

На правах рукописи

Брусянин Дмитрий Алексеевич

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
В СТРУКТУРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯХ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

05.02.22 – Организация производства (транспорт)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении  
высшего профессионального образования «Уральский государственный  
университет путей сообщения» (УрГУПС)

**Научный руководитель** — доктор технических наук  
Сай Василий Михайлович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук  
Розенберг Ефим Наумович;  
кандидат технических наук  
Липунова Светлана Анатольевна

**Ведущая организация:** Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет путей  
сообщения» (МИИТ)

Защита состоится 13 октября 2006 г. в 14.00 в ауд. 283 на заседании Регионального  
диссертационного совета Км 218.013.01 при Уральском государственном универ-  
ситете путей сообщения (УрГУПС) по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Кол-  
могорова, 66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.  
Автореферат разослан « 6 » сентября 2006 года.

Отзыв на автореферат (в двух экземплярах), заверенный печатью организации,  
просим отправлять в адрес Ученого совета Уральского государственного универ-  
ситета путей сообщения.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Ялышев Ю.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Перевозочный процесс должен быть безопасным, так как он связан с высокой ответственностью за сохранность жизни людей, перевозимых грузов и технологического оборудования, материальных ценностей и окружающей среды.

Перевод процесса движения в опасное состояние возможен из-за опасных отказов технических устройств, опасных ошибок и действий технического персонала, а также отказов технических средств из-за низкой технологической дисциплины и недостаточного профессионального уровня работников. По мнению В.М. Лисенкова, снижение количества опасных ошибок технического персонала в хозяйствах пути, вагонном и локомотивном в идеальном случае позволит снизить число крушений и аварий более чем на 70 %. Особое место среди опасных действий и ошибок технического персонала занимают отклонения от требований технологических нормативов при производстве работ, так как они выполняются в условиях движения поездов.

Зарождение и проявление браков в большинстве случаев происходит в структурных подразделениях, во-первых, из-за низкой производственной культуры, вызванной недоукомплектованностью и текучестью технического персонала, и не всегда верно обоснованной организацией работ как на текущем содержании пути, так и в смежных хозяйствах. Во-вторых, из-за состояния производственных фондов (износ, старение). В-третьих, сегодня отсутствует методика, позволяющая прогнозировать технологические браки (вероятность их появления), вызванных ошибками технического персонала и отказами устройств контроля, и, в итоге, предотвращать их.

Таким образом, актуальность поставленной проблемы заключается в необходимости разработки методики, учитывающей перечисленные причины браков, с помощью которой можно количественно оценить уровень безопасности при производстве работ (функциональной безопасности), обеспечиваемого техническими устройствами контроля и работниками, выполняющими контроль, с одной стороны, и персоналом по эксплуатации, с другой. Такая методика позволит определять существующий уровень функциональной безопасности и его прогнозные значения с учетом принятых управленческих решений, направленных на повышение безопасности движения поездов, в структурных подразделениях железнодорожного транспорта.

Количественная оценка уровня функциональной безопасности будет способствовать повышению безопасности движения поездов вследствие предотвращения технологических браков при производстве работ.

**Целью диссертационной работы** является разработка методики определения функциональной безопасности в структурных подразделениях железнодорожного транспорта.

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

1. Разработать концептуальную структуру системы безопасности движения поездов ОАО «Российские железные дороги».

2. Разработать показатели функциональной безопасности с учетом двух дестабилизирующих факторов: опасные отказы устройств контроля, ошибки операторов, осуществляющих контроль, и технического персонала при производстве работ.

3. Разработать методику вычисления показателей функциональной безопасности в путевом хозяйстве, позволяющую определять их существующие и прогнозные значения с целью выработки управленческих решений, направленных на повышение безопасности движения поездов.

4. Обосновать пороговые значения уровня функциональной безопасности на примере текущего содержания пути и его диагностировании.

**Объектом исследования** в настоящей работе является система управления безопасностью движения ОАО «Российские железные дороги».

**Предметом исследования** является организация производства работ в путевом хозяйстве.

**Методы исследования.** В ходе исследования применялись методы научной абстракции, системного анализа, методы системного подхода, методы дискретного анализа сетей, методы теории вероятностей и математической статистики, теории графов, логико-аналитический метод.

В своей работе автор опирался на труды ученых, непосредственно занимающихся вопросами безопасности движения поездов: В.М. Абрамова, В.И. Апатцева, Л.В. Беликова, Э.В. Воробьева, А.К. Гурвича, Г.В. Дружинина, В.М. Ермакова, О.П. Ершкова, Ю.Л. Когана, В.Б. Каменского, А.Е. Красковского, В.М. Лисенкова, В.С. Лысюка, А.А. Маркова, В.О. Певзнера, Е.Н. Розенберга, А.А. Цернанта, Д.В. Шалягина, Г.М. Шахунянца, В.Я. Шульги.

Автор также использовал труды ученых в области организации и управления производством: В.Н. Буркова, В.Г. Галабурды, Д.А. Новикова, В.М. Сай.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Предложена концептуальная структура системы безопасности движения поездов на железнодорожном транспорте.

2. Разработаны показатели функциональной безопасности как части системы безопасности движения поездов в структурных подразделениях железнодорожного транспорта.

3. Впервые разработана методика вычисления показателей функциональной безопасности в путевом хозяйстве, позволяющая определять ее количественный уровень.

4. На основании выполненных численных экспериментов впервые предложены пороговые значения уровня функциональной безопасности в дистанциях пути.

**Практическая значимость исследования.** Основные положения работы использовались при оценке уровня функциональной безопасности в дистанциях пути Свердловской и Южно-Уральской железных дорог. Разработанная методика позволяет на основании принятых управленческих решений определять существующий уровень функциональной безопасности в хозяйстве пути и прогнозный.

Предложенная методика является объективным инструментом определения количественной оценки уровня функциональной безопасности руководителями путевого хозяйства и ревизорского аппарата железных дорог ОАО «РЖД».

**На защиту выносятся:**

1. Концептуальная структура системы безопасности движения поездов в ОАО «Российские железные дороги».

2. Показатели функциональной безопасности в структурных подразделениях железнодорожного транспорта.

3. Методика вычисления показателей функциональной безопасности в структурных подразделениях на примере путевого хозяйства.

4. Результаты численных экспериментов определения уровня функциональной безопасности при организации производства путевых работ.

**Реализация результатов работы.** Научные положения исследований, выводы и рекомендации использованы для планирования и организации производства работ в дистанциях пути Свердловской и Южно-Уральской железных дорог.

Теоретические положения используются в учебном процессе при изучении курсов «Организация путевого хозяйства» и «Организация управления на железнодорожном транспорте».

Теоретическая часть диссертации написана по результатам выполнения госбюджетной темы «ПС-109», утвержденной Ученым советом университета (протокол № 7 от 22. 04. 2004 г.), «Программы фундаментальных и поисковых научно-исследовательских работ МПС России».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации доложены и обсуждены на конференциях, семинарах, совещаниях: научн.-практ. конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта», УрГУПС, 2003; научн.-практ. конференции «Корпоративное управление на железнодорожном транспорте», МГУПС, 2004; научн.-практ. конференции «Безопасность движения поездов», МГУПС, 2004, 2005; научн.-практ. конференции «Молодые ученые – транспорту», УрГУПС, 2005.

Результаты диссертационных исследований были доложены на научных семинарах «Теория управления организационными системами» Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН и кафедры «Путь и путевое хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения.

Основные положения диссертационной работы и научные результаты доложены на заседании кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения.

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в 9-ти печатных работах (3 препринта и 6 статей), а также изложены в отчетах о научно-исследовательских работах УрГУПС. Статьи опубликованы в журнале «Транспорт Урала», в сборниках научных трудов МГУПС, УрГУПС.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и 10 приложений. Содержание изложено на 143 машинописных страницах, в том числе 23 таблицы и 40 рисунков. Библиографический список содержит 110 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности научной проблемы, формулирование цели и задач исследования, изложение основных результатов работы.

**В первой главе** выполнен системный анализ проблемы организации безопасности движения в ОАО «РЖД». Рассмотрены основные научные направления российских и зарубежных ученых, работающих в исследуемой области.

В настоящее время сформировались единые подходы повышения уровня безопасности движения поездов, которые условно объединены профессором В.М. Лисенковым в четыре группы.

К первой группе отнесены методы, предотвращающие возникновение опасных ошибок технического персонала и отказов технических устройств на этапе подготовки (персонал) или проектирования (технические устройства).

Вторая группа – методы парирования опасных ошибок и отказов. К ним относятся системы: автоблокировки, дефектоскопии рельсов, контроля геометрических параметров рельсовой колеи и др. Функционирование этих систем направлено на выявление опасных ошибок персонала или отказов технических устройств.

Третья группа методов связана со снижением воздействия возникающих поражающих факторов (механические воздействия элементов подвижного состава и др.) на пассажиров, технический персонал и грузы посредством предотвращения или снижения этого воздействия.

К методам четвертой группы, позволяющим защитить перевозимые грузы от воздействия поражающих факторов, относятся, например, методы защиты днищ котлов цистерн.

В результате сформировались основные направления повышения уровня безопасности движения поездов: совершенствование нормативно-правовой базы; организационно-распорядительного воздействия; технологической, технической и кадровой составляющих.

Системный подход является основополагающим направлением повышения безопасности движения поездов. Так, в частности, профессор В.М. Лисенков сформулировал основные требования к системе управления безопасностью железнодорожных перевозок. Система безопасности движения как составляющая интегрированной системы управления качеством рассмотрена Ю.М. Черкашиным

Свой подход к формированию многоуровневой системы безопасности движения поездов предложил Е.Н. Розенберг. Система управления и обеспечения безопасности движения поездов включает в себя три уровня аппаратно-программных комплексов систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.

В области текущего содержания пути профессором В.Я. Шульгой предложена схема комплексной системы обеспечения безопасности движения в путевом хозяйстве.

Совершенствование системы безопасности движения поездов все исследователи связывают с поиском интегральных показателей, характеризующих ее уровень с учетом множества факторов. Такие интегральные показатели позволяют комплексно оценить влияние различных факторов на функционирование устройств обеспечения безопасности движения поездов. Так, например, Е.Н. Розенберг для установления требований по защищенности систем железнодорожной автоматики и телемеханики от опасных отказов и оценки достигнутых результатов разработал систему комплексных показателей функциональной и информационной безопасности. Один из показателей – коэффициент безопасности, основанный на прогнозе пребывания системы в опасных состояниях из-за отказов технических устройств. Оценка безопасности движения применительно к текущему содержанию пути, основанная на прогнозировании уровня аварийности для случаев изломов рельсов и выбросов пути, предложена в работе С.А. Липуновой.

Необходимо отметить, что в рассмотренных работах безопасность движения исследуется в техническом, организационном и экономическом аспектах; но безопасность движения во многом зависит и от человеческого фактора.

В результате анализа различных подходов формирования системы безопасности предлагается, во-первых, для дальнейших исследований представить такую систему как совокупность нормативно-правовой базы, организационно-распорядительного воздействия, организационно-технологических мероприятий, техни-

ческих устройств и персонала, обеспечивающего безопасность движения поездов. Во-вторых, выделить функциональную безопасность как составную часть системы безопасности движения поездов и разработать ее количественные критерии оценки.

На основании проведенного анализа организации управления безопасностью движения сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** предложена концептуальная структура системы безопасности движения поездов. Рассмотрены теоретические основы обеспечения функциональной безопасности, приведены и обоснованы базовые определения. Разработана обобщенные показатели функциональной безопасности в структурных подразделениях ОАО «РЖД».

Систему безопасности движения поездов можно представить как совокупность подсистем, расположенных вокруг некоторого ядра, интегратора этих подсистем, состоящего из двух элементов – «инфраструктура» и «поезд», которые реализуют перевозочный процесс. Элемент «инфраструктура» включает железнодорожный путь со всеми устройствами и контактную сеть. Подвижной состав со всеми устройствами, систему «человек – машина», напольные локомотивные устройства объединим в элемент «поезд». Далее ядро системы безопасности будем называть «колесо – рельс».

Безопасное функционирование ядра обеспечивается рядом подсистем. Нормативно-правовая подсистема является основополагающей. Она включает в себя федеральные законы, регламентирующие деятельность железнодорожного транспорта, правила технической эксплуатации железных дорог, инструкции по видам деятельности, уставы транспортных предприятий и другие нормативно-правовые акты.

Организационно-распорядительная подсистема включает в себя два элемента: организационно-распорядительное воздействие аппарата управления, организующего перевозочный процесс (реализация управленческих функций планирования, организации, мотивации, контроля) и осуществляющего функцию обеспечения и управления безопасностью движения; организационно-распорядительное воздействие ревизорского аппарата, основной деятельностью которого является контроль за безопасностью движения поездов.

В состав организационно-технологической подсистемы входят технологические процессы (технология вождения поездов, технология подготовки вагонов, технология ремонта пути и т.д.) и организация движения поездов.

Техническая подсистема включает в себя технические устройства и технический персонал. Ее функционирование направлено на организацию, мониторинг и контроль состояния элементов инфраструктуры.



Рассмотренные подсистемы структурированы с учетом управленческого воздействия элементов системы друг на друга (рис. 1; связи 1–2, 2–3 и др.) и, в итоге, на ядро «колесо – рельс» (связи 1–5, 2–5 и др.).

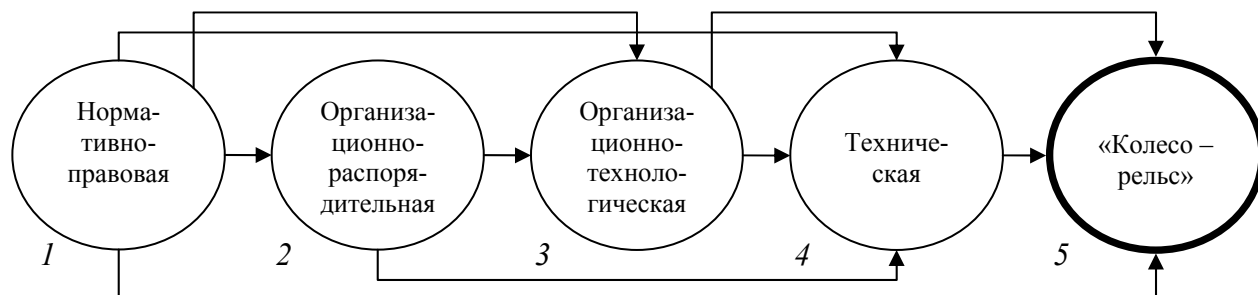


Рис. 1. Организационная цепочка влияния элементов системы безопасности на ядро

Переход ядра в неработоспособное состояние возможен из-за опасных отказов элементов технической подсистемы организационной цепочки, то есть в данном случае речь идет о безопасности функционирования этих элементов. Для учета этого влияния введем термин «функциональная безопасность».

Термин «функциональная безопасность» широко используется при оценке безопасности систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Применительно к технической подсистеме под функциональной безопасностью будем понимать свойство ее элементов не иметь опасных отказов или не совершать опасных ошибок в процессе эксплуатации, в результате которых ядро будет находиться в неработоспособном состоянии. Функциональная безопасность системы контроля – свойство этой системы не иметь за расчетное время опасных отказов в процессе контроля элементов ядра, в результате которых ядро будет находиться в неработоспособном состоянии. Функциональная безопасность технического персонала – свойство персонала не совершать опасных ошибок или действий при производстве работ, то есть выполнять работы в соответствии с требованиями технологических нормативов, тем самым не переводить ядро в неработоспособное состояние. Под неработоспособным состоянием ядра понимается состояние, при котором параметры его элементов не соответствуют требованиям технической документации.

Введем показатель функциональной безопасности элемента технической подсистемы  $K_m^{(f)}$ , под которым будем понимать вероятность того, что ядро не будет находиться в неработоспособном состоянии из-за опасных отказов (ошибок) элементов технической подсистемы. Здесь индексом « $f$ » обозначен номер функции, реализуемой элементом одной из подсистем, « $m$ » – номер исследуемого элемента ядра. Например, в путевом хозяйстве выделены функции контроля ( $f = 1$ ) и смены элементов пути ( $f = 2$ ). Исследуемые элементы – рельс ( $m = 1$ ); шпала ( $m = 2$ ) и т.д.

Тогда под показателем функциональной безопасности системы контроля  $K_m^{(1)}$  понимается вероятность того, что ядро не будет находиться в неработоспособном состоянии из-за пропуска устройством контроля или оператором дефектного элемента.

Показатель функциональной безопасности системы контроля дефектных элементов ядра при наличии одного дестабилизирующего фактора:

$$K_m^{(1)} = f(P_m, \lambda_m, \mu_m), \quad (1)$$

где  $P_m$  – вероятность того, что дефектный элемент ядра будет выявлен технической подсистемой;  $\lambda_m$  – интенсивности выхода дефектных элементов;  $\mu_m$  – интенсивность (частота) контроля.

Показатель функциональной безопасности системы контроля дефектных элементов ядра при наличии нескольких дестабилизирующих факторов определяется их прямым произведением:

$$K_m^{(1)} = \prod_{n=1}^{N_q} (K_m^{(1)})_n, \quad (2)$$

где  $q$  – индекс, соответствующий одному виду дестабилизирующего фактора;  $N_q$  – общее число опасных дестабилизирующих факторов, способных перевести ядро в неработоспособное состояние.

Второй случай брака – нарушение технологии работ при смене дефектного элемента. Это возможно при наличии опасных ошибок или действий технического персонала. Тогда показатель функциональной безопасности при смене дефектного элемента – это вероятность того, что ядро не будет находиться в неработоспособном состоянии при смене дефектного элемента из-за опасных ошибок или действий технического персонала  $K_m^{(2)}$ :

$$K_m^{(2)} = \frac{P_{\text{кон}} \mu_m}{Q_m \lambda_m + P_{\text{кон}} \mu_m}, \quad (3)$$

где  $Q_m$  – вероятность брака при производстве работ по смене  $m$ -го элемента ядра;  $\mu_m$  – интенсивность контроля бригады вышестоящим персоналом;  $P_{\text{кон}}$  – надежность персонала, контролирующего производство работ,  $P_{\text{кон}} = 0,90$ .

Для вычисления вероятности технологического брака  $Q_m$  введем показатель – коэффициент соответствия выполненного комплекса работ требованиям технологического процесса  $k$ :

$$k = \frac{T}{T^{(\text{норм})}}, \quad (4)$$

где  $T$  – затраты труда по реализованным технологическим операциям, выполненным бригадой к фиксированному времени (например, к окончанию «окна») в соответствии с технологическим процессом, чел.-мин;  $T^{(\text{норм})}$  – затраты труда по техно-

логическим операциям (по всему технологическому процессу), которые должны быть реализованы в установленное время.

Рассмотрим две группы факторов, влияющих на  $k$ :

1. Характеристика бригады (соответствие состава и разрядности бригады нормам и требованиям действующего технологического процесса);
2. Характеристика руководителя работ (наличие у руководителя знаний и опыта управленческой работы, его отношение к соблюдению требований технологического процесса, организаторские способности).

Факторы первой группы учитывают влияние несоответствия характеристик бригады требованиям технологии работ. Зависимость величины  $k$  от укомплектованности бригады по составу определена аналитическим способом для конкретного технологического процесса.

Следующей характеристикой бригады, влияющей на функциональную безопасность, является несоответствие ее разрядности нормативной:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^c r_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^c r_i^{(\text{норм})} n_i^{(\text{норм})}}, \quad (5)$$

где  $r_i$  – разряд работников с  $i$ -м номером;  $r_i^{(\text{норм})}$  – разряд работников в соответствии с технологическим процессом;  $n_i^{(\text{норм})}$  – нормативное количество человек с разрядом  $r$  с  $i$ -м номером;  $n_i$  – фактическое количество человек с соответствующим разрядом;  $c$  – количество разрядов.

Трудозатраты, которые могут быть реализованы при несоответствии разрядности бригады:  $T_d = T \cdot d$ .

Рассмотрим влияние руководителя работ, его способность повышать, демпфировать функциональную безопасность (вторая группа факторов). Под демпфированием понимается снижение элементом технической подсистемы нежелательного внешнего воздействия на функциональную безопасность за счет опыта организации работ и знаний. В дальнейших исследованиях будем придерживаться словосочетания «демпфирование функциональной безопасности элементом подсистемы» (например, руководителем работ).

Влияние руководителя работ на функциональную безопасность учтем с помощью коэффициентов демпфирования по составу  $\chi_{m,1}$  и разрядности  $\chi_{m,2}$ :

$$\chi_{m,1} = \left( 1 - \frac{s \cdot t^{(\text{норм})} n^2}{T \cdot n^{(\text{норм})}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $t^{(\text{норм})}$  – нормативное время выполнения работы;  $n$  – фактический состав бригады;  $n^{(\text{норм})}$  – нормативный состав бригады;  $T$  – затраты в соответствии с технологическим

процессом;  $s$  – параметр, характеризующий организационные способности руководителя работ (определяется на основе статистических данных).

Коэффициент демпфирования несоответствия среднего разряда бригады:

$$\chi_{m,2} = 1 + \frac{s}{d}. \quad (7)$$

Выделим пять категорий руководителей работ в зависимости от их влияния на функциональную безопасность  $v = 1 \dots 5$ . Низшая категория – первая (единица) – характеризует малоопытных и склонных к нарушению технологии руководителей; высшая – пятая (пятерка) – самых опытных, ответственных, обеспечивающих функциональную безопасность наилучшим образом.

Величина  $s$  определяется выражением

$$s(v) = z \cdot \exp\left(g\left(1 - \frac{1}{v}\right)\right), \quad (8)$$

где  $v$  – номер категории руководителя;  $z, g$  – параметры, определяемые на основании статистических данных для каждого руководителя категории  $v$ .

Коэффициент соответствия комплекса работ по смене дефектного элемента требованиям технологии для руководителя категории  $v$ :

$$k = \frac{T \cdot d \cdot (\chi_{m,1})_v \cdot (\chi_{m,2})_v}{T^{(\text{норм})}}. \quad (9)$$

Коэффициент соответствия  $k$  ( $0 < k \leq 1$ ) – величина случайная, учитывающая влияние человеческого фактора на функциональную безопасность.

Тогда вероятностное пространство складывается из различных производственных ситуаций вида  $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N)$ ,

где

$$\varepsilon_i = \begin{cases} 1, & \text{работа выполнена без технологического брака, } k = 1, \\ 0, & \text{работа выполнена с браком, } k \in (0, 1), \end{cases}$$

то есть элементарное событие – это выполнение бригадой работы по замене  $m$ -го дефектного элемента с браком и без него (выполнение или невыполнение бригадой комплекса работ в соответствии с требованиями технологического процесса).

В дискретном случае надежность технического персонала при производстве работ  $P_m$  представляет собой относительную частоту выполнения работы по замене этого элемента без технологического брака. Здесь под случаем технологического брака будем понимать нарушение технологии производства работ, в результате чего состояние ядро находится в неработоспособном состоянии. Общее выражение для вычисления вероятности брака для  $m$ -го элемента пути:

$$P_m = 1 - Q_m, \quad Q_m = \frac{N_{\text{бр}}}{N_{\text{общ}}}, \quad (10)$$

где  $N_{\text{бр}}$  – количество работ, выполненных без технологического брака;  $N_{\text{общ}}$  – общее количество выполненных работ по смене дефектных элементов.

Таким образом, предложенные показатели функциональной безопасности учитывают такие факторы, как надежность устройств контроля и технического персонала, состояние ядра, организационно-технологические мероприятия.

**Третья глава** посвящена разработке методики расчета показателей функциональной безопасности в путевом хозяйстве.

Рассмотрим показатель функциональной безопасности на примере дефектоскопии рельсов.

Надежность комплекса «дефектоскоп – оператор» обозначим  $P_j$ , где  $P_1$  – надежность первого устройства ( $j = 1$ ),  $P_2$  – второго ( $j = 2$ ).

Для определения  $K_1^{(1)}$  разработана графовая модель состояний пути при его контроле (рис. 2).

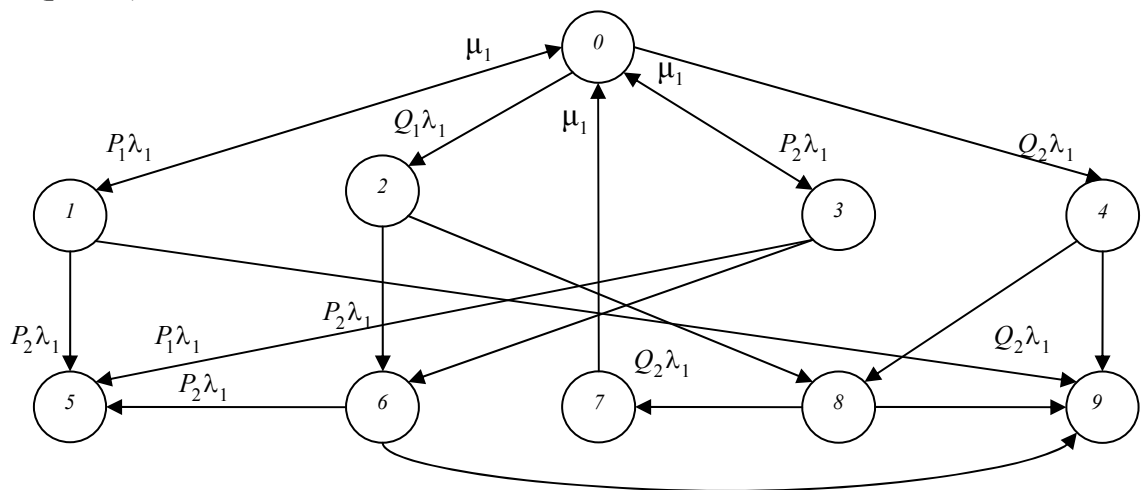


Рис. 2. Графовая модель состояний пути при его контроле

Чтобы не загромождать рисунок, связи 5–0, и 9–0 не показаны.

Состояния пути при контроле: 0 – начальное состояние пути; 1 – на участке имеются дефектные элементы, выявленные первым устройством, вероятность выявления  $P_1$  (поток, переводящий ядро из нулевого в первое состояние:  $P_1\lambda_1$ ); 2 – на участке имеются пропущенные первым устройством контроля дефектные элементы; вероятность пропуска:  $Q_1 = 1 - P_1$ . Поток, переводящий ядро из нулевого состояния во второе:  $Q_1\lambda_1$ ; 3 – на участке имеются дефектные элементы, выявленные вторым устройством, вероятность обнаружения:  $P_2$ ; 4 – на участке имеются пропущенные вторым устройством контроля дефектные элементы; вероятность пропуска:  $Q_2 = 1 - P_2$ ; 5 – на участке все элементы выявлены. В это состояние ядро переводят следующие потоки:  $P_2\lambda_1$ ,  $P_1\lambda_1$ ,  $P_2\lambda_1$ ; 6 – на участке имеются дефектные элементы, выявленные при контроле вторым устройством, – поток  $P_2\lambda_1$  и пропущенные при первом контроле, – поток  $Q_2\lambda_1$ ; 7 – на участке имеются дефектные элемен-

ты, пропущенные обоими устройствами контроля; 8 – на участке есть пропущенные дефектные элементы; 9 – на участке имеются дефектные элементы, пропущенные первым или вторым устройством контроля.

При  $t \rightarrow \infty$  система переходит в стационарный режим работы и вероятности нахождения системы в  $i$ -м состоянии удовлетворяют условию:  $p_i(t) = p_i$  и  $\frac{dp_i(t)}{dt} = 0$ , где  $i = 0 \dots 9$ . Тогда система уравнений, описывающая граф, имеет вид

$$\begin{aligned} &-(P_1\lambda_1 + Q_1\lambda_1 + P_2\lambda_1 + Q_2\lambda_1)p_0 + \mu_1 \cdot (p_1 + p_3 + p_5 + p_7 + p_9) = 0; \\ &-(P_2\lambda_1 + Q_2\lambda_1 + \mu_1)p_1 + P_1\lambda_1 \cdot p_0 = 0; \\ &-(P_2\lambda_1 + Q_2\lambda_1)p_2 + Q_1\lambda_1 \cdot p_0 = 0; \\ &-(P_1\lambda_1 + Q_1\lambda_1 + \mu_1)p_3 + P_2\lambda_1 \cdot p_0 = 0; \\ &-(P_1\lambda_1 + Q_1\lambda_1)p_4 + Q_2\lambda_1 \cdot p_0 = 0; \\ &-\mu_1 \cdot p_5 + P_2\lambda_1 \cdot p_1 + P_1\lambda_1 \cdot p_3 + P_2\lambda_1 \cdot p_6 = 0; \\ &-(P_2\lambda_1 + Q_2\lambda_1)p_6 + P_2\lambda_1 \cdot p_2 + Q_1\lambda_1 \cdot p_3 = 0; \\ &-\mu_1 \cdot p_7 + Q_2\lambda_1 \cdot p_8 = 0; \\ &-(Q_2\lambda_1 + P_2\lambda_1)p_8 + Q_2\lambda_1 \cdot p_2 + Q_1\lambda_1 \cdot p_4 = 0; \\ &-\mu_1 \cdot p_9 + Q_2\lambda_1 \cdot p_1 + P_1\lambda_1 \cdot p_4 + Q_2\lambda_1 \cdot p_6 + P_2\lambda_1 \cdot p_8 = 0; \\ &\sum_{i=0}^9 p_i = 1. \end{aligned}$$

Опасными являются состояния пути с индексами «7» и «9».

При помощи графовой модели составлена система алгебраических уравнений (для стационарного режима работы). Тогда показатель функциональной безопасности устройств контроля:

$$K_1^{(1)} = 1 - (p_7 + p_9). \quad (11)$$

Детализируем вероятность выявления остродефектного рельса. Для этого воспользуемся методикой, предложенной А.К. Гурвичем.

Эффективность дефектоскопии определяется вероятностью  $P_j$  точного и безошибочного выполнения оператором возложенных на него функций контроля в заданных условиях  $P_j^{(оп)}$  (надежность оператора). Характеристика  $P_j^{(оп)}$  надежности оператора относится к определенной среде, в которой выполняется контроль. Вероятность выявления дефектов в процессе контроля тоже определяется вероятностью  $P_j^{(а)}$  соответствия основных параметров дефектоскопа заданным для контроля данных объектов (надежность дефектоскопа).

Надежность оператора определена на основе статистических данных. Выделены пять категорий операторов. Низшая категория – первая (единица) – характеризует малоопытных работников, осуществляющих контроль рельсов с меньшей

эффективностью; высшая – пятая (пятерка) – самых опытных, ответственных, обеспечивающих максимальную выявляемость. Таким образом, каждой категории соответствует своя вероятность выявления дефектов.

Необходимо отметить, что вероятности  $P_j^{(оп)}$  и  $P_j^{(л)}$  можно рассматривать как взаимозависимые. Однако по принятой методике предлагается абстрагироваться от взаимной зависимости этих величин и принять их независимыми, так как в большинстве случаев квалификация и опыт оператора достаточны.

Вероятность обнаружения дефектов новыми средствами дефектоскопии определяется по зависимости, рассмотренной В.Б. Каменским.

В итоге показатель функциональной безопасности устройств дефектоскопии при наличии двух дестабилизирующих факторов:

$$K_1^{(1)} = \prod_{n=1}^2 (K_1^{(1)})_n, \quad (12)$$

где  $(K_1^{(1)})_1$  – вероятность того, что путь не будет находиться в неработоспособном состоянии за расчетное время из-за опасных ошибок операторов;  $(K_1^{(1)})_2$  – вероятность того, что путь не будет находиться в неработоспособном состоянии за расчетное время из-за отказов устройств контроля.

При вычислении показателя функциональной безопасности систем контроля шпального хозяйства и отступлений по ширине колеи надежность технического персонала по выявлению дефектных шпал и отступлений по ширине колеи определена на основе метода экспертных оценок.

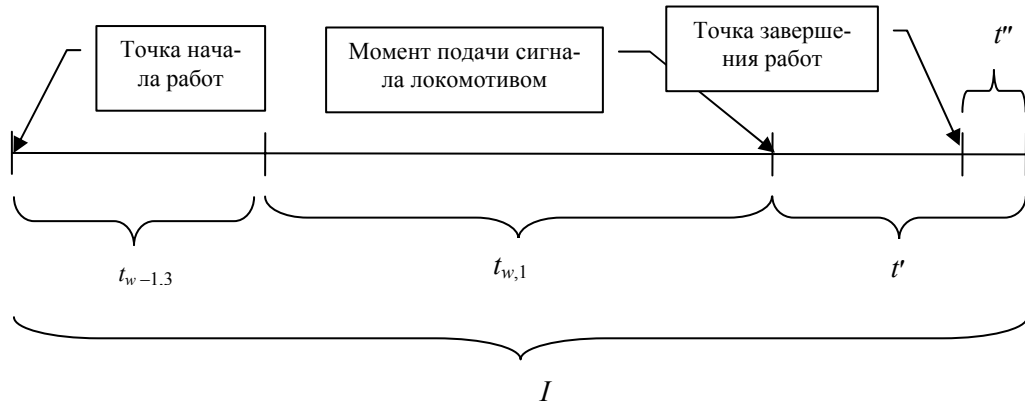
Далее рассмотрим методику вычисления показателя функциональной безопасности  $K_m^{(2)}$  по смене дефектного элемента с учетом ошибок персонала.

Для определения вероятности технологического брака при одиночной смене остродефектного рельса  $Q_1$  получена аналитическая зависимость коэффициента ответственности  $k$  от количества монтеров пути, выполняющих замену рельса, продолжительности окна, разрядности бригады, категории руководителя работ. Коэффициент демпфирования по составу и разрядности бригады вычислен на основе статистических данных по руководителям работ в дистанциях пути Свердловской и Южно-Уральской железных дорог.

Вероятность выполнения работ по одиночной смене дефектных шпал или разрядке кустов  $Q_2$  вычисляется следующим образом. В основном периоде смены дефектной шпалы выделяются три последовательных потока работ. Первый поток включает технологические операции, выполняемые до самой смены шпалы, – удаление балласта из шпального ящика, выдергивание костылей. Второй включает операции по сдвигу дефектной шпалы, подготовку постели под новую шпалу, ее надвижку. Третий – завершающие операции, к которым относятся засыпка шпаль-

ного ящика балластом, добивка костылей, оправка балластной призмы. Обозначим поток работ индексом  $i$ , где  $i = 1, 2, 3$ , а число сменяемых шпал – индексом  $w$ .

Представим время, которое имеется у бригады для смены шпал, в виде временного отрезка, разделенного на интервалы, соответствующие определенному потоку работы. Длина отрезка соразмерна величине межпоездного интервала  $I$ . Нулевая точка отрезка соответствует началу работ, конечная – моменту прихода поезда к месту производства работ. В силу специфики работ по смене шпал выполним расчет для одного звена. Разобьем весь отрезок на следующие интервалы:



где  $t_{w-1,3}$  – время, необходимое звену для завершения работ третьего потока  $w - 1$  шпалы;  $t_{w,1}$  – продолжительность первого потока работ по смене дефектной шпалы  $w$ ;  $t'$  – интервал, в течение которого поезд преодолевает расстояние от момента подачи сигнала до места производства работ;  $t''$  – время, в течение которого бригада не выполняет работы;  $I$  – межпоездной интервал.

Тогда:

$$t_{w-1,3} + t_{w,1} + t' = I. \quad (13)$$

Соблюдение условия (13) возможно при выполнении работ в соответствии с технологическим процессом – бригада успевает за фиксированный промежуток времени выполнить весь комплекс работ по подготовке железнодорожного пути согласно требованиям технической документации, в случае нарушения – нет.

Вероятность брака при регулировке ширины колеи  $Q_3$  определяется аналогично.

Таким образом, коэффициент соответствия комплекса выполненных работ в «окно» и между поездами требованиям технологического процесса с учетом коэффициента демпфирования для  $v$ -й категории руководителя:

$$k = \frac{\sum_{j=1}^u \sum_{i=1}^3 T_{i,j} \cdot (\chi_{3,1})_v \cdot (\chi_{3,2})_v}{T^{(\text{норм})}}, \quad (14)$$

где  $T_{i,j}$  – затраты труда по  $i$ -й реализованной операции  $j$ -м звеном.

Для определения коэффициента соответствия на основе метода экспертных оценок выявлены частоты наиболее характерных отклонений при производстве работ по одиночной смене рельса, одиночной смене шпал и регулировке ширины ко-



леи. В качестве экспертов привлекались дорожные мастера, старшие дорожные мастера, начальники участков, главные инженеры дистанций пути Свердловской и Южно-Уральской железных дорог.

Вероятность технологического брака  $Q_m$  и показатель функциональной безопасности  $K_m^{(2)}$  по каждому виду работ определяется по выражениям (3) и (10) соответственно.

Интегральный показатель при производстве работ:

$$K_{\text{инт}}^{(2)} = \frac{\sum_{i=1}^3 K_i^{(2)} \cdot \alpha_i}{3}, \quad (15)$$

где  $\alpha_i$  – весовой коэффициент, учитывающий значимость работ по отношению к безопасности движения. Для рассмотренных работ  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$ , поскольку при производстве работ нарушается целостность пути.

Итак, разработанные показатели функциональной безопасности для путевого хозяйства позволяют учесть надежность устройств контроля, надежность технического персонала, осуществляющего контроль и выполняющего производство работ, состояние пути, организационно-технологические мероприятия.

**Четвертая глава** посвящена разработке методики вычисления показателей функциональной безопасности на примере текущего содержания пути. Рассмотрены вопросы управления функциональной безопасностью на трех управленческих уровнях дистанции пути. Разработан алгоритм вычисления показателей функциональной безопасности. Выявлены закономерности изменения показателей функциональной безопасности в зависимости от исследуемых параметров. Выполнен расчет порогового уровня функциональной безопасности в дистанциях пути и предложены рекомендации по его установлению в допустимом интервале.

Функциональную безопасность демпфируют руководители всех управленческих уровней: дорожный мастер, старший дорожный мастер, заместитель начальника дистанции пути, начальник дистанции пути и др.

Обозначим индексом  $z$  номер уровня демпфирования,  $r$  – порядковый номер руководителя. Пусть  $z = 1$  соответствует бригадиру пути,  $z = 2$  – дорожному мастеру,  $z = 3$  – начальнику участка (старшему дорожному мастеру),  $z = 4$  – заместителем начальника,  $z = 5$  – начальнику дистанции пути.

Рассмотрим демпфирование функциональной безопасности дорожным мастером. Каждый руководитель стремится обеспечить максимальный уровень функциональной безопасности своей группы подчиненных. Для этого  $j$ -й дорожный мастер выбирает слабейшую бригаду  $l$  и сам руководит ею, повышая этим функциональную безопасность.

В общем виде коэффициент соответствия комплекса выполненных работ требованиям технологического процесса:

$$k_{i+1,j} = k'_{i,l} \max(\chi_{i,l}, \chi_{i+1,j}), \quad (16)$$

где  $\chi_{i,j}$  – коэффициент демпфирования работника  $w_{i,j}$ ;  $\chi_{i+1,j}$  – коэффициент демпфирования работника  $w_{i+1,j}$ ;  $i$  – номер уровня демпфирования,  $1 \leq i \leq z$ ;  $j$  – номер бригады  $i$ -го уровня,  $1 \leq j \leq r$ ;  $k'$  – коэффициент соответствия, удовлетворяющий следующему условию:

$$k'_{i,l} = \min(k_{i,1}, k_{i,2} \dots k_{i,l} \dots k_{i,r}). \quad (17)$$

Организационно-распорядительное воздействие, оказываемое руководителями высшего управленческого уровня дистанции пути, представляет собой задачу оптимального распределения ресурсов (технического персонала с определенными характеристиками – укомплектованность, разрядность) между бригадами для достижения максимального уровня функциональной безопасности.

Исследуем изменение показателя функциональной безопасности на примере рельсового хозяйства в зависимости от пропущенного тоннажа. В первом варианте частота проверок – два раза в месяц; во втором – три. Результаты расчета представлены на рис. 3.

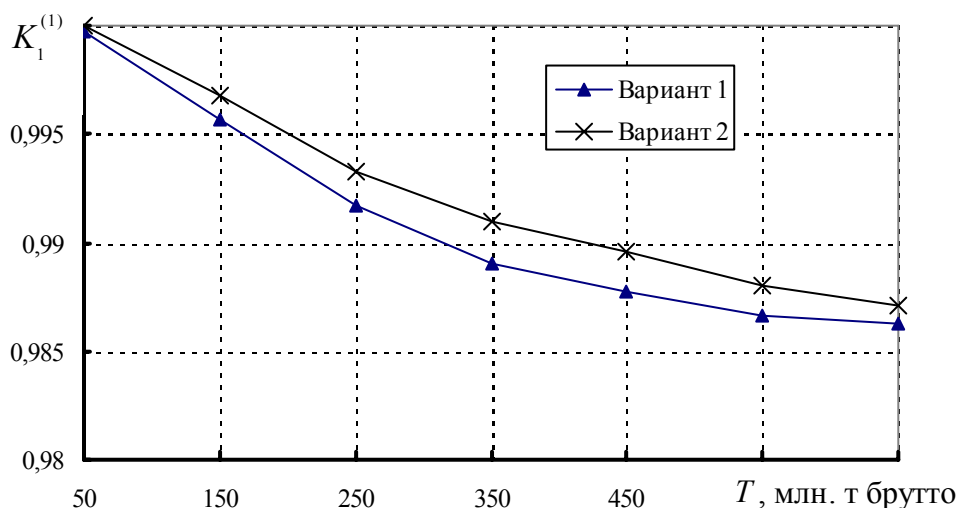


Рис. 3. Зависимость  $K_1^{(1)}$  от пропущенного тоннажа  $T$

Из рис. 3 следует, что, во-первых, с увеличением пропущенного тоннажа на контролируемом участке функциональная безопасность системы дефектоскопии уменьшается. Во-вторых, организационно-технологические мероприятия (периодичность контроля) не позволяют поддерживать функциональную безопасность на первоначальном уровне.

Рассмотрим изменение  $K_1^{(2)}$  в зависимости от частоты контроля бригады для участка с разной грузонапряженностью: 35, 50, 80 млн т·км брутто/км в год.

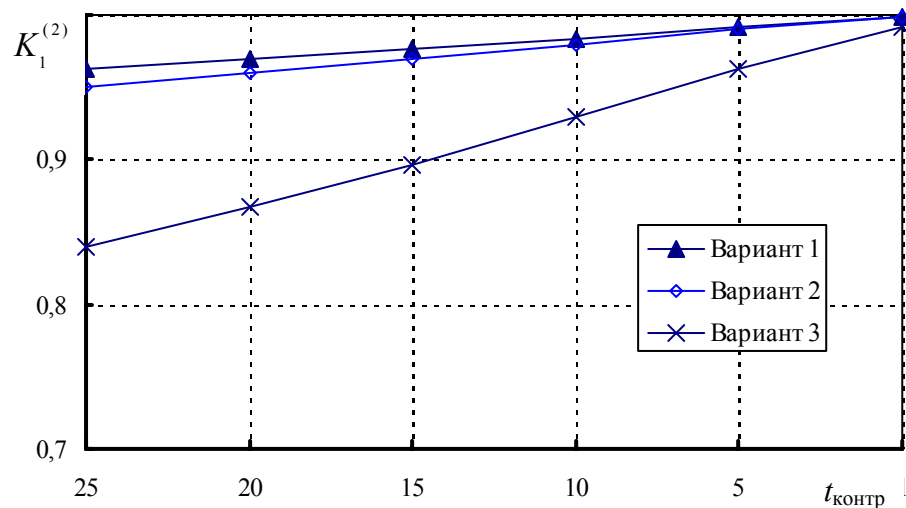


Рис. 4. Зависимость  $K_1^{(2)}$  от частоты контроля бригады

Таким образом, увеличение частоты контроля бригады позволяет повысить функциональную безопасность. Если бригада обеспечивает высокий уровень надежности (первый и второй варианты), то данное мероприятие влияет на ее уровень несущественно.

Исследуем изменение уровня функциональной безопасности в зависимости от пропущенного тоннажа при следующих условиях. В качестве исходного выбран пятый вариант.

Характеристика участка	Вариант			
	1	2	3	4
Состав бригады, чел.	10	10	13	12
Частота контроля, дни	15	5	15	15
Величина увеличения продолжительности «окна», %	30	10	0	10
Грузонапряженность, млн. т·км брутто/км в год	60	60	60	60

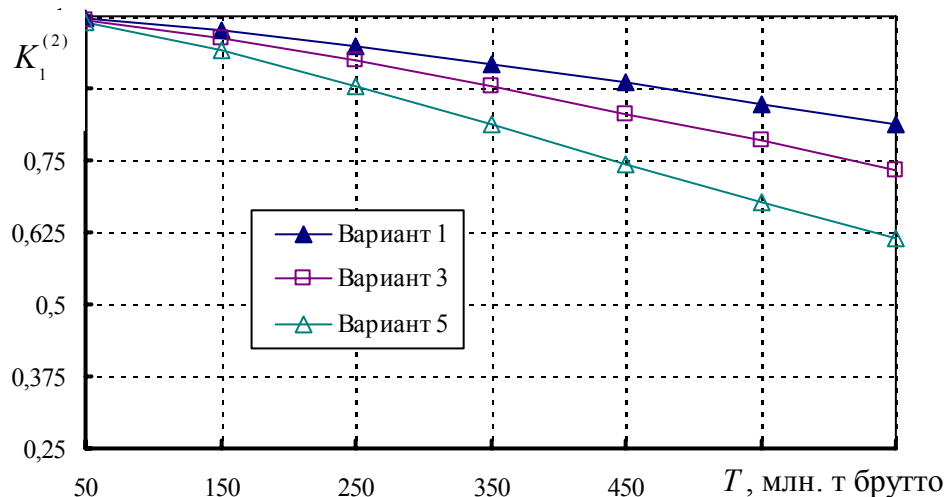


Рис. 5. Зависимость  $K_1^{(2)}$  от пропущенного тоннажа

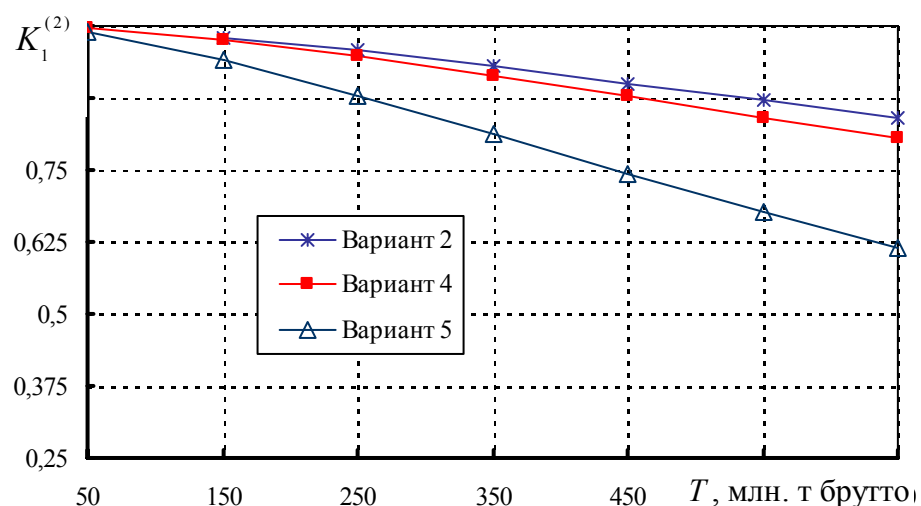


Рис. 6. Зависимость  $K_1^{(2)}$  от пропущенного тоннажа

Из рис. 5 и 6 видно, что за счет организационных мероприятий можно повысить функциональную безопасность на определенном участке пути. Однако при высоком пропущенном тоннаже ее начального уровня достичь не удастся.

В диссертации выполнены расчеты существующих и прогнозных значений показателей функциональной безопасности в Кузинской (ПЧ-5), Каменск-Уральской (ПЧ-10), Нижнетагильской (ПЧ-17) дистанциях пути Свердловской железной дороги и двух дистанциях пути – Бердяушской (ПЧ-3) и Златоустовской (ПЧ-4) Южно-Уральской железной дороги. Предложены рекомендации, направленные на повышение уровня функциональной безопасности.

В работе рекомендован интервал допустимых значений показателя функциональной безопасности, границы которого определены для идеальной бригады (состав соответствует требованиям нормативов технологического процесса, а категория руководителя – наивысшая) для двух состояний пути – с минимально и максимально пропущенным тоннажом. Установлено, что показатели могут находиться в следующих интервалах уровня функциональной безопасности: критический интервал  $K < 0,95$ , допустимый –  $0,95 \leq K < 0,98$ , рекомендуемый –  $0,98 \leq K < 1,00$ .

Ниже приведены результаты расчета показателей функциональной безопасности на примере наиболее «неблагоприятной» дистанции пути. В скобках указаны прогнозные значения исследуемых показателей с учетом внедрения ряда организационных мероприятий.

Показатель функциональной безопасности	Номер околотка		
	ПД-3	ПД-4	ПД-5
$K_1^{(1)}$ по контролю рельсов (нечетный)	0,98 (0,98)	0,98 (0,98)	0,96 (0,97)
$K_1^{(1)}$ по контролю рельсов (четный)	0,98 (0,98)	0,98 (0,98)	0,97 (0,98)

$K_2^{(1)}$ по контролю шпал	0,85 (0,85)	0,85 (0,85)	0,84 (0,84)
$K_3^{(1)}$ по контролю ширины колеи	0,86 (0,86)	0,86 (0,86)	0,86 (0,86)
$K_1^{(2)}$ при смене рельса	0,85 (0,95)	0,83 (0,94)	0,66 (0,88)
$K_2^{(2)}$ при смене шпал	0,76 (0,96)	0,78 (0,96)	0,72 (0,91)
$K_3^{(2)}$ по регулировке ширины колеи	0,77 (0,92)	0,84 (0,95)	0,65 (0,87)
$K_{\text{инт}}^{(2)}$ интегральный показатель по работам	0,79 (0,94)	0,82 (0,95)	0,68 (0,89)

После внедрения организационных мероприятий уровень функциональной безопасности для этой же дистанции пути увеличился. Однако на некоторых участках предложенных мероприятий недостаточно для достижения требуемого уровня функциональной безопасности.

На рис. 7 приведены результаты расчетов влияния численности бригады и квалификации бригадира на уровень функциональной безопасности.

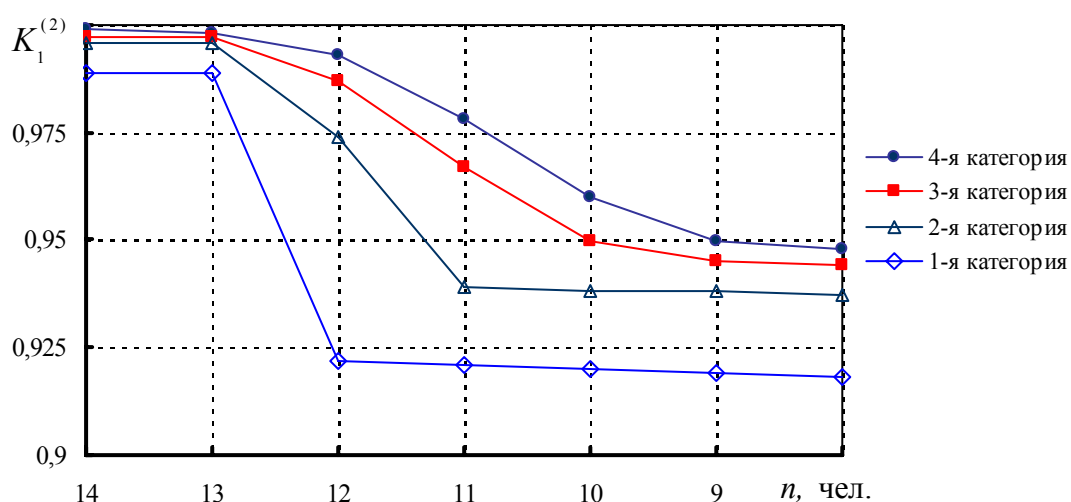


Рис. 7. Зависимость  $K_1^{(2)}$  от категории руководителя

Из рис. 7 видно, что руководитель с наивысшей категорией обеспечивает требуемый уровень функциональной безопасности при укомплектованности бригады не менее 80 % от расчетной численности, с низшей – только не менее 93 %.

Таким образом, предложенная в настоящей работе методика позволяет обоснованно применять организационные мероприятия, направленные на повышение уровня функциональной безопасности. Несмотря на то, что расчеты выполнены на примере путевого хозяйства, методика может быть использована при определении уровня функциональной безопасности в других хозяйствах железнодорожного транспорта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы и рекомендации.

I. Предложенная обобщенная методика количественной оценки уровня функциональной безопасности учитывает надежность устройств контроля и обслуживающих их операторов, надежность технического персонала, занятого на текущем содержании элементов инфраструктуры, отказы элементов ядра, организационно-технологические мероприятия.

II. Разработанная методика расчета уровня функциональной безопасности позволяет правомерно применять организационные мероприятия, направленные на его повышение: обосновывать состав бригады, определять длину эксплуатируемого участка, устанавливать периодичность контроля и др. В результате серии численных экспериментов установлено, что для обеспечения требуемой функциональной безопасности руководителю с наивысшей категорией необходима бригада, укомплектованная не менее 80 % от расчетной численности, с низшей – не менее 93 %. Установлено, что действующие в настоящее время требования к укомплектованности бригады (75 % от расчетной численности) не позволяют обеспечить оптимальный уровень функциональной безопасности.

III. В результате исследования сформулированы следующие выводы.

1. На основании выполненного анализа существующих подходов формирования системы безопасности движения поездов предложено рассматривать исследуемую систему как совокупность нормативно-правовой базы, организационно-распорядительного воздействия, организационно-технологических мероприятий, технических устройств и персонала, обеспечивающего безопасность движения.

2. Установлено, что количественные показатели браков не позволяют оценить эффективность работы ревизорского аппарата. Для оценки эффективности предложена система показателей: оперативность, эффективность запрещающих мер, рациональность использования рабочего времени, коэффициент качества выполнения контроля.

3. Предложенная концептуальная структура системы безопасности движения представлена как сетевая структура с крайне слабо выраженной иерархией, в основе которой находится ядро, реализующее перевозочный процесс, и совокупность подсистем, обеспечивающих безопасное функционирование ядра: нормативно-правовой, организационно-распорядительной, организационно-технологической и технической.

4. Введено понятие и дана формулировка функциональной безопасности элементов технической подсистемы. На базе понятия функциональной безопасности предложена количественная мера ее оценки – показатель функциональной

безопасности, характеризующий функционирование элементов технической подсистемы.

5. В результате серии численных экспериментов на примере текущего состояния пути установлено, что уровень функциональной безопасности зависит от состояния пути (от пропущенного тоннажа) и надежности технического персонала, выполняющего контроль его состояния и производство работ по текущему содержанию пути.

6. Предложена классификация интервалов функциональной безопасности. Установлены их числовые значения: критический интервал  $K < 0,95$ , допустимый –  $0,95 \leq K < 0,98$ , рекомендуемый –  $0,98 \leq K < 1,00$ .

7. В результате исследований установлена взаимосвязь между балльностью пути и уровнем функциональной безопасности. В дистанциях с оценкой состояния пути «хорошо» или «отлично» в большинстве случаев обеспечивается высокий уровень функциональной безопасности.

8. Предложенная методика вычисления уровня функциональной безопасности реализована в виде программного продукта (ПП), что позволяет автоматизировать процесс расчета существующих и прогнозных показателей с учетом принятых управленческих решений, а также серийно внедрять ПП в структурные подразделения путевого хозяйства.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Брусянин Д.А. Моделирование функциональной безопасности организации работ в структурных подразделениях железнодорожного транспорта: Препринт УрГУПС. – Екатеринбург, 2006. – 103 с.

2. Брусянин Д.А. Моделирование функциональной безопасности организации работ // Безопасность движения поездов: Сб. научн. тр. – М.: МИИТ. – 2005.

3. Брусянин Д.А. Функциональная безопасность как составляющая системы безопасности движения поездов / В.М Сай., Д.А. Брусянин // Транспорт Урала. – 2005. – №. 3(6).С. 25–32.

4. Брусянин Д.А. Структурирование системы безопасности движения поездов в корпорации «Российские железные дороги» / В.М Сай., Д.А. Брусянин // Корпоративное управление на железнодорожном транспорте: Сб. научн. тр. – М.: МИИТ. – 2004.

5. Брусянин Д.А. Показатели функциональной безопасности организации работ при текущем содержании геометрии пути // Сб. научн. тр.: Екатеринбург: УрГУПС. – 2005. – С. 122–131.

6. Брусянин Д.А. Структурирование системы безопасности движения поездов и моделирование процессов взаимодействия между ее элементами: Пре-

принт УрГУПС. – Екатеринбург, 2005. – 58 с.

7. Брусянин Д.А. Проблемы и перспективы организации безопасности движения поездов: Препринт УрГУПС. – Екатеринбург, 2004. – 50 с.

8. Брусянин Д.А. Анализ организационной структуры управления безопасностью движения поездов в ОАО «РЖД» // Сб. научн. тр. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2005. – С. 91–102.

9. Брусянин Д.А. Моделирование показателя функциональной безопасности организации работ по шпальному хозяйству // Молодые ученые – транспорту: Сб. научн. тр. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2005. – С. 166–174.

Брусянин Дмитрий Алексеевич

Функциональная безопасность в структурных подразделениях  
железнодорожного транспорта

05.02.22 – Организация производства (транспорт)

---

Сдано в набор 01.06.06	Подписано к печати 01.06.06
Формат бумаги 60×84 1/16	Объем 0.9 п.л.
Заказ 273	Тираж 100 экз.

---

| Типография УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66 |  |