

На правах рукописи

Шалымов Роман Вадимович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
МОНИТОРИНГА РЕЛЬСОВОГО ПУТИ**

Специальность: 05.11.03 – Приборы навигации

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание учёной степени**  
**кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)» на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС)

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

*Боронахин Александр Михайлович*

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник

ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

*Кошаев Дмитрий Анатольевич*

кандидат технических наук, первый заместитель директора

НТК СНК ОАО «Радиоавионика»

*Шилов Максим Николаевич*

Ведущая организация – ОАО «Гирооптика» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится «17» декабря 2014 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, ауд. 5108.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) и на сайте СПбГЭТУ: [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru)

Ваши отзывы и замечания по автореферату (в двух экземплярах), заверенные печатью, просим высылать по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, СПбГЭТУ, секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «16» октября 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.06

д.т.н., доцент

\_\_\_\_\_/А.М. Боронахин /

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Значительная часть грузо- и пассажиро- перевозок в нашей стране приходится на долю РЖД. С использованием железнодорожного транспорта перевозятся разные классы грузов, в том числе и повышенной опасности (взрывоопасные, ядовитые, радиоактивные вещества). Поэтому катастрофы на железной дороге всегда имеют серьезные последствия. Основной причиной возникновения аварий на железнодорожном транспорте являются несвоевременное обнаружение и устранение неисправности путей.

Научные исследования по созданию новых диагностических средств состояния железнодорожного пути остаются чрезвычайно актуальными. Объясняется это, в первую очередь, постоянным ростом грузоперевозок, что приводит к необходимости увеличения скоростей движения и, как следствие, к повышению рисков возникновения и развития дефектов. В результате на ряде дорог, например, на Транссибирской магистрали, возникают ситуации, когда плотность движения транспортных потоков настолько высока, что затруднительным становится даже выполнение плановых промеров с использованием путеизмерительных вагонов и иных автоматизированных средств.

Для обеспечения требуемого уровня безопасности движения, согласно нормативным документам, в случае обнаружения отклонений (дефектов) геометрии пути от его проектного состояния, до их устранения накладываются ограничения на скорость движения железнодорожных составов (в зависимости от категории – 120; 100; 70, 40 км/ч, вплоть до закрытия участка пути [1]), что, безусловно, негативно сказывается на экономических показателях перевозок.

В результате получается замкнутый круг – диагностированный на начальном этапе дефект предполагал бы несущественное снижение скорости движения, однако до момента его обнаружения, в результате многократного прохождения ж.д. составов, он развивается и к моменту контрольного проезда ПВ достигает критических значений. Поэтому представляется актуальной разработка автономной системы диагностики рельсового пути, отличающейся невысокой стоимостью и малыми габаритами, для оборудования регулярно курсирующих вагонов. Подобный подход обеспечит возможность систематической диагностики пути на высоких скоростях движения, позволит прогнозировать развитие дефектов поверхности катания и выдавать информацию об их точном местоположении оператору, оценивать отклонения от норм содержания рельсового пути, а также судить об эффективности проведенных ремонтных работ.

**Целью работы** является разработка и исследование инерциальной системы мониторинга рельсового пути, предназначенной для оснащения регулярно курсирующих железнодорожных составов.

Поставленная цель достигается решением **следующих задач:**

1. Анализ методов и средств диагностики рельсового пути;
2. Разработка конструкционной и алгоритмической основы инерциальной системы мониторинга рельсового пути;
3. Математическое описание динамического взаимодействия вагона и рельсового пути, предъявление требований к бесплатформенной инерциальной навигационной системе (БИНС);
4. Разработка алгоритма приведения результатов диагностики с использованием инерциальной системы мониторинга рельсового пути к путевой системе координат;
5. Разработка инерциального метода диагностики рельсового пути, учитывающего состояние поверхностей катания колес вагона;

6. Проведение экспериментальных исследований инерциальной системы мониторинга рельсового пути.

**Методы исследований.**

Решение поставленных задач основано на использовании основных положений теории интегрированных навигационных систем, теоретической и аналитической механики, теории колебаний, векторной и матричной алгебры, методах численного интегрирования, математического и имитационного моделирования, теории статистической обработки и регрессионного анализа.

**На защиту выносятся:**

1. Применение регрессионного анализа при обработке показаний инерциальной системы в процессе многократных проездов по контролируемому участку пути, позволяет оценивать тенденции развития дефектов рельсового пути;
2. Привлечение информации от микромеханических модулей, установленных на буксах колесных пар, в качестве внешних возмущений в математической модели колебательного движения элементов вагона, дает возможность предъявить требования к БИНС, установленной на раме тележки;
3. Навигация на рельсовом пути, с использованием стыков в качестве навигационных отметчиков, позволяет снизить погрешности в определении местоположения дефектов рельсового пути;
4. Использование микромеханических модулей, установленных на буксах колесных пар, дает возможность осуществлять совместную автоматическую диагностику состояния поверхностей катания рельсов и колес измерительной тележки.

**Научная новизна.** В процессе проведения исследований получены новые научные результаты:

- Разработан алгоритм регрессионной обработки показаний инерциальной системы, позволяющий прогнозировать развитие дефектов и осуществлять оценку проведенных ремонтных работ на рельсовом пути;
- Предложено математическое описание колебательного движения элементов конструкции вагона, предполагающее использование в качестве внешних воздействий информации, полученной от микромеханических модулей, установленных на буксах колесных пар ходовой тележки вагона;
- Разработан алгоритм, позволяющий, благодаря использованию стыков в качестве навигационных отметчиков, осуществлять совместную обработку данных, полученных в результате нескольких экспериментальных проездов по одному и тому же участку рельсового пути;
- Развита инерциальная методика диагностики неровностей рельсового пути, предложенная в диссертационной работе Подгорной Л. Н. [2], благодаря учету состояния поверхности катания колес вагона и размеров пятна контакта системы колесо-рельс.

**Практическая ценность работы:**

- Разработан и реализован алгоритм регрессионной обработки показаний микромеханических датчиков, позволяющий прогнозировать развитие дефектов и осуществлять оценку проведенных ремонтных работ на рельсовом пути;

- Разработана и апробирована математическая модель колебательного движения элементов вагона, позволяющая предъявить требования к БИНС, установленной на тележке вагона (полоса пропускания должна составлять не менее 25 Гц для гироскопов и не менее 800 Гц для акселерометров);
- Разработан и реализован метод навигации на рельсовом пути, с использованием стыков в качестве навигационных отметчиков, позволяющий снизить погрешности в определении местоположения дефектов рельсового пути с величины порядка 1м/км (погрешность датчика пути) до 1 – 6 см для скоростей движения 40 – 200 км/ч;
- Разработан и реализован метод диагностики неровностей рельсового пути, с учетом состояния поверхности катания колес вагона и размеров пятна контакта системы колесо-рельс, позволяющий снизить вероятность ошибок второго рода на 10 %, а также, благодаря самокалибровке одометра, повысить точность измерения пройденной дистанции.

#### **Реализация и внедрение результатов работы.**

Тема диссертационной работы тесно связана с работами по созданию малогабаритной инерциальной системы диагностики рельсового пути (МИСД РП-М, ОАО «Радиоавионика») и блока интеграции данных БИ-1.0 (ЗАО «Фирма ТВЕМА»).

#### **Апробация.**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Международная научно-практическая конференция «XXXIX НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ» (2010), Санкт-Петербург, Россия.
- Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им.В.И. Ульянова (Ленина), (2010-2014), Санкт-Петербург, Россия.
- Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» (2010–2014), Санкт-Петербург, Россия.
- Первая международная научно-практическая конференция «Интеллектуальные системы на транспорте» (2011), Санкт-Петербург, Россия.
- XVIII и XXI Санкт-Петербургские международные конференции по интегрированным навигационным системам (2011, 2014), Санкт-Петербург, Россия.
- XXVIII конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова (2012), Санкт-Петербург, Россия.
- Заседание объединенного ученого совета ОАО «РЖД» (2012), Москва, Россия.
- Международная конференция «Inertial Sensors and Systems» (2012, 2014), Карлсруэ, Германия.
- Международная конференция «Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Applications» (2014), Бонн, Германия.

#### **Публикации.**

Основные теоретические и практические результаты диссертации изложены в 25 публикациях, среди которых 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 1 статья в других изданиях, 12 – в научных сборниках и трудах российских и международных конференций, 2 патента РФ.

#### **Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 56 наименований. Основная часть работы изложена на 115 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 80 рисунков и 6 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования, научные и практические результаты и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** выполнены обзор современной путеизмерительной техники и анализ методов измерения неровностей рельсовых нитей, предложена конструкционная и алгоритмическая основа инерциальной системы мониторинга рельсового пути (ИСМ РП).

В настоящее время в России и за рубежом существуют две основные группы средств диагностики рельсового пути: путеизмерительные вагоны (ПВ) и ручные средства измерения параметров рельсового пути, такие как тележки и шаблоны.

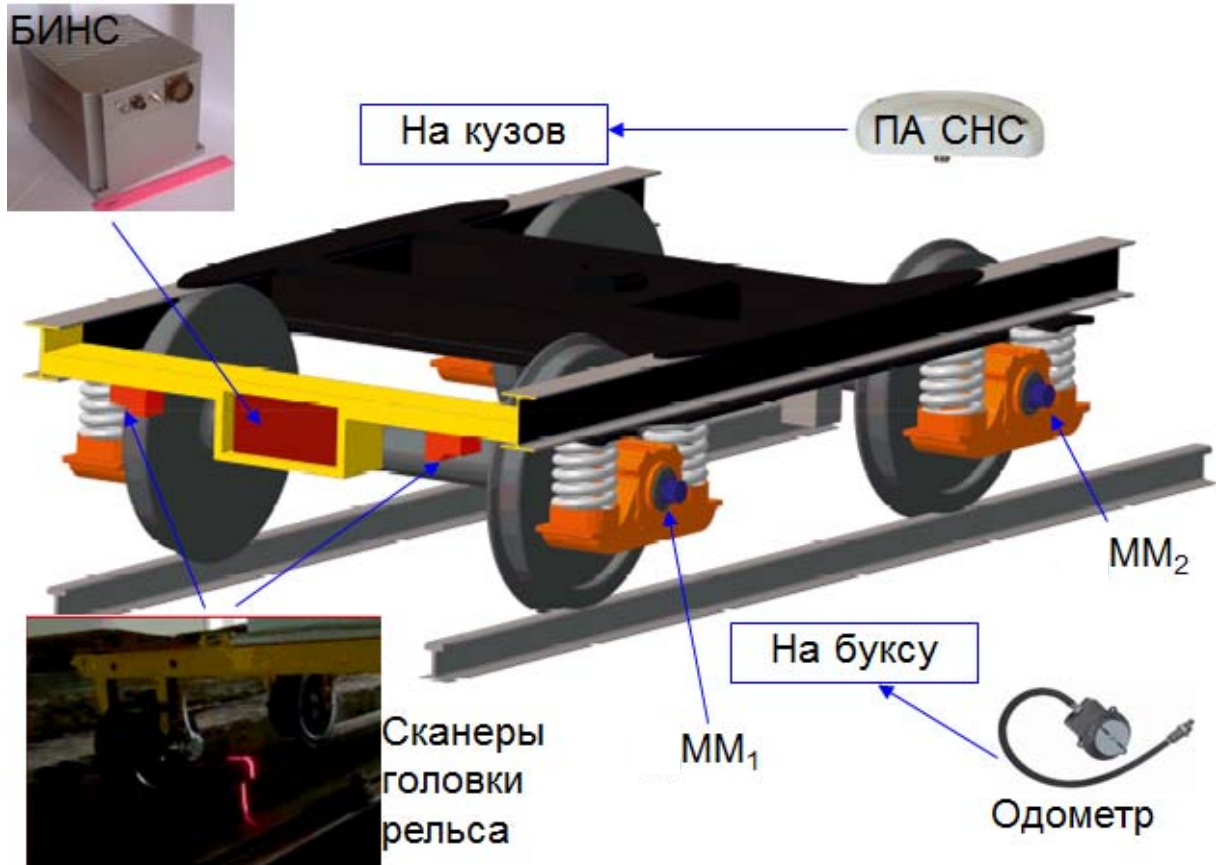
ПВ являются подвижными единицами, предназначенными для скоростного контроля состояния рельсовой колеи под динамической нагрузкой. Наиболее современные ПВ содержат в своем составе большое количество высокоточной аппаратуры и позволяют контролировать десятки различных параметров рельсового пути. Ручные путеизмерительные тележки производят измерения при отсутствии динамической нагрузки на рельсы. Не обладая габаритами вагона, тележка включает значительно меньше измерительных приборов при меньшей стоимости.

Однако следует учесть, что с одной стороны диагностика рельсового пути с использованием ручных средств низкопродуктивна, а с другой стороны, вследствие высокой стоимости, количество ПВ является недостаточным для осуществления регулярного мониторинга. Поэтому становится вполне очевидным, что формирование статистической базы состояния рельсового пути с использованием существующих систем затруднено.

Решение может быть достигнуто разработкой малогабаритных автоматизированных измерительных систем, реализующих т.н. безлюдные технологии, для оснащения пассажирских и грузовых поездов. Основными требованиями к таким системам являются малые габариты и невысокая стоимость. Исходя из проведенного анализа конструкционную основу разрабатываемой ИСМ РП должна составить ранее разработанная на кафедре ЛИНС (СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)) малогабаритная инерциальная система диагностики рельсового пути [2]. Конструкционным отличием ИСМ РП от вышеупомянутой системы станет то, что БИНС и, при необходимости, ряд других систем (сканеры головки рельса) в ней будут установлены на подрессоренной части ходовой тележки в составе моноблочной конструкции. Расположение подсистем ИСМ РП приведено на рис. 1, где ММ – микромеханический модуль (анализ взаимной корреляционной функции сигналов ММ, установленных на буксах первого и следом идущего колес тележки вагона, позволяет контролировать состояние поверхности катания рельса [2]), БИНС – бесплатформенная инерциальная навигационная система, ПА СНС – приемная аппаратура спутниковых навигационных систем.

Следует также отметить, что особый интерес будет представлять совместная обработка показаний датчиков в результате многократных проездов одного и того же участка рельсового пути. Результаты такого анализа в разработанном алгоритме ИСМ РП делятся

на две ветки (см. рис. 2): анализ качества проведенных ремонтных работ (в этом случае следует рассматривать 2 базы – последнюю до и первую после ремонта); определение тенденции развития дефекта (в этом случае рассматриваются все имеющиеся базы, записанные с последних ремонтных работ, проводится их регрессионная обработка по методу наименьших квадратов и вырабатывается прогноз скорости развития дефекта для определения интервала времени, через который он выйдет за пределы установленные нормативом и потребует ремонтных работ).



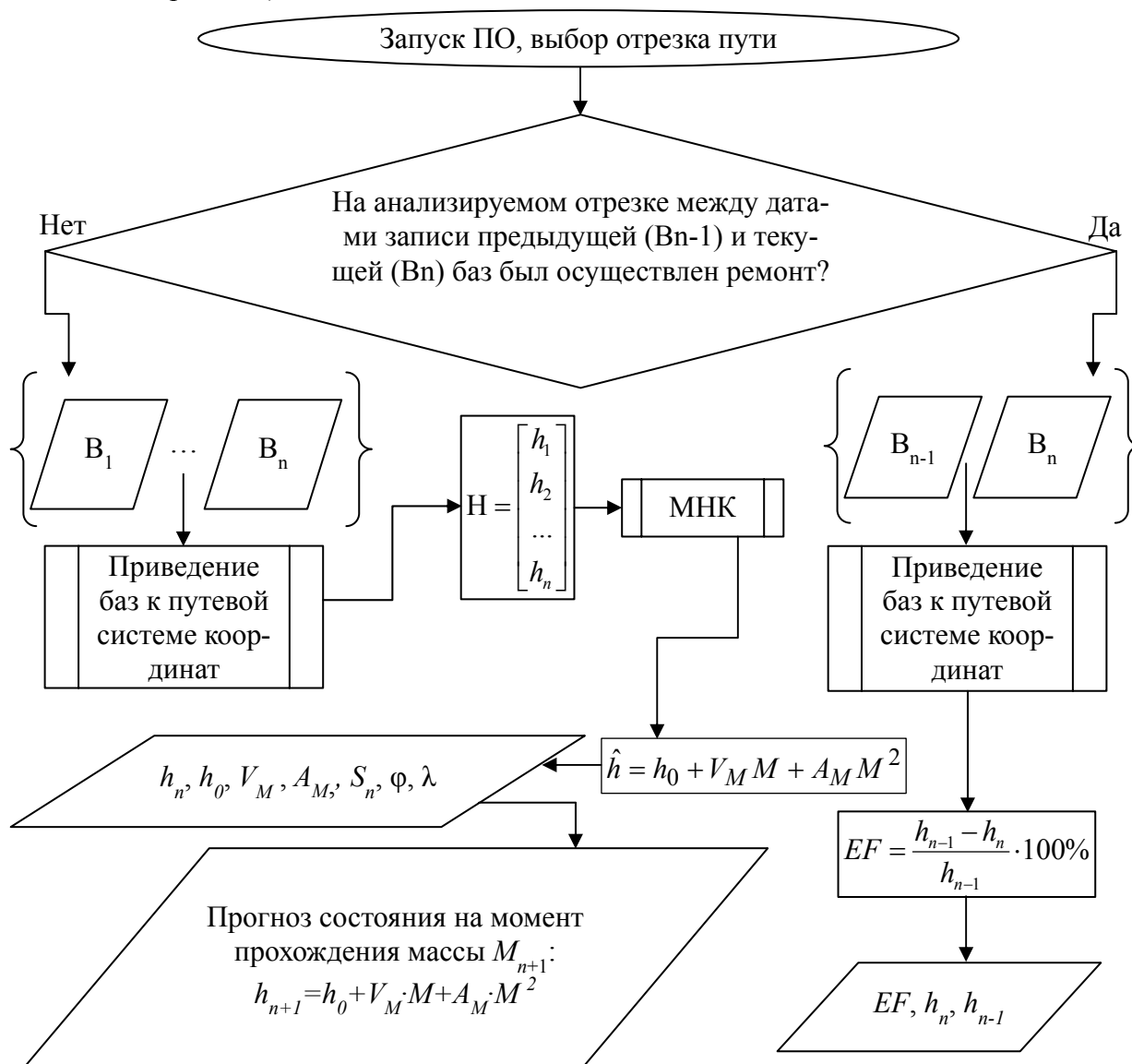
**Рисунок 1** – Расположение измерительных подсистем ИСМ РП на подвижной единице

Таким образом, если с течением времени дефект практически не развивается, то коэффициенты при высших степенях  $M$  будут малы и определяющим станет  $h_0$ , если состояние дефекта равномерно ухудшается, то будет сохраняться постоянным коэффициент  $V_M$ , а  $A_M$  станет отличным от нуля, только в случае, когда скорость развития дефекта станет расти. В случае если ремонт производился, то обработка осуществляется в соответствии с правой веткой алгоритма, где происходит оценка качества проведенных работ, как разницы между доремонтным и послеремонтным состоянием анализируемого участка (коэффициент эффективности ремонта  $EF$ ).

В результате можно сделать заключение, что для определения тенденции развития дефекта необходимо:

- определить условия эксплуатации измерительных систем в зависимости от места их установки на подвижной единице;
- осуществлять регулярную диагностику исследуемого участка пути с использованием ИСМ РП с достаточной для обеспечения требуемого уровня безопасности точностью (погрешность не более 1 мм для коротких просадок);

- определять местоположение обнаруженного дефекта в каждом из проездов с погрешностью не более 10 см (для обеспечения возможности совместной обработки результатов нескольких проездов).



$V$  – база данных.  $H$  – вектор измерений, элементами которого являются значения параметров неровности в каждом из проездов (глубина и протяженность дефекта от проезда к проезду).  $\hat{h}$  – оценка вектора измерений.  $M$  – совокупная масса составов, прошедших по участку рельсового пути с момента последнего ремонта.

$h_0$ ,  $V_M$  и  $A_M$  – начальное значение, скорость и ускорение роста параметра неровности.

**Рисунок 2** – Алгоритм регрессионной обработки баз, содержащих параметры неровностей

**Глава 2** посвящена исследованию характера движения элементов конструкции вагона с целью определения условий эксплуатации измерительных систем в зависимости от места их установки на подвижной единице.

Существует большое количество типов вагонов, тележек и систем подвеса. При этом в каждом конкретном случае математическое описание будет иметь отличительные особенности. Поэтому в рамках создания инженерной модели, учитывающей динамическое взаимодействие вагона и рельсового пути, предложена модель, к которой могла бы быть пересчитана любая подвижная единица (эквивалентная схема). Предложенная кинематическая схема вагона, приведена на рис. 3.



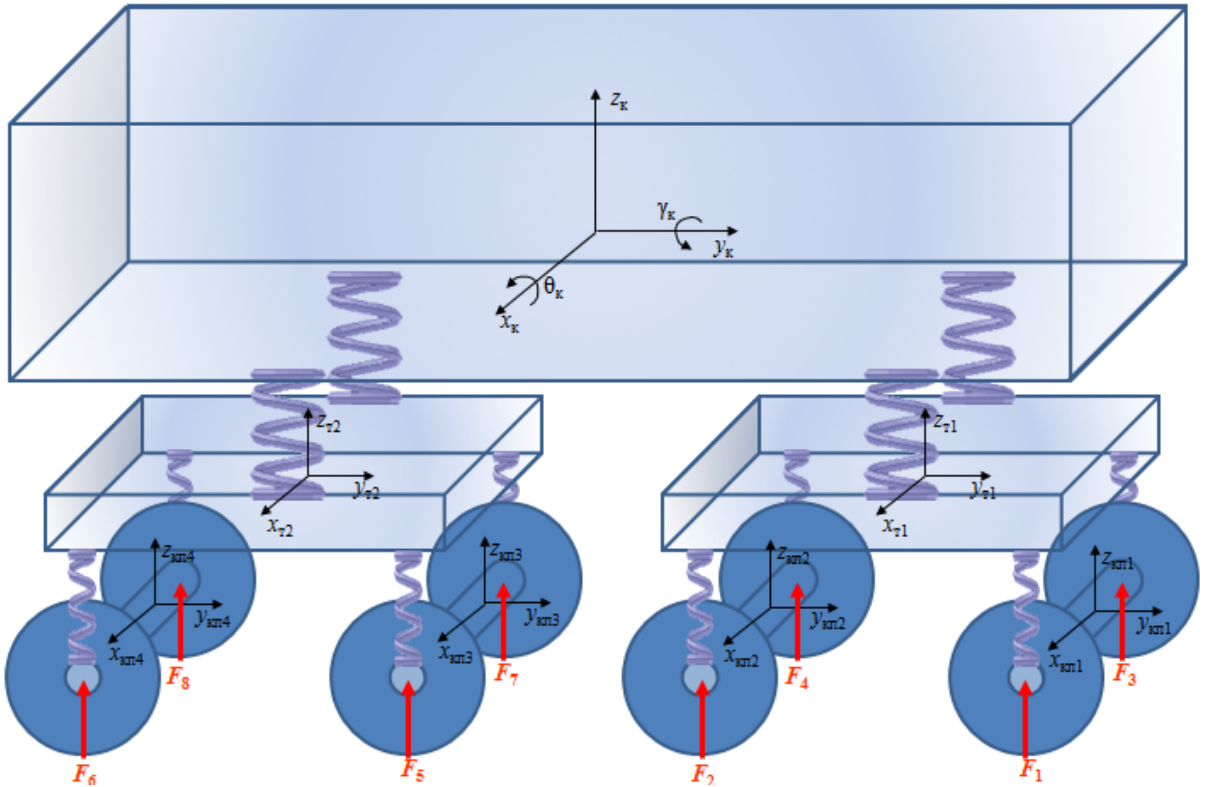


Рисунок 3 – Эквивалентная кинематическая схема вагона

В расчетах приняты следующие допущения:  $\psi, \theta, \gamma$  (углы рыскания, тангажа и крена, соответственно) являются малыми (менее  $5^\circ$ ); линейные перемещения присутствуют только по вертикальной оси ( $z$ ); все элементы кинематической схемы – симметричные однородные твердые тела с равномерно распределенной по объему массой ( $m$ ). Исходя из принципа освобождения от связей, рельсовый путь заменен реакцией на движение по нему подвижной единицы. Внешние воздействия представлены силами реакции, пересчитанными к каждому из 8-ми колес вагона (обозначены как  $F_{1...8}$ ). В качестве сил, действующих со стороны гасителей колебаний, рассматриваются сила упругости рессоры и диссипативная сила сопротивления движению демпфера.

Для получения дифференциальных уравнений движения рассматриваемой системы по каждой из выбранных обобщенных координат используется уравнение Лагранжа 2-го рода. После проведения дифференцирования по схеме Лагранжа для вертикального линейного перемещения первой тележки может быть получено:

$$\begin{aligned}
 & m_T \ddot{z}_{CT1} + (4\alpha_T + 2\alpha_K) \dot{z}_{CT1} + (4c^{КП-Т} + 2c^{Т-К}) z_{CT1} = \\
 & = -m_T g - c^{КП-Т} \cdot \left( -f_{CT1}^{КП-Т} - f_{CT2}^{КП-Т} - f_{CT3}^{КП-Т} - f_{CT4}^{КП-Т} - 2z_{CK1} - 2z_{CK2} \right) + \\
 & + c^{Т-К} \cdot \left( -f_{CT1}^{Т-К} - f_{CT2}^{Т-К} + 2z_{CK} + b_K \theta_K \right) - \alpha_T \cdot \left( -2\dot{z}_{CK1} - 2\dot{z}_{CK2} \right) + \alpha_K \cdot \left( 2\dot{z}_{CK} + b_K \dot{\theta}_K \right)
 \end{aligned}$$

Аналогичным образом получены дифференциальные уравнения движения всех элементов кинематической схемы по каждой обобщенной координате. Значения статических растяжений пружин при нулевых начальных условиях и равномерном распределении нагрузки имеют вид:

$$\begin{aligned}
 f_{1...8}^{КП-Т} &= \frac{g}{c^{КП-Т}} (0.25m_T + 0.125m_K) \\
 f_{1...4}^{Т-К} &= \frac{g}{c^{Т-К}} 0.25m_K
 \end{aligned}$$

В приведенных уравнениях  $kп$  – колесная пара;  $t$  – тележка;  $k$  – кузов;  $\alpha$  – коэффициент сопротивления демпфера;  $c$  – коэффициент жесткости пружины;  $g$  – ускорение свободного падения;  $f$  – натяжения пружины в положении статического равновесия;  $b$  – координата точки крепления гасителя колебаний.

Следует отметить, что полученная математическая модель вагона представляет собой систему дифференциальных уравнений 2-го порядка с перекрестными связями. Низкий порядок уравнений обеспечивается тем, что внешние воздействия не задаются функционально (как это обычно делается), а считаются известными при моделировании. Полученная математическая модель вагона может быть использована, для определения условий работы датчиков и систем в зависимости от мест их установки на подвижной единице. Но решение этой задачи требует интегрирования дифференциальных уравнений. При этом аналитическое интегрирование такой системы дифференциальных уравнений с большим количеством переменных и сложными перекрестными связями является невыполнимым. В результате модель была построена в системе MatLab Simulink, где интегрирование осуществлялось численными методами.

Для выработки требований к БИНС при установке на тележке [3], в качестве входных возмущений формировались силы по показаниям микромеханических модулей, входивших в состав ИСМ РП. Результаты моделирования сравнивались с показаниями вагона-дефектоскопа АВИКОН-03М (контролировалось движение кузова вагона). Совпадение спектральных составов (см. рис. 4, (б) для обобщенной координаты  $\gamma_k$ ) параметров модели и выходных данных БИНС, позволяет сделать вывод о достоверности предложенного математического описания динамики движения кузова вагона. Вместе с тем хорошо видны различия экспериментальных результатов и движений, полученных в ходе моделирования (см. рис. 4, (а) для обобщенной координаты  $\gamma_k$ ). Они могут быть вызваны тем, что не учитывалось влияние соседней подвижной единицы (проезд осуществлялся в сцепке с локомотивом), а также перемещениями людей внутри ПВ, которые приводили к появлению низкочастотных составляющих колебаний.

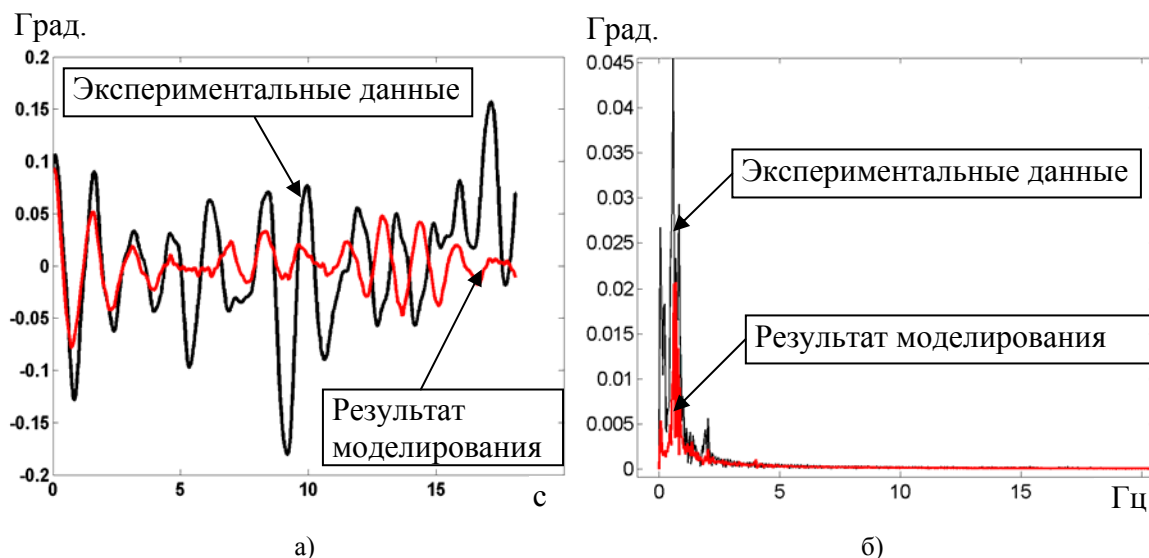


Рисунок 4 – Колебания кузова по углу крена (а) и их спектр (б)

Следует подчеркнуть, что основной задачей, которую должна решить полученная математическая модель, является определение уровня и частотного состава возникающих колебаний для выработки требований к датчикам.

Учитывая адекватность используемой модели для описания движения кузова вагона, можно использовать результаты моделирования, полученные для обобщенных координат

рамы тележки (см. рис. 5 для обобщенной координаты  $\gamma_T$ ), с целью предъявления требований к динамическим характеристикам БИНС: для акселерометров полоса пропускания должна быть не меньше 800 Гц, а для гироскопов – 25 Гц.

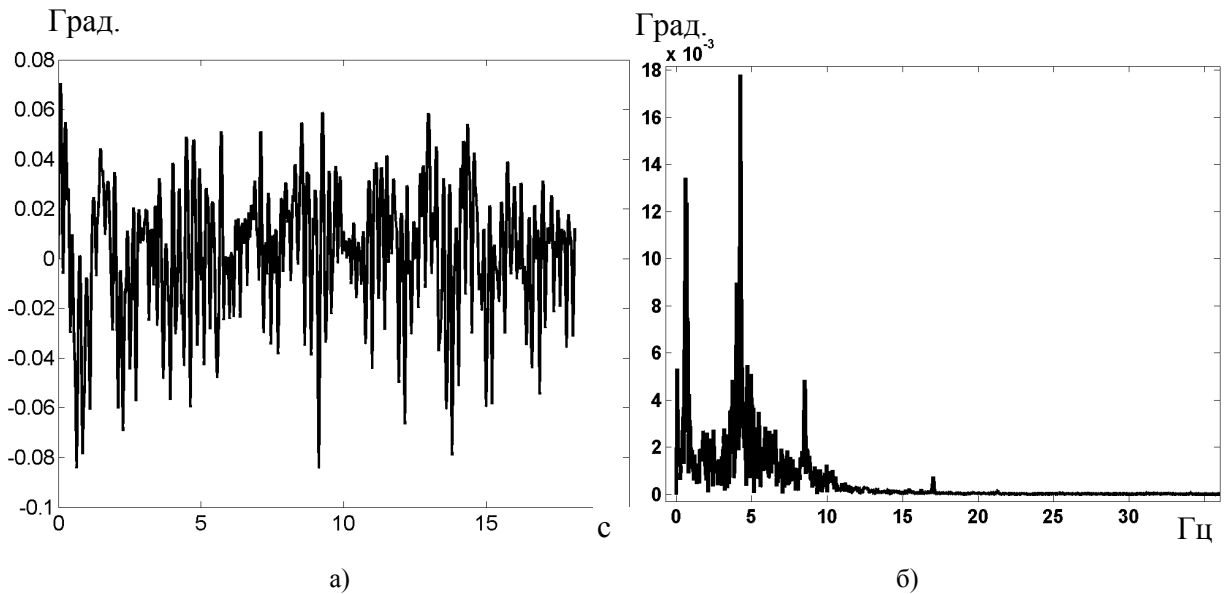


Рисунок 5 – Колебания тележки по углу крена (а) и их спектр (б)

В главе 3 приводятся результаты разработки метода навигации на рельсовом пути, с использованием стыков в качестве навигационных метчиков.

Опытная эксплуатация ИСМ РП показала, что в качестве НО могут выступать конструктивные особенности рельсового полотна – стыки, стрелочные переводы и т.п., а применение процедуры взаимной корреляции сигналов одного и того же микромеханического модуля в разных проездах при их предварительном сведении по показаниям одометра и информации от ПА СНС, в силу квазипостоянства положения пути, позволяет достичь существенного эффекта в задаче коррекции одометра. На рис. 6 приведены сигналы одного из ММ в 8-ми проездах одного и того же участка пути с разными скоростями движения. Видно, что амплитуды сигналов меняются, но их пространственное положение, естественно, остаётся неизменным.

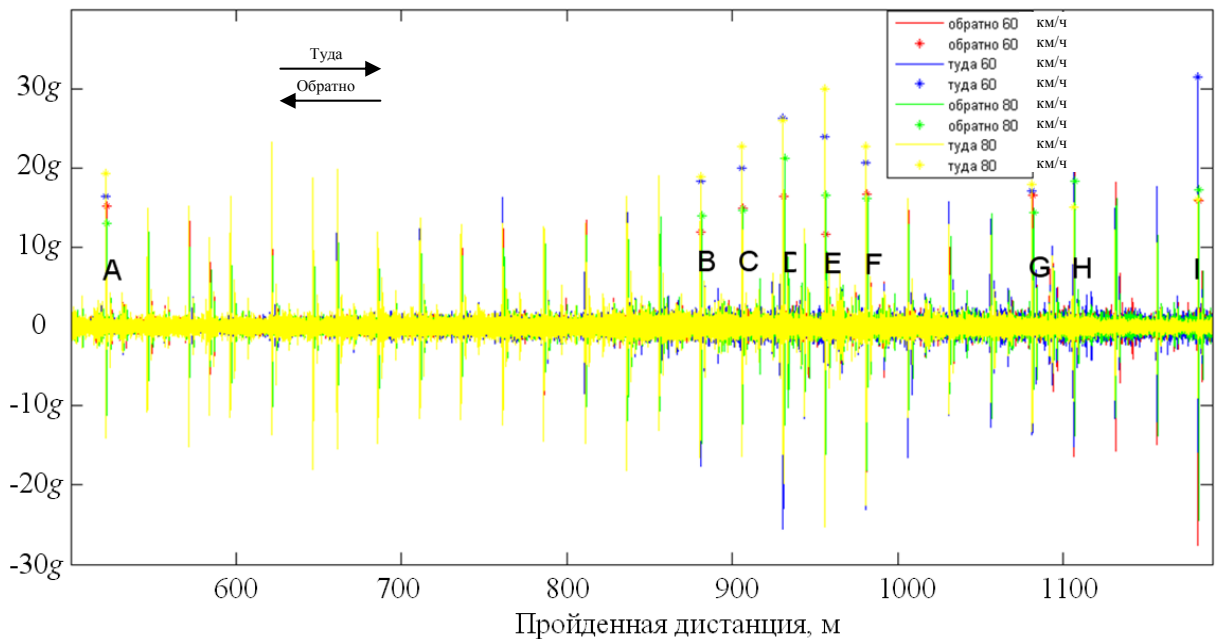


Рисунок 6 – Показания ММ в 8 последовательных проездах

Следует также учитывать, что сам по себе путь, являясь квазипостоянной структурой, несёт в себе значительный объем априорной информации о траектории движения, что, безусловно, может быть использовано для случаев многократных проходов контролируемого участка пути.

Основной задачей при формировании геоинформационной базы инфраструктуры железной дороги является приведение показаний одометров всех путеобследовательских станций к «единой» путевой координате. Процедура ее формирования представлена в диссертации на примере совместной обработки результатов диагностики ИСМ РП в двух проездах по одному и тому же участку рельсового пути.

Траектория движения подвижной единицы по рельсовому пути в плане может быть разбита на набор прямолинейных и криволинейных участков; последние, в свою очередь, характеризуются серией переходных и круговой кривых (рис. 7).

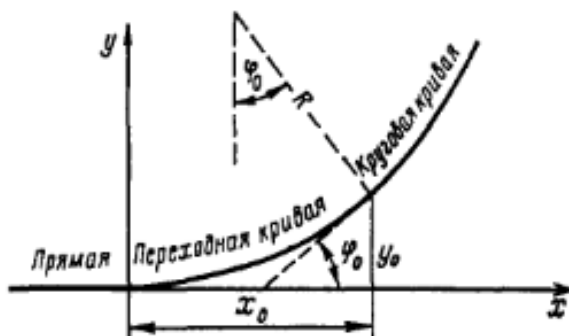


Рисунок 7 – Возможные конфигурации железнодорожных путей в плане

Для дальнейшего использования при обработке информации априорного знания конфигурации участка, по которому перемещается подвижная единица, необходимо знать функционал которым кривая может быть описана. В качестве переходных кривых применяются различные математические кривые с постепенно уменьшающимся радиусом кривизны от бесконечности до радиуса круговой кривой. Наиболее часто используется клотоида (радиоидальная спираль):  $x = L - aL^5$ ;  $y = bL^3 + cL^7$ , где  $L$  – длина участка кривой, а параметры  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – константы. Для круговой кривой аппроксимация имеющихся данных осуществляется с переходом в полярную систему координат:  $x = R \cos(\varphi)$ ;  $y = R(1 - \sin(\varphi))$ , где  $\varphi = 3\pi/2 + L/R$ . Тогда  $R(L) = \text{const}$ ,  $\varphi(L) = L/R + 3\pi/2$ .

Использование одного лишь одометра не приводит к точной локализации обнаруженных дефектов из-за его погрешности, которая зависит от различных факторов, таких как скорость, проскальзывание колеса, погодные условия и может составлять до 5 м на 1 км [3]. Существует ручной и автоматический способы коррекции одометра. При этом первый дает большие погрешности при высоких скоростях движения и плохой видимости путевой инфраструктуры, а второй – требует установки в колее навигационных отметчиков и подразумевает дополнительные финансовые вложения в инфраструктуру.

Таким образом, комплексирование информации от НО (ММ), ПА СНС, БИНС и одометра позволяет говорить о возможности построения геоинформационной базы пути и методе навигации на рельсовом пути, позволяющем снизить погрешности в определении местоположения дефектов рельсового пути с величины порядка 1м/км (погрешность датчика пути) до 1 – 6 см для скоростей движения 40 – 200 км/ч (погрешность не копится).

После приведения к «единой» путевой координате результатов нескольких последовательных проездов ИСМ РП по одному и тому же участку рельсового пути становится возможной их регрессионная обработка. В соответствии с предложенным в первой главе алгоритмом (см. рис. 2) может быть получена как информация о тенденции развития дефекта, так и о качестве проведенных работ (если на анализируемом отрезке был проведен ремонт). С целью экспериментального подтверждения предложенного метода в каждом из пяти проездов по участку рельсового пути Санкт-Петербург – Малая Вишера вырезан один и тот же небольшой отрезок. Показания одного из микромеханических модулей (ММ1) представлены на рис. 8.

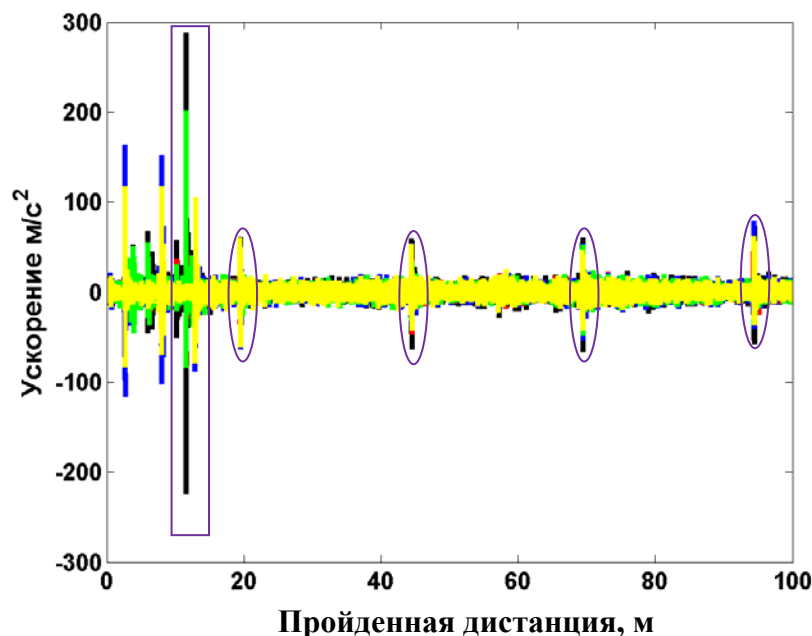


Рисунок 8 – Показания ММ1 в пяти поездках

Проезды осуществлялись в разные дни (4-го и 17-го января, а также 3-го, 15-го и 23-го февраля) с одинаковой скоростью. Если обратить внимание на удары, фиксируемые ММ1 при прохождении стыков (выделены овалами на рис. 8), то можно отметить, что от поезда к поезду форма сигнала меняется незначительно, а значит качество рассматриваемых элементов рельсового пути оставалось практически неизменным в течение двух месяцев.

Также следует обратить внимание на область, выделенную на рис. 8 прямоугольником. Эта область приведена на рис. 9 с увеличением. Легко видеть, что сигналы ММ1 в трех поездках (04.01, 17.01 и 03.02) являются коррелированными (отображают прохождение по одной и той же неровности) и не совпадают с двумя последними (15.02 и 23.02).

Анализ 5-ти экспериментальных проездов позволяет сделать заключение о том, что на рассматриваемом участке в период с 3-го по 15-е февраля был осуществлен ремонт (вырезан дефектный участок, а на его место сварен отрезок рельса).

Экспериментальные данные показали возможность совместной обработки показаний ММ в нескольких поездках. Как видно из рис. 9, с использованием предложенного в главе 1 алгоритма регрессионной обработки можно оценить тенденцию роста глубины дефекта с течением времени (за период с 04.01 по 03.02) почти в два раза (момент выхода из строя рельса в соответствии с левой веткой алгоритма на рис. 2 должен был прийти на 16.02 при равномерной нагрузке на путь за рассматриваемый промежуток времени), а также обнаружить осуществление ремонта с коэффициентом эффективности, порядка 95% в период с 03.02 по 15.02 (см. правую ветку алгоритма на рис. 2).

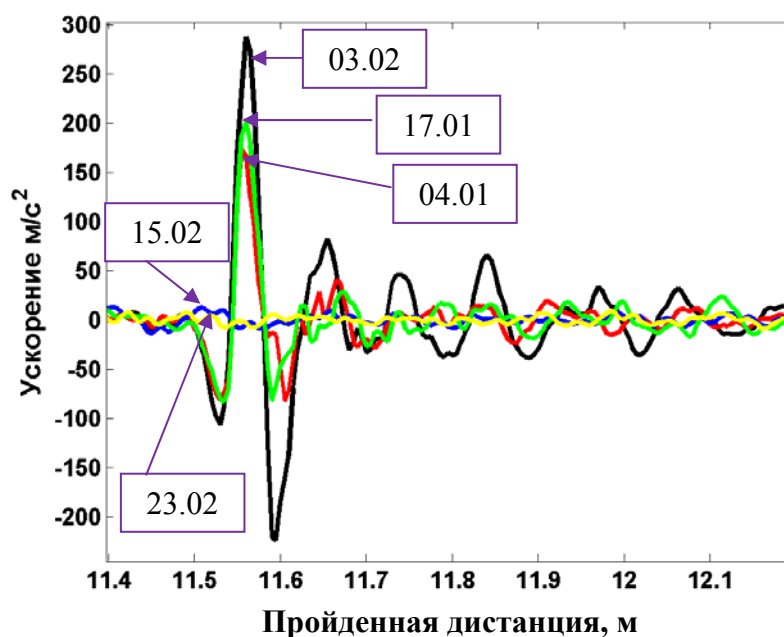


Рисунок 9 – Сигнал ММ1 в пяти проездах при прохождении неровности рельсового пути

В главе 4 приводятся результаты разработки метода диагностики неровностей поверхности катания рельсов с использованием микромеханических модулей, основанного на идентификации вертикальных неровностей по степени воспроизводимости траекторий движения колесных пар и учитывающего состояние поверхности катания колес и размеры пятна контакта системы колесо–рельс.

Основу инерциального метода диагностики неровностей рельсового пути, предложенного в диссертационной работе Подгорной Л. Н. [2], составляет анализ взаимной корреляционной функции сигналов вертикальных скоростей букс первого и следом идущего колес тележки вагона. Погрешность определения глубины неровности в этом случае составляет 1 мм. Предложенный в 4 главе метод является развитием инерциального метода и позволяет осуществлять диагностику дефектов поверхности катания рельсов в присутствии неровностей на поверхности катания колес вагона с сохранением точности.

Во-первых, следует отметить, что результаты взаимодействия в системе колесо–рельс усиливаются при возникновении дефектов на поверхности катания колеса, ведь они являются причиной повышения динамических нагрузок, частоты приложения нагрузки качения, что также влечет за собой ускоренный износ рельса, его хрупкое и пластинчатое разрушение. Помимо того, некруглость колеса очевидно будет проявляться в показаниях микромеханических модулей и, в ряде случаев, затруднять диагностику состояния рельсов. Также следует отметить, что изменение геометрии колеса напрямую сказывается на точности одометра (изменение формы колеса приведет к изменению цены его деления), поэтому учет состояния поверхности катания колеса необходим для снижения погрешности измерения пройденной дистанции.

Во-вторых, колесо и рельс взаимодействуют не в единой точке, а в некоторой области, называемой пятном контакта. В зависимости от материала и состояния контактирующих поверхностей, а также от характера движения пятно контакта может иметь различные форму и площадь. Учет характера взаимодействия колеса и рельса является необходимым для предложенного метода диагностики, т. к. размер пятна контакта влияет на результаты измерения глубины и протяженности неровностей поверхности катания рельса. При этом

уменьшение глубины дефекта и увеличение его протяженности, полученных по результатам измерений тем более значительно, чем меньше его действительная длина.

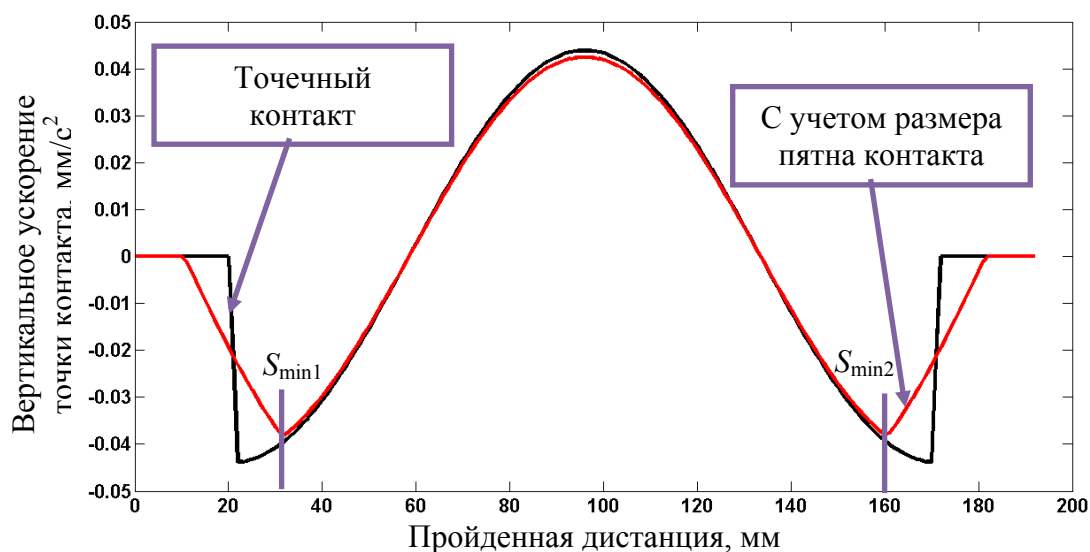


Рисунок 10 – Вертикальное ускорение точки контакта

На рис. 10 приведено смоделированное вертикальное ускорение буксы колеса (при движении со скоростью 1м/с), соответственно, по неровности на поверхности рельсовой нити (длина  $\lambda=15$ см, глубина  $h=5$ см) при точечном контакте и с учетом размера пятна контакта ( $P=20$ мм). В результате, с учетом размеров пятна контакта длина неровности определяется как:

$$\lambda = S_{\min 2} - S_{\min 1} + P,$$

где  $S_{\min 1}$  и  $S_{\min 2}$  – путевые координаты первого и второго минимумов вертикального ускорения точки контакта. Следует также отметить, что таким образом можно оценить только длину неровности, протяженность которой больше, чем  $4P$ . В противном случае искомый параметр значительно искажается из-за наличия пятна контакта (причем тем больше, чем короче дефект).

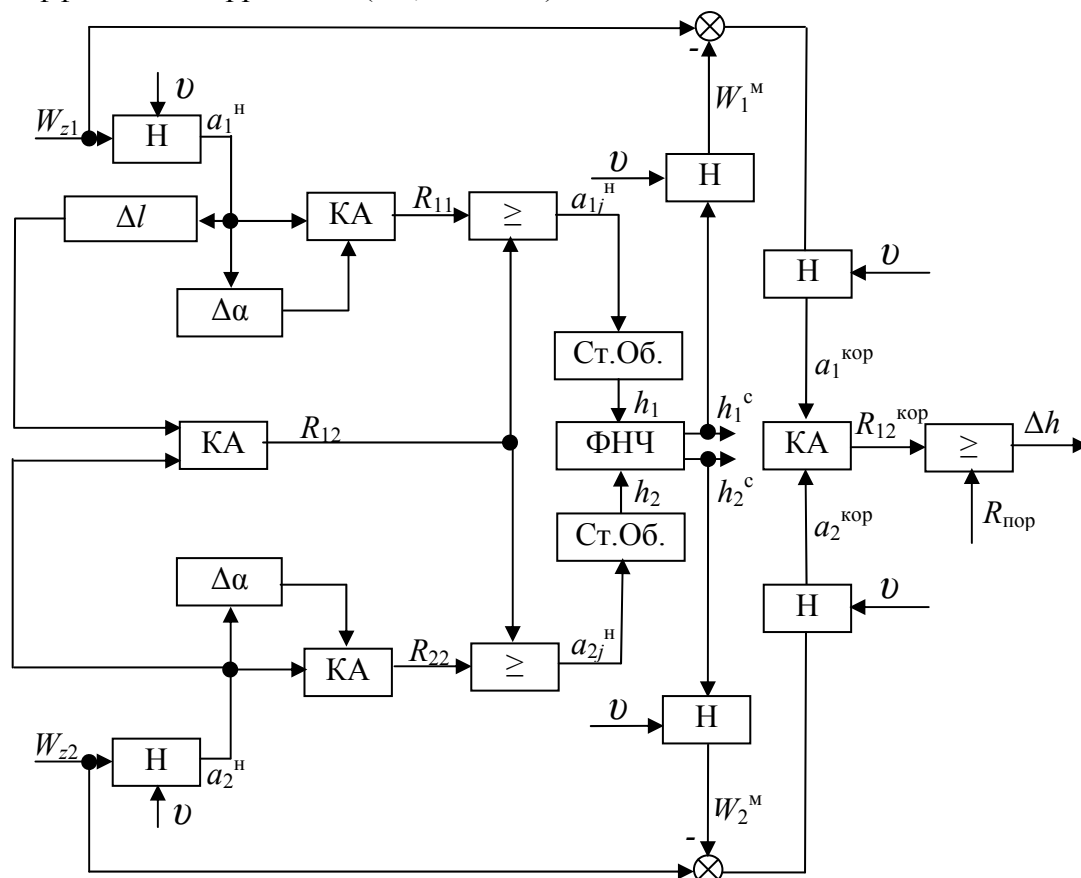
Глубина же неровности должна корректироваться исходя из определенной ранее протяженности дефекта и размера пятна контакта. Коэффициент для коррекции измерения глубины неровности при различных значениях этих двух влияющих факторов приведен в таблице 1 (в % от значения глубины дефекта).

Таблица 1

Длина неровности, мм	Размер пятна контакта, мм					
	10	20	30	40	50	60
30	10,3	31,6	51,6	63,4	70,6	75,4
40	5,9	19,7	36,6	51,2	60,8	67,2
50	3,9	13,3	26,1	39,6	51,0	59,0
...	...	...	...	...	...	...
150	0,4	1,6	3,4	5,9	9,0	12,5

Структурная схема алгоритма определения вертикальных неровностей рельсовых нитей приведена на рис. 11. Сигналы вертикальных микромеханических акселерометров (ММА), измеряющих линейные ускорения буксовых узлов тележки вагона ( $W_{z1}$  и  $W_{z2}$ ), нормируются в блоке Н по значению скорости движения вагона. Сигналы акселерометров

после нормировки ( $a_1^H$  и  $a_2^H$ ) участвуют в корреляционном анализе. При этом, корреляционному анализу подвергаются как показания ММА на соседних оборотах колеса вагона, так и показания датчиков, закрепленных на буксах двух следом идущих колес вагона при прохождении одного и того же элемента рельсового пути. Таким образом, рассчитываются 3 коэффициента корреляции ( $R_{11}$ ,  $R_{22}$  и  $R_{12}$ ).



$W_{z1}$  и  $W_{z2}$  – сигналы вертикальных микромеханических акселерометров.  $v$  – скорость движения вагона по рельсовому пути, измеренная одомером. Н – блок нормировки по значению скорости движения вагона.

$a_1^H$  и  $a_2^H$  – сигналы акселерометров после нормировки. КА – блок корреляционного анализа.

$\Delta l$  – пространственная задержка сигнала на длину базы тележки.  $\Delta \alpha$  – пространственная задержка сигнала на один оборот колеса.  $R_{11}$  и  $R_{22}$  – коэффициенты корреляции, характеризующие корреляцию сигнала первого и второго модулей, соответственно, на двух оборотах колеса,  $R_{12}$  – коэффициент взаимной корреляции показаний акселерометров, совмещенных по путевой координате.  $a_{1,2j}^H$  – нормированное ускорение для 1, 2 колес на  $j$ -м участке с превышением  $R_{11,22}$  над  $R_{12}$ . Ст.Об. – блок статистической обработки.  $h_1$ ,  $h_2$  – профили колес. ФНЧ – фильтр низких частот.  $h_1^c$ ,  $h_2^c$  – сглаженные профили колес.  $W_{1,2}^M$  – «Маски колес».

$a_{12}^{кор}$  – скорректированные значения сигналов датчиков.  $R_{12}^{кор}$  – скорректированное значение коэффициента взаимной корреляции показаний акселерометров, совмещенных по путевой координате.  $R_{пор}$  – пороговое значение коэффициента корреляции.  $\Delta h$  – глубина неровности.

**Рисунок 11** – Структурная схема алгоритма определения вертикальных неровностей

В блоке “ $\geq$ ” осуществляется сравнение значений полученных коэффициентов корреляции. В случае если корреляция сигнала датчика на двух соседних оборотах колеса превышает взаимную корреляцию показаний ММА закрепленных на буксах следом идущих колес вагона, принимается решение, что на протяжении двух оборотов колеса значения ускорений, полученные по показаниям акселерометра, формируются в большей степени геометрией колеса, нежели рельса. Тогда данные с ММА, соответствующие этому участку ( $a_{1,2j}^H$ ) передаются в блок статистической обработки. Выдача информации из блока статистической обработки осуществляется только после накопления десяти отрезков  $a_{1,2j}^H$ , ха-



рактически характеризующих геометрию колеса. Минимальное количество обрабатываемых отрезков определяется необходимостью получения профиля колеса с СКО  $\leq 0,1$  мм для обеспечения соответствующей точности измерения неровностей рельса (при минимальной рабочей скорости движения 1 м/с и СКО для акселерометра  $0,5 \text{ м/с}^2$ ). В результате формируется массив, в котором каждой метке от датчика угла соответствует несколько значений результата измерений  $a_{12}^H$  (в разных оборотах колеса). Этот массив в каждом из 144-х сечений проверяется на наличие выбросов по критерию  $3\sigma$  (в предположении о нормальном распределении результатов относительно истинного профиля колеса). Оставшиеся после отбраковки значения используются для определения среднего значения и среднеквадратического отклонения сигнала для каждой метки датчика угла (144 точки на оборот колеса). Для получения профиля колеса в единицах длины, нормировка полученных средних значений для каждой из 144-х точек осуществляется на квадрат соответствующей длины периодической неровности. С учетом низких пространственных частот полезной составляющей сигнала (не более  $1,3 \text{ м}^{-1}$ ) рассчитанные профили колес ( $h_1, h_2$ ) сглаживаются в блоке ФНЧ. В результате формируются профили колес ( $h_1^c, h_2^c$ ). “Маски колес” (составляющие сигналов ММА  $W_{z1,2}$ , вызванные некруглостью колес –  $W_{1,2}^M, \text{ м/с}^2$ ) из этих профилей могут быть вычислены с учетом скорости движения вагона и в дальнейшем используются для коррекции сигнала акселерометра. Полученные в результате подобной обработки скорректированные значения сигналов ММА ( $a_{12}^{\text{кор}}$ ) подаются на блок КА. Если максимум взаимной корреляционной функции сигналов вертикальных ускорений превышает рассчитанную нижнюю границу порогового значения ( $50 \text{ м}^2/\text{с}^4$ ), принимается решение о наличии неровности на данном участке пути ( $R_{12}^{\text{кор}}$  сравнивается с  $R_{\text{пор}}$  в блоке “ $\geq$ ”). В этом случае определяются параметры обнаруженного дефекта (глубина и протяженность).

Обработка сигналов датчиков ИСМ РП в соответствии с предложенным алгоритмом показала снижение вероятности совершения ошибки второго рода на 10%.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Анализ методов и средств диагностики рельсового пути показал, что выполнение регулярной диагностики рельсового пути и формирование статистической базы состояния его участков в настоящее время затруднено. Использование же инерциальных датчиков позволяет реализовывать на практике измерения в условиях динамического взаимодействия железнодорожного состава и рельсового пути, что дает возможность совершенствовать существующие способы контроля состояния пути и предлагать новые. Разработанная конструкционная и алгоритмическая основа ИСМ РП говорит об осуществимости мониторинга состояния рельсового пути. Что при обработке показаний инерциальной системы в процессе многократных проездов по контролируемому участку пути, позволяет оценивать тенденции развития дефектов рельсового пути.

Предложено математическое описание колебательного движения элементов конструкции вагона, предполагающее использование в качестве внешних воздействий информации, полученной от микромеханических модулей, установленных на буксах колесных пар ходовой тележки вагона, что сделало возможным определение условий эксплуатации БИНС на раме тележки (для акселерометров полоса пропускания должна быть не меньше 800 Гц, а для гироскопов – 25 Гц).

Предложенный алгоритм, использующий стыки в качестве навигационных отметчиков, позволяет снизить погрешности в определении местоположения дефектов рельсового

пути с величины порядка 1м/км (погрешность датчика пути) до 1 – 6 см для скоростей движения 40 – 200 км/ч (в отличие от погрешности одометра не накапливается, а носит случайный характер), а значит, и осуществлять совместную обработку данных, полученных в результате нескольких экспериментальных проездов по одному и тому же участку рельсового пути. Формирование геоинформационной базы рельсового пути дает возможность использовать информацию о местоположении участков с потенциально недостоверными сигналами ПА СНС при комплексировании их с БИНС (инерциальная система на таких участках должна быть переведена в автономный режим).

Разработанный метод диагностики неровностей рельсового пути, основанный на идентификации вертикальных неровностей по степени воспроизводимости траекторий движения колесных пар, учитывает влияние состояния поверхности катания колес вагона и размеров пятна контакта системы колесо-рельс на результат диагностики рельсов. Показано повышение величины корреляционного максимума на 10%, что свидетельствует о снижении вероятности совершения ошибки второго рода. Изменение геометрии колеса напрямую сказывается на точности одометра, поэтому полученные «маски» колеса могут использоваться для повышения точности измерения пройденной дистанции.

Таким образом, перспективность внедрения компактных измерительных систем на базе инерциальных датчиков объясняется, в первую очередь, возможностью создания миниатюрных автоматизированных комплексов диагностики и оповещения в режиме «online», которыми могут быть оснащены локомотивы регулярно курсирующих железнодорожных составов. Такой подход позволит повысить частоту повторных измерений (следовательно, и оперативность обнаружения дефектов) интенсивно эксплуатируемых участков пути, создать статистические базы состояния участков рельсового пути и выявить тенденции в появлении и развитии дефектов.

#### **Цитируемая литература:**

1. Технические указания по определению и использованию характеристик устройства и состояния пути, получаемых вагонами путеобследовательскими станциями ЦНИИ-4 (ЦПТ – 46/15). / Инструкция департамента пути и сооружений ОАО «РЖД». –М., 2008. –104 с.
2. Подгорная Людмила Николаевна, Разработка и исследование интегрированной инерциальной системы диагностики рельсового пути на микромеханических чувствительных элементах, 05.11.16 – информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение), Автореферат.
3. Боронахин Александр Михайлович, Интегрированные инерциальные технологии динамического мониторинга рельсового пути, 05.11.03 – приборы навигации, Автореферат.

#### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

##### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:**

1. А.М. Боронахин, Е.Д. Бохман, Д.Ю. Ларионов, Л.Н. Подгорная, Р.В. Шалымов. Мобильная инерциальная система мониторинга рельсового пути/ Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ", № 10, 2011, С. 84-91.
2. А.М. Боронахин, Л.Н. Подгорная, Е.Д. Бохман, Н.С. Филипеня, Ю.В. Филатов, Р.В. Шалымов, Д.Ю. Ларионов. Использование микромеханических чувствительных элементов в задачах диагностики рельсового пути/ Гироскопия и навигация, № 1 (75), 2012, С. 57-66.

**Другие статьи и материалы конференций:**

1. Л.Н. Олейник, Р.В. Шалымов. Результаты экспериментальных исследований малогабаритной интегрированной системы диагностики рельсового пути/ Материалы XI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»// Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2009, С.405 – 410.
2. Л.Н. Подгорная, Р.В. Шалымов, Е.Д. Масленок. Анализ результатов экспериментального проезда малогабаритной интегрированной системы диагностики рельсового пути / Материалы XII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»// Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2010, С. 319 – 326.
3. Д.Ю. Ларионов, Л.Н. Подгорная, Р.В. Шалымов. Инерциальный метод диагностики пути в условиях его динамического взаимодействия с вагоном/ Материалы XIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»// Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2011, С. 357 – 363.
4. Р.В. Шалымов. Комплексное средство диагностики рельсового пути на основе инерциальных и геоинформационных технологий/ Материалы XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»// Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2012, С. 217-224.
5. Л.Н. Подгорная, Р.В. Шалымов. Математическая модель движения элементов конструкции вагона/ Материалы XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»// Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2013, С. 391 – 398.
6. Л.Н. Олейник, Р.В. Шалымов. Результаты экспериментальных исследований малогабаритной интегрированной системы диагностики рельсового пути/ Тезисы докладов XI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»// Гироскопия и навигация, № 2 (65), 2009, С. 97.
7. Л.Н. Подгорная, Р.В. Шалымов, Е.Д. Масленок. Анализ результатов экспериментального проезда малогабаритной интегрированной системы диагностики рельсового пути/ Тезисы докладов XII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»// Гироскопия и навигация, № 2 (69), 2010, С. 98.
8. Д.Ю. Ларионов, Л.Н. Подгорная, Р.В. Шалымов. Инерциальный метод диагностики пути в условиях его динамического взаимодействия с вагоном/ Тезисы докладов XIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»// Гироскопия и навигация, № 2 (73), 2011, С. 115.
9. Р.В. Шалымов. Комплексное средство диагностики рельсового пути на основе инерциальных и геоинформационных технологий/ Тезисы докладов XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»// Гироскопия и навигация, № 2 (77), 2012.
10. Л.Н. Подгорная, Р.В. Шалымов. Математическая модель движения элементов конструкции вагона/ Тезисы докладов XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»// Гироскопия и навигация, № 2 (81), 2013.
11. А.М. Боронахин, Д.Ю. Ларионов, Л.Н. Подгорная, Шалымов Р.В. Интегрированная система ориентации и навигации с привлечением геоинформационных технологий для применения на железнодорожном транспорте/ Тезисы докладов XXVIII конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова// Гироскопия и навигация, № 4 (79), 2012.

12. А.М. Боронахин, Н.С. Филипеня, Л.Н. Подгорная, Е.Д. Бохман, Р.В. Шалымов, Д.Ю. Ларионов. Малогабаритная инерциальная система диагностики рельсового пути. Результаты внедрения/ Сборник докладов 64 НТК Профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ»// Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011, С. 170-173.
13. А.М. Боронахин, Е.Д. Бохман, Д.Ю. Ларионов, Л.Н. Подгорная, Р.В. Шалымов. Автономная система диагностики рельсового пути/ Сборник докладов 65 НТК Профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ»// Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012, С. 188-191.
14. А.М. Боронахин, Р.В. Шалымов. Особенности калибровки микромеханических акселерометров для задач диагностики рельсового пути/ Материалы международной научно-практической конференции «XXXIX НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ» ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ Часть 2// Санкт-Петербург: Национальный исследовательский университет «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», 2010, С. 420 – 422.
15. А.М. Боронахин, Е.Д. Бохман, Д.Ю. Ларионов, Л.Н. Подгорная, Р.В. Шалымов. Автоматизированная система диагностики рельсового пути для обеспечения безопасности железнодорожного движения/ Материалы первой международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте»// Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения, 2011, - С. 166 – 171.
16. А.М. Боронахин, Е.Д. Бохман, Д.Ю. Ларионов, Л.Н. Подгорная, Р.В. Шалымов. Автоматизированная система диагностики рельсового пути для обеспечения безопасности железнодорожного движения/ Первая международная научно-практическая конференция «Интеллектуальные системы на транспорте» СБОРНИК ТЕЗИСОВ// Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения, 2011, С. 35 – 36.
17. Е.Д. Бохман, Д.Ю. Ларионов, Л.Н. Подгорная, Ю.В. Филатов, Н.С. Филипеня, Р.В. Шалымов. Инерциальная система диагностики рельсового пути на основе микромеханических чувствительных элементов/ Материалы XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам// Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2011.
18. А.М. Боронахин, Е.Д. Бохман, Д.Ю. Ларионов, Л.Н. Подгорная, Р.В. Шалымов. Малогабаритная инерциальная система диагностики рельсового пути/ Радиоэлектронные комплексы многоцелевого назначения: сборник научных трудов. Юбилейный выпуск. 1991–2011. ОАО «Радиоавионика»// Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2011, – С. 400.
19. A.M. Boronakhin, L.N. Podgornaya, E.D. Bokhman, N.S. Filipenya, Yu.V. Filatov, R.V. Shalymov, D.Yu. Larionov. MEMS-Based Inertial System for Railway Track Diagnostics/ Gyroscopy and Navigation, Vol. 2, No. 4, 2011, pp. 261–268. © Pleiades Publishing, Ltd., 2011.
20. А.М. Боронахин, Е.Д. Бохман, Д.Ю. Ларионов, Л.Н. Подгорная, Ю.В. Филатов, Р.В. Шалымов. Методы и средства диагностики рельсового пути на основе инерциальных и геоинформационных технологий/ Бюллетень ОУС ОАО «РЖД», № 5, 2012, С. 28-38.
21. A. Boronahin, D. Larionov, Yu. Filatov, L. Podgornaya, E. Bokhman, R. Shalymov. Inertial System for Railway Track Diagnostics/ Proc. on Symp. Inertial Sensors and Systems, Germany, 18–19 Sept, 2012, Karlsruhe, P. 17.1–17.20.

**Патенты РФ:**

1. А.М. Боронахин, Л.Н. Подгорная, Е.Д. Бохман, Д.Ю. Ларионов, Р.В. Шалымов. Устройство для контроля поверхности катания рельсов/ патент на полезную модель RUS 112882 29.09.2011.
2. А.М. Боронахин, Л.Н. Подгорная, Е.Д. Бохман, Д.Ю. Ларионов, Р.В. Шалымов. Устройство для определения местоположения дефектов рельсового пути/ патент на полезную модель RUS 122627 13.08.2012