорости 3 км/ч допущен сход 2-х колесных пар первой тележки порожней платформы | Сбой в работе стрелочного электродвигателя типа ЭМСУ-СПГ № 804 |
| ГОРЬК | 05.06.19 при следовании грузового поезда № 7901 с тепловозом 2М62У-202 на 120км 2пк перегона Буа–Бюрганы допущен наезд на посторонний предмет (прибор для калибровки приемно-усилительного тракта устройств КТСМ) | Нарушение электромеханиками пункта 19 части IV ПТЭ РФ при проведении ремонтных работ – оставление калибратора на обочине железнодорожного пути с нарушением габарита. |
| ПРИВ | 26.07.2019 ст. Мариновка при приёме поезда №946 на второй путь станции, машинист Кашин увидел, что стрелочный перевод 2/4 по направлению первого пути, при скорости 63 км/ч применил экстренное торможение. | После выполнения работ по врезке кабельной вставки работниками ШЧ-14 и железнодорожной станции Мариновка не произведены проверки перевода стрелок, получения на аппарате управления контроля окончания перевода стрелок в плюсовое и минусовое положение, соответствия положения острижков стрелок положению стрелочных рукояток и контролю на аппарате управления. |
| ОКТ | 02.09.19 г.ст. Высоцк при отправлении с 13 пути на сбрасывающей стрелке №122СС при скорости 25 км/ч допущен сход тепловоза и четырех головных порожних полувагонов. | Перевод дежурным по железнодорожной станции сбрасывающей стрелки № 122СС в положение «на сброс» из-за нарушения алгоритма работы схемы ЭЦ |

Продолжение табл. П1.2

| 1 | 2 | 3 |
|-------|--|--|
| ГОРЬК | 05.09.2019 ст. Киров допущен проезд запрещающего выходного светофора Ч7 с последующим взрезом стрелочного перевода №1 | Нарушение технологии порядка ввода в действие устройств ЖАТ в соответствии с требованием стандарта СТО РЖД 19.002-2017 "Системы и устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Порядок ввода в эксплуатацию". |
| КРАС | 26.11.19 ст.Базаиха при производстве маневровой работы на стрелочном переводе № 4 допущен сход следовавшего резервом маневрового тепловоза | Неисправность схемы управления и контроля стрелкой. Ложный контроль стрелок № 4/6 , нарушение при вводе в эксплуатацию стрелок № 4/6 в части не проведения проверок взаимозависимостей |
| ОКТ | 06.11.19 ст.Ручьи при производстве маневровых работ на стрелочном переводе №10 допущен сход одного вагона | Перевод стрелки под составом, ложная занятость рельсовой цепи 10СП из-за отсутствия двух соединителей ЭМС 120x600 в корне левого остряка и рамного рельса на стрелке №10 |

Таблица П1.3 – Ключевые показатели надежности и безопасности и их функции

| Наименование показателя | Физический смысл | Единицы измерения | Уровень управления | Функции показателя |
|---|---|-------------------------|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Показатели безотказности (свойство надежности) | | | | |
| Интенсивность отказов | Количество отказов объекта за пропущенный тоннаж или за интервал наблюдения | [1/млрд. т брутто][1/ч] | Центральный ЦП, ЦЭ, ЦШ. Территориальный П, Э, Ш. Линейный | 1. Выявление наиболее часто отказывающихся объектов за пропущенный тоннаж или за интервал наблюдения 2. Оценка правильности выбора на этапе проектирования конструкций, устройств и материалов, подтверждение потребительских свойств продукции 3. Сравнительная оценка эффективности деятельности подразделений |
| Интенсивность предотказов | Количество предотказных состояний (отступлений) объекта за пропущенный тоннаж | [1/млрд. т брутто][1/ч] | Территориальный П, Э, Ш. Линейный ПЧ, ЭЧ, ШЧ | 1. Выявление накопления предотказов (дефектов) 2. Эффективность назначения соответствующих видов ремонта |

Продолжение табл. П1.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------------------|--|--------------------|---|---|
| Интенсивность использования резерва | Количество переключений на резерв за объем переработанной электроэнергией тяговой подстанции | [1/млн.кВт-ч.] | Линейный ЭЧ | 1.Выявление наименее надежных объектов при использовании резервирования 2.Эффективность назначения соответствующих видов ремонта |
| Показатели долговечности | | | | |
| Средний ресурс | Фактический пропущенный тоннаж за срок службы или фактический срок службы | [млрд.т.брутто][ч] | Центральный ЦП, ЦЭ, ЦШ. Территориальный П, Э, Ш | 1. Оценка исполнения нормативного пропущенного тоннажа за назначенный срок службы или фактический срок службы 2. Продление назначенного срока службы. |
| Показатели готовности | | | | |
| Коэффициент простоя | Отношение времени простоя объекта по причине отказа к общему времени наблюдения | | Центральный ЦП, ЦЭ, ЦШ. Территориальный П, Э, Ш | Оценка влияния отказов объекта и оперативности их устранения на перевозочный процесс |
| Показатели ремонтпригодности | | | | |
| Среднее время до восстановления | Среднее время устранения отказа | [ч] | Территориальный П, Э, Ш. Линейный | 1. Оценка оперативности реагирования и устранения отказов 2. Оценка технической оснащенности и кадрового состава подразделения на соответствие требованиям технологии технического содержания. 3. Сравнительная оценка эффективности деятельности подразделений |

Продолжение табл. П1.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|--|---|--------------------------|--|
| Показатели безопасности функционирования | | | | |
| Интенсивность опасных отказов | Количество опасных отказов за пропущенный тоннаж или за интервал наблюдения или за количество переработанной электроэнергии | [1/млрд. т.брутто] [1/ч] [1/млн.кВт-ч.] | Территориальный П, Э, Ш | Выявление наиболее опасных объектов |
| Средняя наработка на опасный отказ | Средний пропущенный тоннаж между двумя последовательными опасными отказами или среднее время работы между двумя последовательными опасными отказами или среднее количество переработанной электроэнергии между двумя последовательными опасными отказами | [млрд.т. брутто] [ч] [млн.кВ т.-ч.] | Территориальный П, Э, Ш. | Выявление объектов с наименьшим пропущенным тоннажем между опасными отказами или средним временем работы между двумя последовательными опасными отказами или средним количеством переработанной электроэнергии между двумя последовательными опасными отказами |

Таблица П1.4 – Классификация тяжести последствий в методологии УРРАН [66]

| Уровни тяжести последствий | Последствия по рискам | |
|--------------------------------------|--|--|
| | Внутренним | Внешним |
| 1 | 2 | 3 |
| Катастрофический [крушения] | Гибель одного или более человек или тяжкие телесные повреждения пяти или более человек, связанных с функционированием железнодорожного транспорта, или повреждение объекта подвижного состава до степени исключения из инвентарного парка или причинение ущерба объекту инфраструктуры в размере более 5000 минимальных размеров оплаты труда [МРОТ] | Гибель одного или более человек или тяжкие телесные повреждения пяти или более человек, связанных с функционированием железнодорожного транспорта, или причинение ущерба для окружающей среды, вызвавшего чрезвычайную ситуацию федерального или межрегионального характера |
| Критический [события 1 категории] | Причинение тяжких телесных повреждений до пяти человек, связанных с функционированием железнодорожного транспорта. Гибель одного человека или причинение тяжких телесных повреждений одному или более человек в результате умышленных или неосторожных действий самого пострадавшего или других лиц, не связанных с функционированием железнодорожного транспорта или повреждение объекта подвижного состава, требующее проведения капитального ремонта для восстановления его работоспособности или причинение ущерба объекту инфраструктуры в размере от 1500 до 5000 МРОТ или полная утрата груза | Тяжкие телесные повреждения до пяти человек, связанных с функционированием железнодорожного транспорта. Гибель или тяжкие телесные повреждения одного или более человек в результате умышленных или неосторожных действий самого пострадавшего или других лиц, не связанных с функционированием железнодорожного транспорта, или причинение ущерба для окружающей среды, вызвавшего чрезвычайную ситуацию регионального или межмуниципального характера. |
| Несущественный [событие 2 категории] | Причинение вреда здоровью средней тяжести или повреждение объекта подвижного состава, требующее проведения среднего или деповского ремонта для восстановления его работоспособности, или причинение ущерба объекту инфраструктуры в размере от 500 до 1500 МРОТ или частичная утрата груза | Причинение вреда здоровью средней тяжести или возникновение угрозы для окружающей среды, вызвавшей чрезвычайную ситуацию муниципального или локального характера. |

Продолжение таблицы П1.4

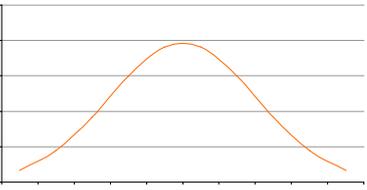
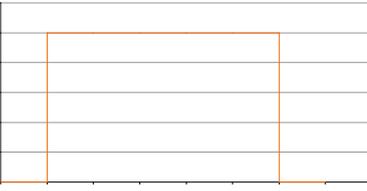
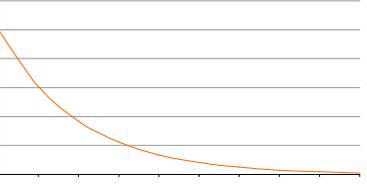
| 1 | 2 | 3 |
|---|--|---|
| Незначительный [отказы технических средств и нарушения технологии, не приведшие к крушениям и событиям 1 и 2 категории] | Причинение легкого вреда здоровью или повреждение объекта подвижного состава, требующее проведения текущего ремонта для восстановления его работоспособности или причинение ущерба объекту инфраструктуры в размере менее 500 МРОТ | |

Таблица П.1.5 – Классификация частоты событий в методологии УРРАН [65]

| Частота событий (вероятность) | Описание |
|-------------------------------|--|
| Частое | Вероятность частого возникновения. Постоянное наличие опасности. |
| Вероятное | Неоднократное возникновение. Ожидается частое возникновение опасного события. |
| Случайное | Вероятность неоднократного возникновения. Ожидается неоднократное возникновение опасного события. |
| Редкое | Вероятность того, что событие будет иногда возникать на протяжении жизненного цикла объекта. Обоснованное ожидание возникновения опасного события. |
| Крайне редкое | Вероятность возникновения маловероятна, но возможна. Можно предположить, что опасное событие может возникнуть в исключительном случае. |
| Маловероятное | Вероятность возникновения крайне маловероятна. Можно предположить, что опасное событие не возникнет. |

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П.2.1 – Типовые вероятностные распределения и их параметры

| Формула плотности вероятности | График плотности вероятности | Числовые параметры распределения |
|--|--|---|
| Нормальный закон распределения | | |
| $f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$ |  | Математическое ожидание: m Дисперсия: $D = \sigma^2$ Определяются непосредственно |
| Закон равномерной плотности | | |
| $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & x < a, x > b \end{cases}$ |  | Математическое ожидание и дисперсия определяются через значения левой границы интервала a и правой – b : $m = \frac{a+b}{2}$ $D = \frac{(b-a)^2}{12}$ |
| Экспоненциальный закон распределения | | |
| $f(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \lambda e^{-\lambda x} & x \geq 0 \end{cases}$ |  | Математическое ожидание и дисперсия выражаются через интенсивность λ : $m = \frac{1}{\lambda}$ $D = \frac{1}{\lambda^2}$ |

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица П.3.1 – Статистические данные об отказах, замечаниях и инцидентах первой категории на станции Лом Северной железной дороги

| Тип события | Дата наступления события | | | Время наступления события | | Время наступления события | Продолжительность события |
|-------------|--------------------------|------------|------|---------------------------|--------------|---------------------------|---------------------------|
| | (число) | ме- сяц | год) | (часы) | мину- ты) | (часы) | (часы) |
| Инцидент | 7 | 7 | 2013 | 1 | 5 | 4489,08 | 3 |
| Отказ | 31 | 8 | 2013 | 17 | 30 | 5825,5 | 0,15 |
| Отказ | 14 | 9 | 2013 | 13 | 15 | 6157,25 | 1,53 |
| Отказ | 28 | 7 | 2015 | 0 | 50 | 22512,83 | 0,05 |
| Замечание | 14 | 11 | 2014 | 16 | 20 | 328,33 | 0 |
| Замечание | 23 | 12 | 2014 | 15 | 30 | 1263,50 | 0 |
| Замечание | 24 | 12 | 2014 | 16 | 40 | 1288,67 | 0 |
| Замечание | 14 | 1 | 2015 | 12 | 10 | 9084,17 | 0 |
| Замечание | 15 | 2 | 2015 | 9 | 20 | 9849,33 | 0 |
| Замечание | 24 | 2 | 2015 | 14 | 50 | 10070,83 | 0 |
| Замечание | 13 | 3 | 2015 | 9 | 20 | 10473,33 | 0 |
| Замечание | 18 | 3 | 2015 | 20 | 11 | 10604,18 | 0 |
| Замечание | 24 | 4 | 2015 | 15 | 8 | 11487,13 | 0 |
| Замечание | 15 | 5 | 2015 | 9 | 18 | 11985,30 | 0 |
| Замечание | 12 | 6 | 2015 | 15 | 18 | 12663,30 | 0 |
| Замечание | 18 | 6 | 2015 | 18 | 9 | 12810,15 | 0 |
| Замечание | 15 | 7 | 2015 | 15 | 18 | 13455,30 | 0 |
| Замечание | 12 | 8 | 2015 | 18 | 8 | 14130,13 | 0 |
| Замечание | 11 | 9 | 2015 | 13 | 8 | 14845,13 | 0 |
| Замечание | 4 | 10 | 2015 | 16 | 18 | 15400,30 | 0 |
| Замечание | 7 | 10 | 2015 | 7 | 18 | 15463,30 | 0 |
| Замечание | 8 | 10 | 2015 | 10 | 28 | 15490,47 | 0 |

Таблица П.3.2 – Данные о количестве замечаний по станции Лом Северной железной дороги

| Тип события | Общее количество выявленных новых замечаний | Дата обнаружения | | | Время обнаружения | |
|-------------|---|------------------|-------|------|-------------------|---------|
| | | (число) | месяц | год) | (часы) | минуты) |
| Замечание | 1 | 14 | 11 | 2014 | 16 | 20 |
| Замечание | 11 | 23 | 12 | 2014 | 15 | 30 |
| Замечание | 1 | 24 | 12 | 2014 | 16 | 40 |
| Замечание | 4 | 14 | 1 | 2015 | 12 | 10 |
| Замечание | 1 | 15 | 2 | 2015 | 9 | 20 |
| Замечание | 9 | 24 | 2 | 2015 | 14 | 50 |
| Замечание | 2 | 13 | 3 | 2015 | 9 | 20 |
| Замечание | 1 | 18 | 3 | 2015 | 20 | 11 |
| Замечание | 24 | 24 | 4 | 2015 | 15 | 8 |
| Замечание | 2 | 15 | 5 | 2015 | 9 | 18 |
| Замечание | 2 | 12 | 6 | 2015 | 15 | 18 |
| Замечание | 1 | 18 | 6 | 2015 | 18 | 9 |
| Замечание | 1 | 15 | 7 | 2015 | 15 | 18 |
| Замечание | 1 | 12 | 8 | 2015 | 18 | 8 |
| Замечание | 2 | 11 | 9 | 2015 | 13 | 8 |
| Замечание | 4 | 4 | 10 | 2015 | 16 | 18 |
| Замечание | 1 | 7 | 10 | 2015 | 7 | 18 |
| Замечание | 4 | 8 | 10 | 2015 | 10 | 28 |

Таблица П.3.3 – Статистические данные о времени до восстановления по станции Лом Северной железной дороги

| № п/п | Значение времени до восстановления |
|-------|------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|------------------------------------|
| 1 | 0,500239 | 26 | 0,843756 | 51 | 0,978823 | 76 | 0,867543 |
| 2 | 1,571458 | 27 | 1,12348 | 52 | 0,626989 | 77 | 1,105288 |
| 3 | 0,648284 | 28 | 1,002125 | 53 | 0,656511 | 78 | 0,870912 |
| 4 | 0,79858 | 29 | 1,120311 | 54 | 0,676429 | 79 | 1,499906 |
| 5 | 0,833467 | 30 | 0,858803 | 55 | 0,668133 | 80 | 1,069569 |
| 6 | 0,691422 | 31 | 1,369299 | 56 | 0,925885 | 81 | 0,923398 |
| 7 | 0,938951 | 32 | 0,410292 | 57 | 1,282218 | 82 | 1,21946 |
| 8 | 1,000546 | 33 | 1,289033 | 58 | 1,210775 | 83 | 0,880215 |
| 9 | 1,016324 | 34 | 0,808777 | 59 | 0,869274 | 84 | 0,954074 |
| 10 | 0,902696 | 35 | 0,990382 | 60 | 1,414464 | 85 | 1,092959 |
| 11 | 1,015311 | 36 | 0,495334 | 61 | 1,203221 | 86 | 0,838655 |
| 12 | 0,727244 | 37 | 0,335627 | 62 | 0,878973 | 87 | 0,991247 |
| 13 | 0,550822 | 38 | 1,361876 | 63 | 1,346641 | 88 | 0,849864 |
| 14 | 0,361808 | 39 | 0,591453 | 64 | 0,811082 | 89 | 1,222757 |
| 15 | 0,936545 | 40 | 1,145247 | 65 | 0,86047 | 90 | 0,569395 |
| 16 | 0,478333 | 41 | 0,678846 | 66 | 1,11399 | 91 | 1,042167 |
| 17 | 0,732259 | 42 | 1,065546 | 67 | 0,901825 | 92 | 0,756394 |
| 18 | 1,093241 | 43 | 1,127835 | 68 | 0,541059 | 93 | 1,259223 |
| 19 | 0,650108 | 44 | 1,356252 | 69 | 0,987289 | 94 | 0,813286 |
| 20 | 1,070081 | 45 | 0,711982 | 70 | 0,475104 | 95 | 1,302228 |
| 21 | 1,315352 | 46 | 1,045824 | 71 | 0,80719 | 96 | 1,154007 |
| 22 | 0,732608 | 47 | 0,633624 | 72 | 0,633454 | 97 | 0,967286 |
| 23 | 0,59436 | 48 | 1,30558 | 73 | 1,131588 | 98 | 1,146692 |
| 24 | 0,799843 | 49 | 0,034931 | 74 | 0,174311 | 99 | 0,541059 |
| 25 | 0,920291 | 50 | 0,98935 | 75 | 0,991174 | 100 | 1,302285 |

Таблица П.3.4 – Интервалы между поездами Рижского направления МЖД [62]

| №п/п | Станция отправления: Москва Рижская | Время в часах | Интервалы между поездами |
|------|--|---------------|--------------------------|
| 1 | 0:14 | 0,2333 | 0,2333 |
| 2 | 0:40 | 0,6667 | 0,4333 |
| 3 | 4:12 | 4,2000 | 3,5333 |
| 4 | 5:04 | 5,0667 | 0,8667 |
| 5 | 6:19 | 6,3167 | 1,2500 |
| 6 | 6:26 | 6,4333 | 0,1167 |
| 7 | 7:00 | 7,0000 | 0,5667 |
| 8 | 7:56 | 7,9333 | 0,9333 |
| 9 | 8:58 | 8,9667 | 1,0333 |
| 10 | 9:39 | 9,6500 | 0,6833 |
| 11 | 9:55 | 9,9167 | 0,2667 |
| 12 | 10:19 | 10,3167 | 0,4000 |
| 13 | 11:01 | 11,0167 | 0,7000 |
| 14 | 13:17 | 13,2833 | 2,2667 |
| 15 | 13:35 | 13,5833 | 0,3000 |
| 16 | 13:50 | 13,8333 | 0,2500 |
| 17 | 14:26 | 14,4333 | 0,6000 |
| 18 | 14:52 | 14,8667 | 0,4333 |
| 19 | 15:26 | 15,4333 | 0,5667 |
| 20 | 15:41 | 15,6833 | 0,2500 |
| 21 | 16:01 | 16,0167 | 0,3333 |
| 22 | 16:10 | 16,1667 | 0,1500 |
| 23 | 16:35 | 16,5833 | 0,4167 |
| 24 | 16:49 | 16,8167 | 0,2333 |
| 25 | 17:23 | 17,3833 | 0,5667 |
| 26 | 17:38 | 17,6333 | 0,2500 |
| 27 | 18:00 | 18,0000 | 0,3667 |
| 28 | 18:06 | 18,1000 | 0,1000 |
| 29 | 18:48 | 18,8000 | 0,7000 |
| 30 | 19:01 | 19,0167 | 0,2167 |
| 31 | 19:26 | 19,4333 | 0,4167 |
| 32 | 19:33 | 19,5500 | 0,1167 |
| 33 | 20:02 | 20,0333 | 0,4833 |
| 34 | 20:30 | 20,5000 | 0,4667 |
| 35 | 21:10 | 21,1667 | 0,6667 |
| 36 | 21:29 | 21,4833 | 0,3167 |
| 37 | 21:47 | 21,7833 | 0,3000 |
| 38 | 22:05 | 22,0833 | 0,3000 |
| 39 | 22:23 | 22,3833 | 0,3000 |
| 40 | 22:31 | 22,5167 | 0,1333 |
| 41 | 23:01 | 23,0167 | 0,5000 |
| 42 | 23:16 | 23,2667 | 0,2500 |
| 43 | 23:30 | 23,5000 | 0,2333 |
| 44 | 23:46 | 23,7667 | 0,2667 |

Таблица П.3.5 – Интервалы времени занятия платформы «Красный балтиец» МЖД

| Конечная остановка | Время занятия (мин) | Время занятия (час) |
|--------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Новоиерусалимская | 2,5 | 0,042 |
| Нахабино | 3,0 | 0,051 |
| Новоиерусалимская | 2,0 | 0,034 |
| Волоколамск | 3,4 | 0,057 |
| Шаховская | 2,4 | 0,040 |
| Новоиерусалимская | 3,5 | 0,058 |
| Волоколамск | 2,5 | 0,042 |
| Шаховская | 3,2 | 0,053 |
| Румянцево | 2,4 | 0,041 |
| Новоиерусалимская | 1,4 | 0,023 |
| Нахабино | 2,9 | 0,048 |
| Шаховская | 3,2 | 0,054 |
| Румянцево | 2,8 | 0,047 |
| Новоиерусалимская | 3,1 | 0,052 |
| Волоколамск | 2,9 | 0,048 |
| Новоиерусалимская | 4,5 | 0,075 |
| Шаховская | 2,9 | 0,048 |
| Новоиерусалимская | 1,6 | 0,027 |
| Волоколамск | 3,4 | 0,056 |
| Новоиерусалимская | 1,9 | 0,031 |
| Нахабино | 4,4 | 0,073 |
| Шаховская | 2,5 | 0,041 |
| Новоиерусалимская | 2,6 | 0,044 |
| Волоколамск | 1,9 | 0,031 |
| Волоколамск | 2,4 | 0,040 |
| Нахабино | 1,9 | 0,032 |
| Нахабино | 2,9 | 0,049 |
| Новоиерусалимская | 2,9 | 0,048 |
| Волоколамск | 2,1 | 0,035 |
| Новоиерусалимская | 4,0 | 0,067 |

Продолжение таблицы П.3.5

| 1 | 2 | 3 |
|-------------------|-----|-------|
| Румянцево | 3,6 | 0,059 |
| Нахабино | 1,4 | 0,024 |
| Шаховская | 3,6 | 0,061 |
| Новоиерусалимская | 3,4 | 0,057 |
| Волоколамск | 3,6 | 0,060 |
| Нахабино | 3,8 | 0,063 |
| Нахабино | 2,2 | 0,036 |
| Нахабино | 1,4 | 0,024 |
| Волоколамск | 2,3 | 0,039 |
| Нахабино | 2,0 | 0,034 |
| Новоиерусалимская | 3,3 | 0,055 |
| Нахабино | 3,0 | 0,050 |
| Нахабино | 2,9 | 0,048 |
| Нахабино | 3,1 | 0,052 |

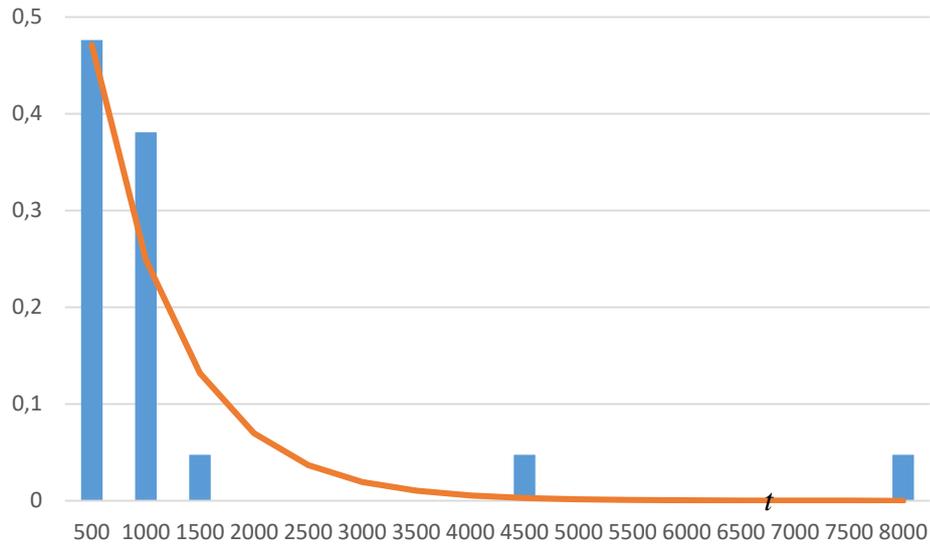
$f(t)$ 

Рисунок П.3.1 – Гистограмма эмпирического статистического и кривая теоретического вероятностного распределений интервалов времени между отказами, замечаниями и инцидентами по станции Лом Северной железной дороги

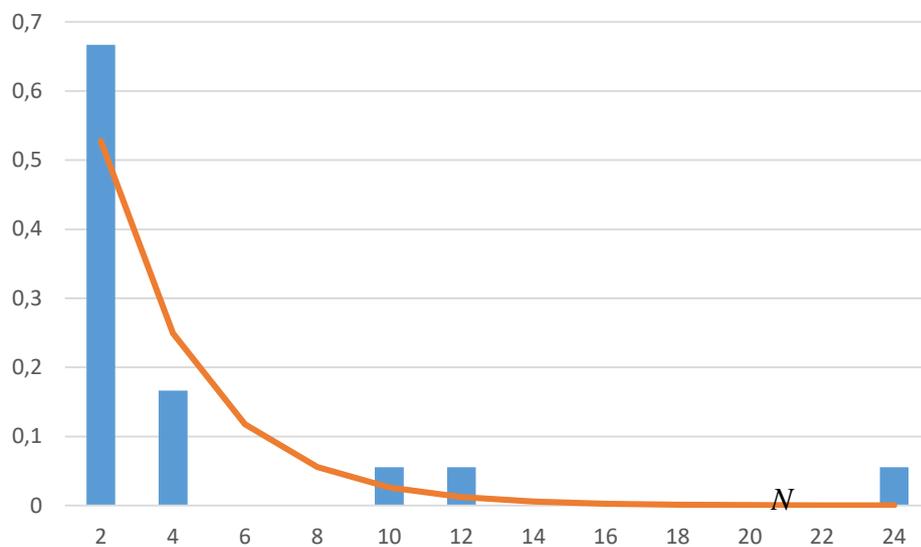
 $f(N)$ 

Рисунок П.3.2 – Эмпирическое и теоретическое распределения плотности вероятности количества регистрируемых замечаний по станции Лом Северной железной дороги

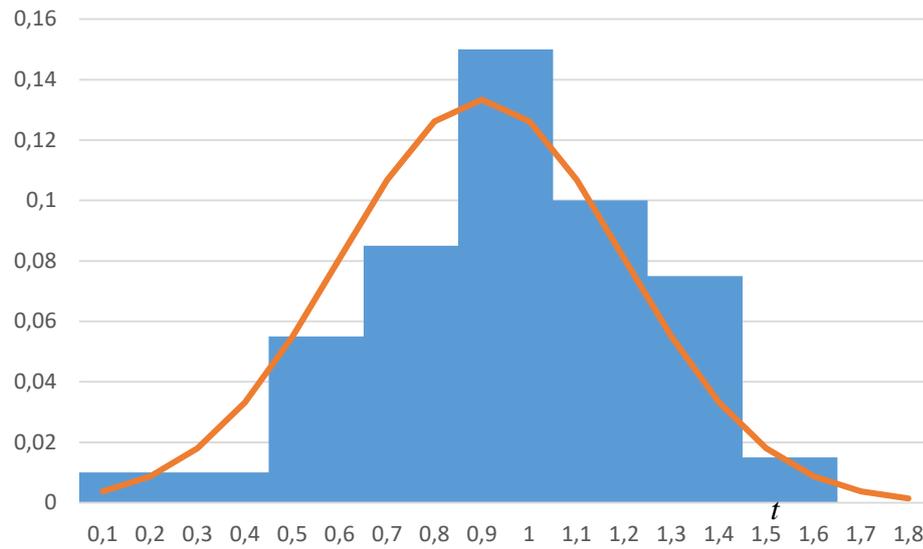
$f(t)$ 

Рисунок П.3.3 –Эмпирическое и теоретическое распределения плотности вероятности времени до восстановления по станции Лом Северной железной дороги

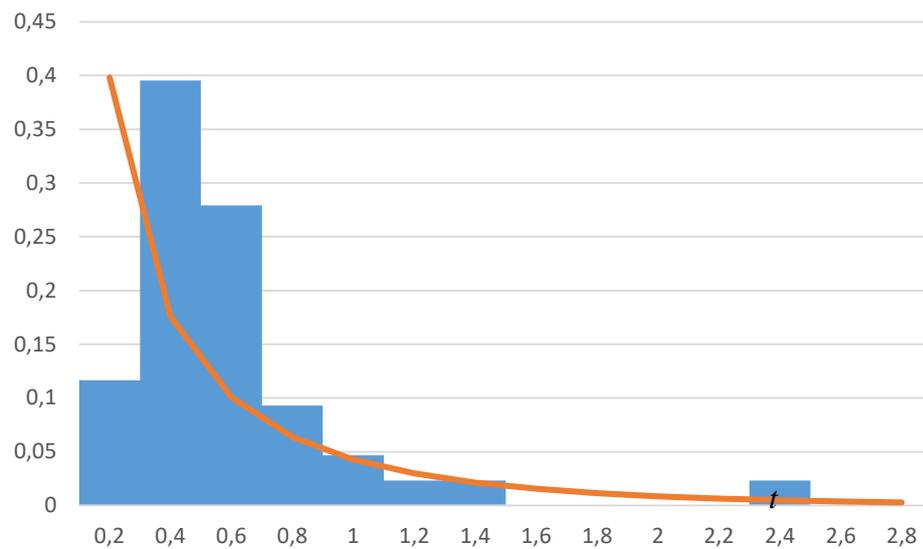
 $f(t)$ 

Рисунок П.3.4 –Эмпирическое и теоретическое распределения плотности вероятности интервалов между поездами по Рижскому направлению МЖД

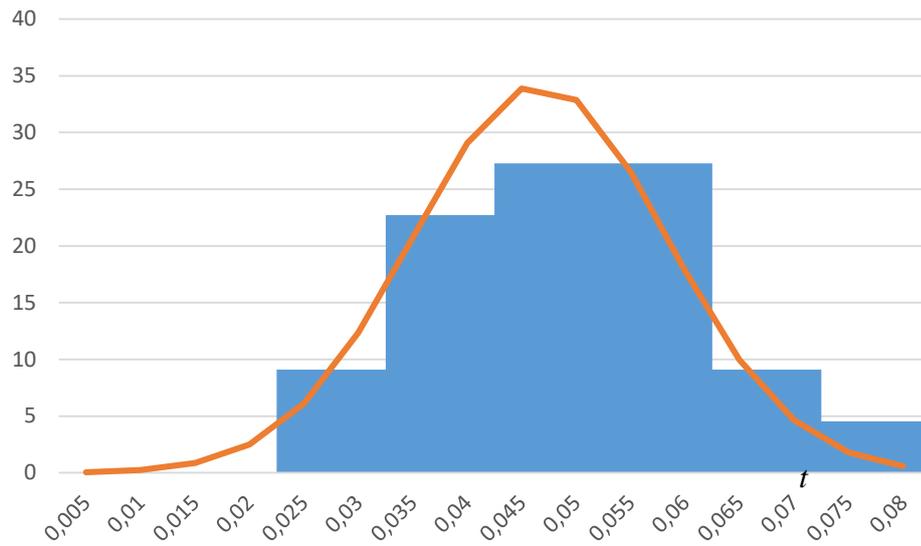


Рисунок П.3.5 –Эмпирическое и теоретическое распределения плотности вероятности времени занятия платформы «Красный балтиец» МЖД

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Таблица П.4.1 – Обязательные функциональные требования, предъявляемые к системам ЖАТ на перегонах

| № п/п | Требование | Показатель |
|-------|---|------------|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Системы должны обеспечивать реализацию функций безопасности в соответствии с п. 4.1.1 [43]. | z_1 |
| 2 | Системы должны обеспечивать реализацию технологических функций в соответствии с п. 4.1.1 [43]. | z_2 |
| 3 | Реализация функции включения разрешающего показания железнодорожного светофора должна удовлетворять требованиям п.4.1.2.1 [43] | z_3 |
| 4 | Реализация функции смены направления движения железнодорожных поездов по пути перегона должна удовлетворять требованиям п.4.1.2.2 [43] | z_4 |
| 5 | Реализация управления и контроля перегонными системами должна осуществляться в соответствии с п.4.2 в общей части [43] | z_5 |
| 6 | Системы должны обеспечивать контроль реализации функции в соответствии с п 4.2.1 [43]. | z_6 |
| 7 | Дежурному персоналу системы должны обеспечивать возможности в соответствии с п. 4.2.2 [43] | z_7 |
| 8 | Напольное оборудование перегонных систем должно устанавливаться в соответствии с требованиями габарита железнодорожного подвижного состава и габаритами приближения строений, в соответствии с п 4.3.1 [43] | z_8 |
| 9 | В соответствии с [43]технические средства перегонной системы должны выполнять свои функции во всех предусмотренных при их разработке и (или) проектировании условиях и режимах, не создавая при этом препятствий для функционирования как других технических средств железнодорожной автоматики и телемеханики, так и объектов инфраструктуры железнодорожной линии | z_9 |
| 10 | В соответствии с проектом по оборудованию участка железнодорожной линии технические средства перегонной системы должны быть функционально, информационно и технически совместимыми с системами, перечисленными в 4.3.3 [43]. | z_{10} |

Продолжение таблицы П.4.1

| 1 | 2 | 3 |
|----|--|----------|
| 11 | В соответствии с п.4.3.4 [43] технические средства перегонной системы должны обеспечивать безопасное взаимодействие с другими системами железнодорожной автоматики и телемеханики, действующими на данном участке железнодорожной линии, или обеспечивать возможность интегрирования функций этих систем | z_{11} |
| 12 | Аппаратные и программные средства перегонных систем должны быть разработаны, спроектированы и изготовлены таким образом, чтобы во всех предусмотренных проектом условиях и режимах их работы, при соблюдении всех требований, установленных в эксплуатационной документации, обеспечивалась реализация всех функций по обеспечению безопасности движения поездов (см. п.1) в течение установленного срока службы (п. 4.4.1 [43]) | z_{12} |
| 13 | Система должна удовлетворять требованиям к отказам и их обнаружению в соответствии с п.4.4.2 [43] | z_{13} |
| 14 | Если концепцией построения программно-аппаратных средств перегонных систем допускается накопление отказов, которые не обнаруживаются в процессе эксплуатации, то вероятность возникновения опасного отказа по причине их накопления за период эксплуатации не должна превышать заданной вероятности опасного отказа (п.4.4.3 [43]) | z_{14} |
| 15 | Программно-аппаратные средства перегонных систем должны обеспечивать восстановление работоспособного состояния из состояния защитного отказа только с участием эксплуатационного персонала (п.4.4.4 [43]) | z_{15} |
| 16 | Программные средства, применяемые в перегонных системах должны удовлетворять требованиям п.4.4.6 [43]. | z_{16} |

Таблица П.4.2 – Перечень контролируемых показателей и методов контроля для новых и находящихся в эксплуатации систем ЖАТ на перегоне

| Система ЖАТ | Перечень контролируемых показателей | Метод контроля |
|-----------------|---|--|
| 1 | 2 | 3 |
| Новая | $z_1, z_2, z_8 - z_{11}$ | Экспертиза технического задания на систему в части функциональных требований и требований безопасности |
| | $z_3, z_4, z_8 - z_{11}$ | Экспертиза алгоритмического обеспечения системы |
| | $z_5 - z_7, z_{13}, z_{14}$ | Экспертиза концепции обеспечения безопасности системы |
| | $z_5 - z_7$ | Экспертиза проектной оценки безопасности системы |
| | $z_{12} - z_{16}$ | Экспертиза аппаратных и программных средств системы на соответствие положений концепции безопасности |
| | $z_5 - z_{16}$ | Экспертиза технических решений |
| | $z_1 - z_2, z_3, z_4, z_{16}$ | Испытания технологического программного обеспечения |
| Эксплуатируемая | $z_{12} - z_{15}$ | Испытания программно-аппаратных средств |
| | $z_1 - z_2, z_3, z_4$ | Экспертиза документа «Доказательство безопасности» |
| | $z_5 - z_7, z_8 - z_{11}$ | Экспертиза эксплуатационной документации |
| | $z_1 - z_2, z_3, z_4, z_{10}, z_{13}, z_{15}$ | Проведение автономных испытаний системы |
| | z_3, z_4 | Проведение приемочных испытаний |
| | $z_1 - z_2, z_3, z_5 - z_{16}$ | Экспертиза проекта |

Продолжение таблицы П.4.2

| 1 | 2 | 3 |
|-----------------|--------------------------|---|
| Эксплуатируемая | $z_3, z_4, z_8 - z_{11}$ | <p>Сведения о нарушениях при выполнении функций.</p> <p>Сбор, обработка и анализ данных об отказах и сбоях, имевших место в процессе эксплуатации. Определение фактических значений количественных показателей безопасности и данных, накопленных в процессе эксплуатации, а также оценка соответствия этих показателей заданным значениям.</p> |

Таблица П.4.3 – Обязательные функциональные требования, предъявляемые к системам ЖАТ на станциях

| № п/п | Требование | Показатель |
|-------|--|------------|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Станционная система должна осуществлять управление станционными объектами с соблюдением принципа единоначалия, с уровнями иерархической системы управления перевозочным процессом, лицами, перечисленными в п.4.1.1 [44] | z_1 |
| 2 | Изменение района управления должно осуществляться в соответствии с п.4.1.2 [44] | z_2 |
| 3 | Независимо от используемого режима управления устройства станционной системы должны обеспечивать выполнение функциональных требований п.4.1.3 [44]. | z_3 |
| 4 | На станциях стыкования станционной системой должны дополнительно обеспечиваться функции, перечисленные в п. 4.1.4 [44]. | z_4 |
| 5 | Для управления централизованными стрелками станционная система должна обеспечивать выполнение функциональных требований, перечисленных в п. 4.1.5 [44]. | z_5 |
| 6 | Для управления железнодорожными светофорами станционная система должна обеспечивать выполнение функциональных требований, перечисленных в п. 4.1.6 [44]. | z_6 |
| 7 | Для управления стационарными тормозными упорами станционная система должна обеспечивать выполнение функциональных требований, перечисленных в п. 4.1.7 [44]. | z_7 |
| 8 | 4.2.1 Станционная система должна выполнять функции управления станционными объектами в двух режимах — основном и вспомогательном (п.4.2.1 [44]) | z_8 |
| 9 | Система должна удовлетворять функциональным требованиям к основному режиму управления в соответствии с п. 4.2.2 [44]. | z_9 |

Продолжение таблицы П.4.3

| 1 | 2 | 3 |
|----|--|----------|
| 10 | Система должна удовлетворять функциональным требованиям к вспомогательному режиму управления в соответствии с п. 4.2.3[44]. | z_{10} |
| 11 | Реализация функции «Установка поездного маршрута с замыканием секций маршрута и включением разрешающего показания на железнодорожном светофоре» должна соответствовать п.4.3.1 [44]. | z_{11} |
| 12 | Реализация функции «Установка маневрового маршрута с включением разрешающего показания на железнодорожном светофоре» должна соответствовать п.4.3.2 [44] | z_{12} |
| 13 | Реализация функции «Отмена установленного поездного или маневрового маршрута» должна соответствовать п.4.3.3 [44]. | z_{13} |
| 14 | Реализация функции «Повторное включение разрешающего сигнального показания на железнодорожном светофоре» должна соответствовать п.4.3.4 [44] | z_{14} |
| 15 | Реализация функции «Посекционное размыкание маршрута» должна соответствовать п.4.3.5 [44]. | z_{15} |
| 16 | Реализация функции «Маршрутное размыкание секций» должна соответствовать п.4.3.6 [44] | z_{16} |
| 17 | Реализация функции «Перевод стрелки» должна соответствовать п.4.3.7 [44] | z_{17} |
| 18 | Реализация функции «Подача извещения на переезды, пешеходные дорожки и устройства оповещения монтеров пути о приближении железнодорожного поезда» должна соответствовать п.4.3.8 [44]. | z_{18} |
| 19 | Реализация функции «Передача станционных путей, вытяжных путей и железнодорожных стрелок с центрального на местное управление» должна соответствовать п.4.3.9 [44] | z_{19} |

Продолжение таблицы П.4.3

| 1 | 2 | 3 |
|----|--|----------|
| 20 | Реализация функции «Возврат станционных путей, вытяжных путей и железнодорожных стрелок на центральное управление» должна соответствовать п.4.3.10 [44] | z_{20} |
| 21 | Реализация функции «Управление железнодорожными стрелками и маневровыми светофорами из района местного управления» должна соответствовать п.4.3.11 [44] | z_{21} |
| 22 | Реализация функции «Ограждение приемо-отправочных путей» должна соответствовать п.4.3.12 [44] | z_{22} |
| 23 | Реализация функции «Управление стационарными тормозными упорами» должна соответствовать п.4.3.13 [44] | z_{23} |
| 24 | Реализация функции «Управление кодированием рельсовых цепей маршрутов приема, передачи и отправления» должна соответствовать п.4.3.14 [44] | z_{24} |
| 25 | Реализация функции «Увязка с другими системами железнодорожной автоматики и телемеханики» должна соответствовать п.4.3.15 [44] | z_{25} |
| 26 | Реализация функции «Смена направления движения по пути перегона» должна соответствовать п.4.3.16 [44] | z_{26} |
| 27 | Реализация функции «Установка автодействия светофора поездного маршрута» должна соответствовать п.4.3.17 [44] | z_{27} |
| 28 | Реализация функции «Перекрытие светофора» должна соответствовать п.4.3.18 [44] | z_{28} |
| 29 | Реализация функции «Установка маршрута без включения разрешающего сигнального показания светофора» должна соответствовать п.4.4.1 [44] | z_{29} |
| 30 | Реализация функции «Установка поездного маршрута приема и передачи без включения разрешающего сигнального показания светофора» должна соответствовать п.4.4.2 [44] | z_{30} |

Продолжение таблицы П.4.3

| 1 | 2 | 3 |
|----|---|-----------------|
| 31 | Реализация функции «Установка поездного маршрута отправления без включения разрешающего сигнального показания светофора» должна соответствовать п.4.4.3 [44] | z ₃₁ |
| 32 | Реализация функции «Установка маневрового маршрута без включения разрешающего сигнального показания светофора» должна соответствовать п.4.4.4 [44] | z ₃₂ |
| 33 | Реализация функции «Отмена маршрута, установленного без включения разрешающего сигнального показания светофора» должна соответствовать п.4.4.5 [44] | z ₃₃ |
| 34 | Реализация функции «Блокировка разрешающего сигнального показания светофора» должна соответствовать п.4.4.6 [44] | z ₃₄ |
| 35 | Реализация функции «Искусственное размыкание секций маршрута» должна соответствовать п.4.4.7 [44] | z ₃₅ |
| 36 | Реализация функции «Блокировка секции маршрута» должна соответствовать п.4.4.8 [44] | z ₃₆ |
| 37 | Реализация функции «Индивидуальный перевод стрелки без контроля состояния стрелочно-путевой секции» должна соответствовать п.4.4.9 [44] | z ₃₇ |
| 38 | Реализация функции «Блокировка железнодорожной стрелки в заданном положении» должна соответствовать п.4.4.10 [44] | z ₃₈ |
| 39 | Реализация функции «Блокировка смены направления движения по пути перегона» должна соответствовать п.4.4.11 [44] | z ₃₉ |
| 40 | Реализация функции «Вспомогательная смена направления движения по пути перегона» должна соответствовать п.4.4.12 [44] | z ₄₀ |
| 41 | Реализация функции «Аварийный возврат станционных путей, вытяжных путей и железнодорожных стрелок на центральное управление» должна соответствовать п.4.4.13 [44] | z ₄₁ |

Продолжение таблицы П.4.3

| 1 | 2 | 3 |
|----|--|-----------------|
| 42 | Реализация функции «Включение пригласительного сигнала светофора» должна соответствовать п.4.4.14 [44] | z ₄₂ |
| 43 | Организация управления и контроля системами железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях должна удовлетворять требованиям п. 4.5.1 [44] | z ₄₃ |
| 44 | Органы управления и контроля систем железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях должны удовлетворять требованиям п. 4.5.2 [44] | z ₄₄ |
| 45 | Информационное обеспечение систем железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях должно удовлетворять требованиям п. 4.5.3 [44] | z ₄₅ |
| 46 | Конструкция аппаратных средств станционных систем, предназначенных для размещения около железнодорожных путей (напольное оборудование железнодорожной автоматики и телемеханики) должна отвечать требованиям габарита подвижного состава и габарита приближения строений (п. 4.6.1 [44]) | z ₄₆ |
| 47 | Технические средства станционных систем должны выполнять свои функции во всех предусмотренных при их разработке и (или) проектировании условиях и режимах, не создавая при этом препятствий для функционирования как других технических средств железнодорожной автоматики и телемеханики, так и остальных объектов инфраструктуры железнодорожной линии (п. 4.6.2 [44]) | z ₄₇ |
| 48 | Параметры быстродействия станционных систем должны обеспечивать выполнение всех предусмотренных функций в заданном диапазоне скоростей и характеристик подвижных составов (п. 4.6.3 [44]) | z ₄₈ |

Продолжение таблицы П.4.3

| 1 | 2 | 3 |
|----|---|-----------------|
| 49 | В соответствии с проектом по оборудованию участка железнодорожной линии технические средства станционных систем должны быть функционально, информационно и технически совместимыми с системами, перечисленными в п.4.6.4 [44]. | Z ₄₉ |
| 50 | Технические средства станционной системы должны обеспечивать безопасный интерфейс с другими системами железнодорожной автоматики и телемеханики, действующими на данном участке железнодорожной линии, или иметь возможность интегрировать функции этих систем (п.4.6.5 [44]) | Z ₅₀ |
| 51 | Аппаратно-программные средства станционных систем должны быть разработаны, спроектированы и изготовлены таким образом, чтобы во всех предусмотренных проектом условиях и режимах работы при соблюдении всех требований, установленных в эксплуатационной документации, обеспечивалась реализация всех функций безопасности движения поездов (см. п.8-10 таблицы) в течение установленного срока службы (п.4.7.1 [44]) | Z ₅₁ |
| 52 | Система должна удовлетворять требованиям к отказам и их обнаружению в соответствии с п.4.7.2 [44] | Z ₅₂ |
| 53 | Если концепцией построения аппаратно-программных средств станционных систем допускается накопление отказов, которые не обнаруживаются в процессе эксплуатации, то вероятность возникновения опасного отказа по причине их накопления за период эксплуатации не должна превышать заданной вероятности опасного отказа (п.4.7.3 [44]) | Z ₅₃ |

Продолжение таблицы П.4.3

| 1 | 2 | 3 |
|----|---|----------|
| 54 | Аппаратно-программные средства станционных систем должны обеспечивать восстановление работоспособного состояния из состояния защитного отказа только с участием эксплуатационного персонала (п.4.7.4 [44]). | z_{54} |
| 55 | Программные средства, применяемые в станционных системах, должны обеспечивать выполнение требований п.4.7.6 [44]. | z_{55} |

Таблица П.4.4 – Перечень контролируемых показателей и методов контроля для новых и находящихся в эксплуатации систем ЖАТ на станции

| Система ЖАТ | Перечень контролируемых показателей | Метод контроля |
|-------------|-------------------------------------|--|
| Новая | $z_1 - z_{42}, z_{46} - z_{50}$ | Экспертиза технического задания на станционную систему в части функциональных требований и требований безопасности |
| | $z_1 - z_{42}, z_{46} - z_{50}$ | Экспертиза алгоритмического обеспечения станционной системы |
| | z_{43}, z_{52}, z_{53} | Экспертиза концепции обеспечения безопасности станционной системы |
| | z_{45} | Экспертиза проектной оценки безопасности системы |
| | $z_{51} - z_{55}$ | Экспертиза аппаратных и программных средств системы на соответствие положений концепции безопасности |
| | $z_{44}, z_{46} - z_{55}$ | Экспертиза технических решений |
| | $z_1 - z_{42}, z_{55}$ | Испытания технологического программного обеспечения |
| | $z_{51} - z_{54}$ | Испытания аппаратно-программных средств |

Продолжение таблицы П.4.4

| Система ЖАТ | Перечень контролируемых показателей | Метод контроля |
|-----------------|--|--|
| Новая | $z_1 - z_{42}, z_{46} - z_{50}$ | Экспертиза документа «Доказательство безопасности» |
| | $z_{45}, z_{46} - z_{50}$ | Экспертиза эксплуатационной документации |
| | $z_1 - z_{42}, z_{49}, z_{52}, z_{54}$ | Проведение автономных испытаний системы |
| | $z_1 - z_{42}$ | Проведение приемочных испытаний системы |
| | $z_1 - z_{55}$ | Экспертиза проекта |
| Эксплуатируемая | $z_1 - z_{42}, z_{46} - z_{50}$ | Сведения о нарушениях при выполнении функций. Сбор, обработка и анализ данных об отказах и сбоях, имевших место в процессе эксплуатации. Определение фактических значений количественных показателей безопасности и данных, накопленных в процессе эксплуатации, а также оценка соответствия этих показателей заданным значениям. |

Таблица П.4.5 – Таблица распределения основных и дополнительных качественных показателей, используемых при оценке функционального ресурса систем ЖАТ на станции и перегоне

| № | Функциональные требования | Система ЖАТ | Класс 1, специализация: | Класс 1, специализация П | Класс 1, специализация О | Класс 1, специализация: | Класс 2 | Класс 3 | Класс 4 | Класс 5 | Показатель |
|---|--|-------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------------|
| | | | Класс 1, специализация: | Класс 1, специализация П | Класс 1, специализация О | Класс 1, специализация: | Класс 2 | Класс 3 | Класс 4 | Класс 5 | |
| | | | | | | | | | | | 12 |
| | На локомотив должна передаваться информация о количестве свободных впередилежащих блок-участков, включая участки пути между поездными светофорами на станциях по маршруту следования поезда. | на станции | О | О | Д | Д | Д | Д | Д | Д | z ₁₀ |
| | Возможность удаленного управления объектами, возможность передачи управления светофорами главных путей на пульт (АРМ) ДСП соседних станций или АРМ ДНЦ. | на станции | Д | Д | Д | Д | Д | Д | Д | Д | z ₁₀ |
| | Оборудование маневровых районов устройствами МАЛС, их увязка с системами электрической централизации (МПЦ, РПЦ, ЭЦ) | на станции | Д | Д | Д | Д | Д | Д | Д | Д | z ₁₀ |
| | Оборудование всех путей станции устройствами локомотивной сигнализации, исключение проезда запрещающих показаний светофоров | на станции | О | О | О | О | Д | Д | Д | Д | z ₁₀ |

Продолжение таблицы П.4.5

| | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|------------------|
| | | | | | | | | | | | 12 |
| | Обеспечение функционального резервирования элементов систем ЖАТ | на станции/ на перегоне | Д | Д | Д | Д | Д | Д | Д | Д | z ₁₁₀ |
| | Обеспечение дублирования каналов передачи данных на локомотив | на станции/ на перегоне | О | О | Д | Д | Д | Д | Д | Д | z ₁₁₁ |
| | Применение устройств контроля технического состояния и диагностики устройств и систем ЖАТ, обеспечивающих сбор, обработку и передача на соответствующие АРМ данных о состоянии устройств электрической централизации и автоматической блокировки | на станции/ на перегоне | О | О | О | О | О | Д | Д | Д | z ₁₁₂ |
| | Оборудование системами контроля участков пути методом счета осей подвижного состава с организацией блок – постов (при полуавтоматической автоблокировке) | на станции/ на перегоне | О | О | О | О | О | О | Д | Д | z ₁₁₃ |

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Акты о практическом использовании результатов диссертационной работы

АКТ

о практическом применении результатов диссертационной работы
Болотского Дмитрия Николаевича
«Методы оценки надежности и рисков производственного процесса
эксплуатации объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта»

Результаты, полученные в диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата технических наук Болотским Дмитрием Николаевичем, нашли практическое применение при разработке и эксплуатации технических средств интервального регулирования движения поездов, при реализации проекта модернизации железнодорожного участка Хойт – Замын Ууд Улан-Баторской железной дороги.

Математические модели, предложенные Болотским Д.Н. для оценки количественных показателей надежности технических средств железнодорожной автоматики, использованы при разработке технических требований к различным объектам инфраструктуры железнодорожного транспорта в соответствии с пунктом 3б поручения президента ОАО «РЖД» О.В. Белозерова «Об обеспечении перехода на систему нормирования показателей надежности работы технических средств в ОАО «РЖД» от 19 декабря 2017 года № ПП-170.

В соответствии с основными положениями диссертации Болотского Д.Н. внедрены в производственный процесс разработки технических и функциональных требований к системе интервального регулирования движения поездов рабочие методики оценки технических рисков, а также рисков прямых и косвенных экономических потерь.

Адекватность математических методов и моделей, представленных в диссертации Болотского Д.Н., подтверждается положительными результатами их практической апробации.

Зам. Гендиректора
по Развитию бизнеса,
к.т.н.



Е.В. Павлов

АКТ

стическом использовании результатов диссертационной работы

Болотского Дмитрия Николаевича

«Методы оценки надежности и рисков производственного процесса эксплуатации объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта»

Основные результаты диссертационной работы Болотского Д.Н. нашли практическое применение при разработке, апробации и реализации методологии управления надежностью, ресурсами, рисками и анализа надежности (УРРАН) в хозяйстве автоматики и телемеханики ОАО «Российские железные дороги».

Методика оценки качества систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) с учетом их функционального ресурса, а также методы статистической оценки влияния отказов технических средств ЖАТ 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).

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»: утв. 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.).

Адекватность математических методов и моделей, представленных в диссертации Болотского Д.И. подтверждается положительными результатами их практической апробации на сети железных дорог.

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.

Главный инженер Проектно-конструкторского бюро
по инфраструктуре - филиала ОАО «РЖД», к.т.н.



В.М.Кайнов