

На правах рукописи

Подгорная Людмила Николаевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ
РЕЛЬСОВОГО ПУТИ НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ**

Специальность: 05.11.16 – Информационно-измерительные
и управляющие системы
(приборостроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –

кандидат технических наук, доцент Боронахин Александр Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Антонюк Евгений Михайлович

кандидат технических наук Унтилов Александр Алексеевич

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

Защита состоится «_____» _____ 2010 г. в _____ часов на заседании

совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.06

Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.5, ауд. D105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2010 г.

Учёный секретарь совета,

к.т.н., доцент

Боронахин А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время доля грузоперевозок по железным дорогам составляет ~40% от всего грузооборота страны. При этом наблюдается тенденция к росту данного показателя, что приводит к необходимости увеличения скоростей и плотности движения железнодорожных составов. Как следствие, увеличиваются риски возникновения техногенных катастроф, которые приводят к гибели людей и, учитывая характер перевозимых грузов – газов, легковоспламеняющихся, взрывоопасных, едких, ядовитых и радиоактивных веществ и т.п. – к невосполнимому ущербу экологии, что также сказывается на здоровье человека.

Одной из основных мер по обеспечению требуемого уровня безопасности, как в России, так и за рубежом, остается диагностика состояния железнодорожного пути методами оценки его геометрических параметров, состояния балластного слоя, а также контроль скрытых (внутренних) дефектов рельсовых нитей. При этом широко используются как ручные, так и самоходные измерительные системы: путевые шаблоны, путеизмерительные тележки и вагоны-лаборатории. Однако и этого оказывается недостаточно, так как применение ручных средств характеризуется большой трудоемкостью и необходимостью закрытия перегонов для проведения измерений, а самоходных просто не хватает. Это приводит к несоответствию частоты выполнения измерений и скорости возникновения дефектов.

Согласно нормативным документам, в случае обнаружения отклонений состояния пути от требуемых норм безопасности, до момента их устранения накладываются ограничения на скорость движения железнодорожных составов (в зависимости от категории – 120; 100; 70, 40 км/ч, вплоть до закрытия участка пути). Таким образом, возникает противоречие: рост грузооборота ведет к увеличению случаев возникновения дефектов, а измерительных средств для их своевременного обнаружения имеется недостаточно. Очевидно, что ежедневная регистрация основных ключевых параметров позволила бы оперативно выявлять потенциально опасные с точки зрения возникновения аварийных ситуаций участки пути, а также судить об эффективности проведенных ремонтных работ. Поэтому представляется актуальной разработка системы диагностики рельсового пути, отличающейся невысокой стоимостью и малыми габаритами, для оборудования регулярно курсирующих вагонов.

Целью работы является разработка и исследование системы диагностики рельсового пути на микромеханических чувствительных элементах. При этом большое значение имеет обеспечение работоспособности комплекса при повышенных скоростях движения (для железнодорожного транспорта до 200 км/час), что позволит осуществлять контроль без нарушения графика движения транспорта.

Поставленная цель достигается решением **следующих задач**:

1. Проведение анализа существующих методов и средств диагностики состояния рельсового пути;
2. Разработка схемы построения системы диагностики рельсового пути (СД РП) на микромеханических чувствительных элементах;
3. Разработка метода идентификации вертикальных неровностей рельсового пути;

4. Разработка математических моделей показаний и определение точностных характеристик инерциальных измерительных модулей (ИИМ) на базе микромеханических гироскопов и акселерометров;
5. Проведение экспериментальных исследований СД РП в составе вагона-дефектоскопа.

Методы исследований

Решение поставленных задач основано на использовании основных положений теории инерциальной навигации, теории статистической обработки, теории оптимальной обработки информации, методах математического и имитационного моделирования.

На защиту выносятся:

1. Схема построения системы диагностики рельсового пути, основанная на размещении измерительных модулей на микромеханических чувствительных элементах непосредственно на буксовые узлы колесных пар тележки вагона, даёт возможность повысить точность определения вертикальных неровностей;

2. Метод определения просядок рельсовых нитей, основанный на идентификации вертикальных неровностей по степени воспроизводимости траекторий движения колесных пар, повышает надежность и достоверность диагностики рельсового пути;

3. Методика калибровки ИИМ, предполагающая определение масштабных коэффициентов микромеханических гироскопов и акселерометров с учётом неортогональностей их измерительных осей, позволяет снизить методические погрешности.

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

- Для более точного определения вертикальных неровностей разработана схема построения системы диагностики рельсового пути на микромеханических чувствительных элементах, которые размещаются непосредственно на буксовые узлы колесных пар тележки вагона;

- С целью повышения надежности и достоверности определения просядок рельсовых нитей с использованием ИИМ на микромеханических чувствительных элементах разработан метод, основанный на идентификации вертикальных неровностей по степени воспроизводимости траекторий движения колесных пар;

- Разработана методика калибровки ИИМ, которая вследствие учёта неортогональностей измерительных осей микромеханических гироскопов и акселерометров при определении их масштабных коэффициентов позволяет снизить методические погрешности.

Практическая ценность работы

- Разработана и реализована система диагностики рельсового пути на микромеханических чувствительных элементах, позволяющая повысить точность определения вертикальных неровностей;

- Разработан и реализован метод определения вертикальных неровностей рельсового пути длиной до 2,4 м с точностью 1 мм;

- Разработан и реализован метод диагностики рельсового пути, основанный

на корреляционном анализе траекторий первого и следом идущего колес, использование которого дает возможность использования ИИМ на микромеханических чувствительных элементах;

– Разработана и апробирована методика калибровки микромеханических акселерометров и гироскопов, позволяющая повысить точность измерения до $0,01 \text{ м/с}^2$ и $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$ соответственно.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты исследований использовались при выполнении научно-исследовательских работ: НИР «Создание новых концепций построения интеллектуальных навигационно-управляющих систем для обеспечения безопасности железнодорожного транспорта»; и хозяйственных работах 6817/ЛИНС-59 «Разработка и исследование малогабаритной интегрированной системы диагностики рельсового пути» и 6975 /ЛИНС-68 «Разработка модернизированной малогабаритной инерциальной системы диагностики рельсового пути», заключенных с ОАО «Радиоавионика».

Результаты, полученные в работе, могут быть также использованы в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) при проведении научно-исследовательских работ и в учебном процессе, в частности, в научно-образовательных курсах по направлению «Приборостроение».

Апробация

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» (2005, 2006, 2008-2010), Санкт-Петербург, Россия.

– Студенческий молодежный мини-симпозиум IEEE «Развитие и современное состояние приборостроения и информационно-измерительных систем» (2006), Санкт-Петербург, Россия.

– 2-я Российская мультиконференция по проблемам управления (2008), Санкт-Петербург, Россия.

– Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), (2008-2010), Санкт-Петербург, Россия.

– Международный научно-практический семинар «Конструкция железнодорожного пути и вопросы технического обслуживания высокоскоростных магистралей», (2010), Санкт-Петербург, Россия.

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертации изложены в 10 публикациях, среди которых 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 2 статьи в других изданиях, 6 – в научных сборниках и трудах российских и международных конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка

литературы, включающего 41 наименование. Основная часть работы изложена на 113 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 53 рисунка и 14 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.

В настоящее время в России и за рубежом существуют две основных 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 сплошного скоростного контроля состояния рельсовой колеи под динамической нагрузкой. Измерения на ПВ возможны как контактными (при помощи роликов, измерительных тележек или снятия измерений с ходовых тележек), так и бесконтактными способами (лазерными сканерами и дальномерами). Перечни контролируемых параметров в разных странах могут отличаться, но в них всегда включены шаблон (ширина колеи) и уровень (возвышение одного рельса над другим). В России согласно действующей инструкции [1] также контролируются рихтовки (стрелы изгиба каждой рельсовой нити) и просадки (перепады высоты рельса в продольной плоскости), тогда как в большинстве европейских стран вместо отдельных просадок контролируется их разность.

Ручная путеизмерительная тележка производит измерения при отсутствии динамической нагрузки на рельсы. Не обладая габаритами вагона, она включает значительно меньше измерительных приборов при меньшей стоимости. Сопоставление результатов измерения нагруженного (вагон-путеизмеритель) и ненагруженного (путеизмерительная тележка) пути позволяет выявлять наличие и анализировать характер дефектов.

Таким образом, становится ясно, что формирование статистической базы состояния рельсового пути с использованием существующих систем возможно, но затруднено следующими факторами: низкая продуктивность тележек; высокая стоимость и недостаточное количество путеизмерительных вагонов; необходимость закрытия участков рельсового пути для перевозок.

Решение может быть достигнуто разработкой малогабаритных измерительных систем для оснащения пассажирских и грузовых поездов. Основными требованиями к таким системам являются малые габариты и невысокая стоимость. При этом необходимо обеспечить точность измерения параметров пути на достаточном для выявления дефектов уровне: ключевым фактором является определение коротких просадок с погрешностью не более 1 мм. Подобный путь – оснащение одного из пассажирских вагонов измерительной системой, например *TrackMon* – уже выбран в ряде европейских стран.

В **главе 2** приводятся результаты разработки системы диагностики рельсового пути (СД РП), основанной на использовании устанавливаемых на буксы колесных пар тележки вагона инерциальных измерительных модулей (ИИМ) на микромеханических чувствительных элементах для определения неровностей рельсовых нитей. СД РП должна

в режиме реального времени определять основные параметры пути, а также в случае критических отклонений от норм сигнализировать машинисту о необходимости снижения скорости движения. Это позволит повысить безопасность ж.д. перевозок.

В состав аппаратной части СД РП помимо ИИМ включены (рис. 1): бескарданный инерциальный измерительный модуль (БИИМ) на волоконно-оптических гироскопах, устанавливаемый на раме тележки, приемная аппаратура спутниковой навигационной системы (ПА СНС), датчик пути (одометр) и четыре датчика линейных перемещений (ДЛП).

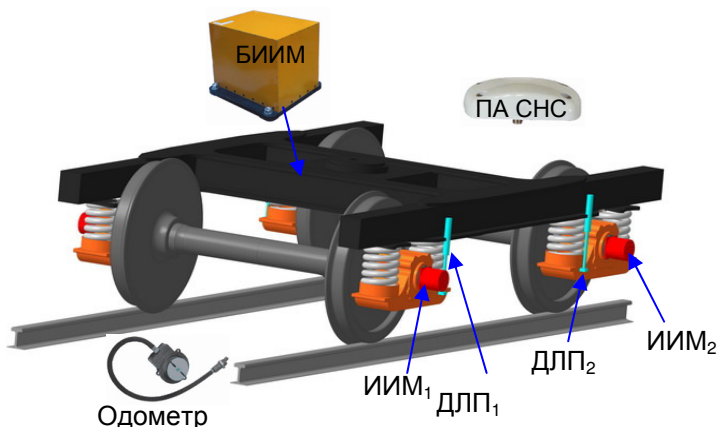


Рисунок 1 – Конфигурация СД РП

В целях обеспечения синхронизации по времени моментов опросов подсистем, их сигналы поступают на специализированную 16-канальную плату, позволяющую реализовывать алгоритмы обработки с тактовой частотой 4 кГц.

Структурная схема СД РП показана на рис. 2. В ОФК1 осуществляется коррекция показаний БИИМ по сигналам СНС, то есть реализуется традиционная схема интегрированной системы ориентации и навигации (ИСОН) в обсервационном режиме. В блоке ИСОН также осуществляется коррекция показаний одометра по координатам, вырабатываемым СНС [2].

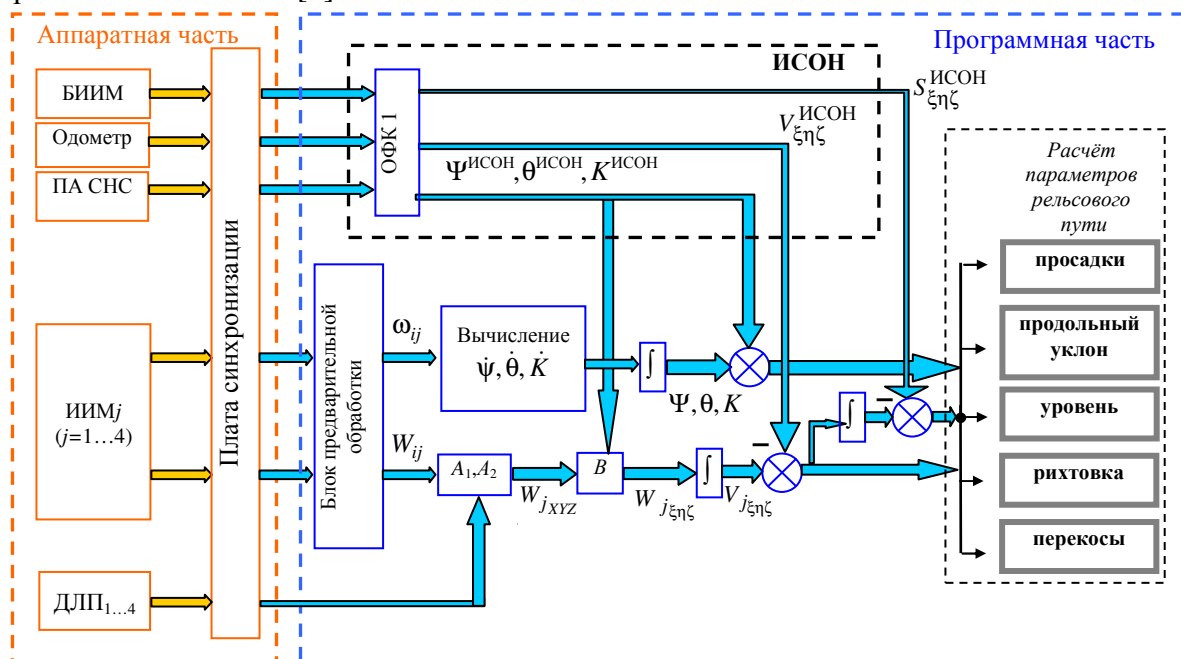


Рисунок 2 – Структурная схема СД РП

В настоящее время в путеизмерительных комплексах используется хордовая просадка, которая измеряется на базе тележки по каждой рельсовой нити как разность вертикальных перемещений двух колес тележки относительно кузова вагона (рис.3). Для этого применяют показания ДЛП. В работе [3] показано, что с использованием хордового метода возможно определять только те неровности, длины которых превышают базу тележки – 2,4 м. Поэтому для получения достоверных значений контролируемых параметров был разработан бесхордовый инерциальный метод измерения просадки.

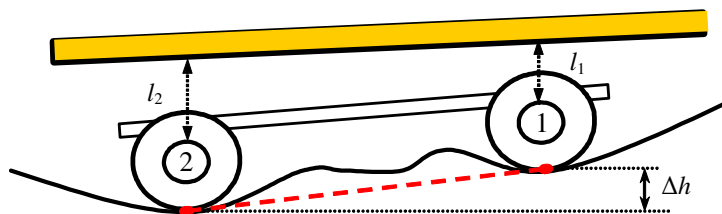


Рисунок 3 – Иллюстрация хордового метода измерения просадки (Δh)

Структурная схема алгоритма определения

вертикальных неровностей рельсовых нитей приведена на рис. 4. Сигналы вертикальных микромеханических акселерометров (ММА) поступают в блок K , где происходит их масштабирование.

В блоках интегрирования рассчитываются вертикальные скорости первого и следом идущего колес. Алгоритм коррекции систематически накапливающихся погрешностей, вызванных нестабильностями характеристик микромеханических чувствительных элементов, базируется на нормативно утвержденной на сегодняшний день процедуре оценки вертикальных неровностей (коротких просадок) как отклонений от некоторой средней линии, аппроксимирующей положение рельсового пути.

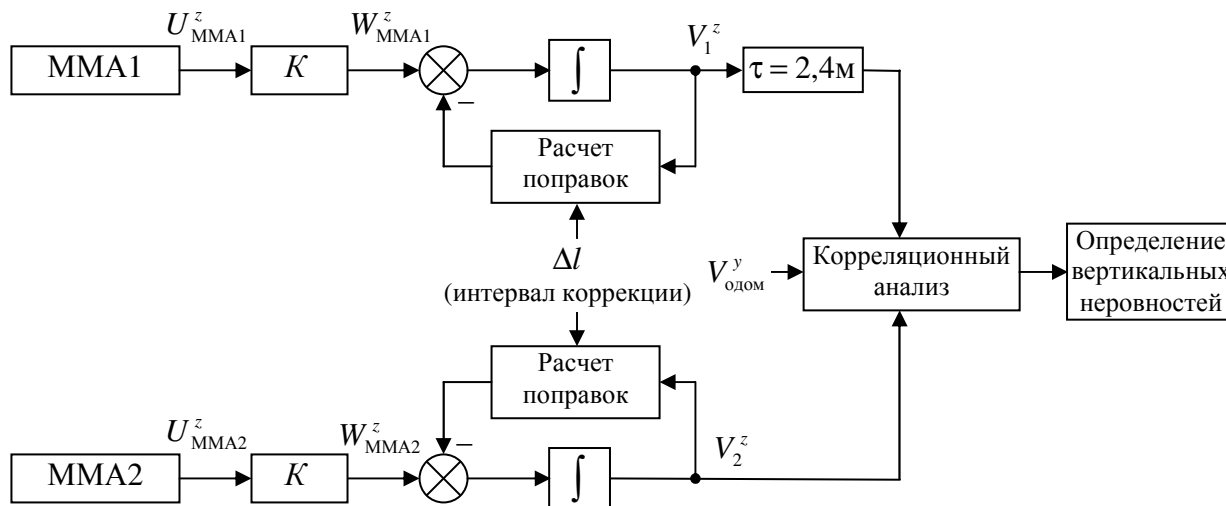


Рисунок 4 – Алгоритм определения вертикальных неровностей

Алгоритм коррекции в соответствии с априорно-известным положением пути предполагает, что среднее значение вертикальной скорости равно нулю на интервале коррекции, выбираемом исходя из длин неровностей, которые необходимо выявлять. Для определения неровности длиной не более некоторого заданного значения $\lambda \leq \lambda_0$, интервал коррекции вертикальной скорости соответствует данному значению λ_0 .

Далее в сигнал ММА, расположенного на первом по ходу движения колесе, вводится задержка, которая определяется временем, требуемым для прохождения дистанции, равной базе тележки $\tau = 2,4\text{ м}$ (рис.4), то есть сигналы ИИМ1 и ИИМ2

приводятся к единой путевой координате. После этого они поступают в блок корреляционного анализа. То есть, для определения профиля рельсовых нитей в вертикальной плоскости предлагается метод получения вертикальных траекторий движения буксовых узлов тележки вагона, основанный на анализе взаимной корреляционной функции сигналов вертикальных скоростей букс первого и следом идущего колеса тележки вагона.

Если железнодорожный путь имеет неровность в вертикальной плоскости, сигналы акселерометров, расположенных как на первом, так и на следом идущем колесах будут иметь характерный данной неровности вид. Отсутствие корреляции может объясняться нестабильностью выходного сигнала одного из датчиков или силами динамического взаимодействия вагона и рельсового пути. То есть повторяемость сигналов двух акселерометров является критерием для определения неровности, в частности, просадки рельсового пути.

Если после введения задержки в сигнал первого по ходу движения ММА максимум корреляционной функции принадлежит некоторому допустимому диапазону $-\tau_0 \leq \tau \leq \tau_0$, то можно считать, что «пространственный» сдвиг двух сигналов отсутствует. Для задания τ_0 необходимо учитывать максимальное разрешение, получаемое при определении путевой координаты. Так как при поступлении данных в плату синхронизации осуществляется потоковая запись с частотой $f = 4$ кГц, то при скорости движения вагона $V = 40$ км/ч приращение пройденного пути составляет $\Delta S = \frac{V}{f} = 3$ см. Максимальное значение допустимого диапазона, в который может попадать максимум корреляционной функции, рассчитанный для скорости движения $V = 200$ км/ч, соответствует 14 см пройденного пути.

Таким образом, если взаимная корреляционная функция $R(\tau)$ имеет пик, принадлежащий интервалу $-\tau_0 \leq \tau \leq \tau_0$, определяется ширина корреляционного максимума. Данное значение соответствует длине неровности λ . Рассчитывается значение корреляционной функции, которая была бы получена, если бы оба колеса проехали по пути, имеющему вертикальную неровность, описываемую выражением:

$$h = A \left(1 - \cos \frac{2\pi Vt}{\lambda} \right), \quad (1)$$

где A – минимальное значение амплитуды неровности, регламентированной нормативными документами; то есть определяется пороговое значение максимума, которое может принимать корреляционная функция при наличии неровности рельсового пути на исследуемом участке.

Так как использование ИИМ вносит инструментальную погрешность в определение вертикальной неровности, нижнюю границу порогового значения корреляционной функции необходимо задавать с доверительным интервалом δR :

$$R(0) \pm \delta R = \sum_{j=-\Delta l}^{\Delta l} \left(V_{1j}^z \pm \delta \dot{h} \right) \cdot \left(V_{2j}^z \pm \delta \dot{h} \right),$$

где $\delta\dot{h}$ – допустимая погрешность определения вертикальной скорости, которая получена из выражения (1) и зависит от скорости движения вагона и допустимой погрешности определения вертикальной неровности δA :

$$\frac{\delta\dot{h}}{V} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \delta A.$$

Таким образом, если максимум взаимной корреляционной функции сигналов вертикальных скоростей превышает рассчитанную нижнюю границу порогового значения, принимается решение о наличии неровности на данном участке пути. Сигналы вертикальных скоростей акселерометров интегрируются, и определяется амплитуда пройденной неровности (просадки).

На основании анализа предыдущих работ [4] можно заключить, что при определении неровностей, длины которых не превышают базу тележки, динамическую нагрузку на рельс можно считать квазипостоянной. То есть отличие траекторий движения колёс вследствие динамического взаимодействия пути и подвижного состава является несущественным. Если сделать допущение, что измерительная ось z акселерометра всегда направлена по вертикали места, то при прохождении неровности, описываемой уравнением (1) изменение вертикального ускорения относительно g при проезде колеса по имеющему неровность участку пути составит:

$$\ddot{h} = A \frac{4\pi^2 V^2}{\lambda^2} \cos \frac{2\pi Vt}{\lambda}.$$

Пусть необходимо обеспечить точность измерения вертикальных неровностей длиной от 0,6 м (межшпального прогиба) до 2,4 м (базы тележки) при скорости движения от 40 до 200 км/ч не хуже 1 мм. В результате подстановки установленных параметров неровности и скорости движения для обеспечения заданной точности акселерометр должен удовлетворять требованиям: полоса пропускания не менее 1,7 кГц, случайная погрешность измерения не хуже $0,35 \text{ м/с}^2$ в диапазоне измерения ускорений $\pm 340 \text{ м/с}^2$.

Если выявляется неровность минимальной длины из заданного диапазона на максимальной скорости, то вследствие наличия погрешностей датчиков при анализе максимума корреляционной функции ошибка первого рода – принятие ложного решения о наличии неровности – может произойти с вероятностью 10%, ошибка второго рода – с вероятностью 6%.

В работе также выполнена оценка методической погрешности определения вертикальных неровностей рельсовых нитей с использованием разработанного метода. Составляющая сигнала акселерометра, вызванная изменением ориентации измерительной оси, определяется выражением:

$$W' = g \cdot \cos \psi,$$

где h определяется соотношением (1), ψ – угол отклонения от вертикали места.

Так как при применении алгоритма коррекции исключается постоянная составляющая ускорения, то вклад в методическую погрешность вносит только переменная – квазигармоническая – составляющая. Угол ψ можно оценить из выражения:

$$\sin \psi = \frac{h}{b},$$

где b – база тележки. После подстановки максимального значения просадки, принимаемого за отступление четвертой степени [1], и $b=2,4\text{м}$ изменение проекции g на измерительную ось акселерометра при движении по неровности не превысит $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$. Данное значение можно считать малыми 2-го порядка по сравнению с ускорениями, действующими вследствие движения по неровности по вертикальной оси акселерометра.

Составляющие центростремительного и Кориолисова ускорений, возникающие вследствие движения по неровностям и по криволинейным участкам пути, также пренебрегались в силу малости 2-го порядка.

Глава 3 посвящена вопросам исследования погрешностей инерциальных измерительных модулей на микромеханических датчиках.

В соответствии со сформулированными требованиями к датчикам, были разработаны четыре инерциальных измерительных модуля, включающие в себя чувствительные элементы фирмы *Analog Devices*: три микромеханических гироскопа ADXRS614, измерительные оси которых расположены ортогонально, два акселерометра ADXL203 (с диапазоном измерения $\pm 1,7g$) и акселерометр ADXL278 (с диапазоном $\pm 35g$), использование которого объясняется необходимостью изучения действия ударных нагрузок при прохождении рельсовых стыков.

Анализ традиционных методов калибровки микромеханических акселерометров и гироскопов показал, что используемые математические модели погрешностей датчиков включают в себя сдвиг нуля, масштабный коэффициент, нелинейность масштабного коэффициента, перекрестную связь и неортогональность измерительных осей. При обработке данных экспериментальных калибровочных испытаний в первую очередь определяется сдвиг нуля и масштабный коэффициент датчика. При расчете масштабного коэффициента не учитывается вклад отклонения измерительной оси датчика от принятой приборной системы координат (рис. 5: $Oxyz$ – приборная система координат, $Ox_a y_a z_a$ – направление измерительных осей датчиков, $\alpha_{x,y}, \beta_{x,z}, \gamma_{y,z}$ – неортогональности измерительных осей). То есть масштабный коэффициент определяется как отношение выходного сигнала датчика к воздействию, задаваемому в связанной с прибором системе координат.

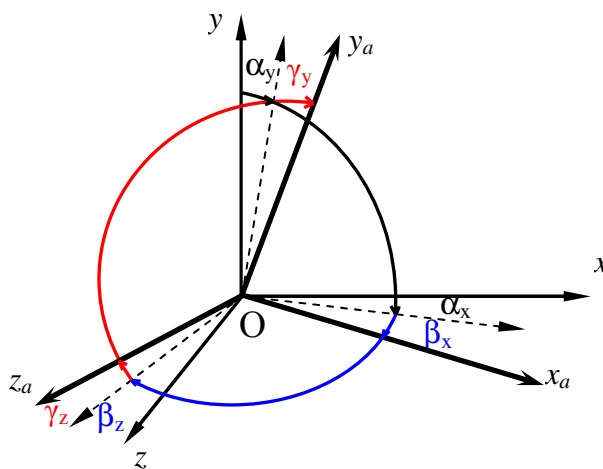


Рисунок 5 – Отклонение измерительных осей датчика от приборной системы координат

В работе предложена методика калибровки, позволяющая вначале определить угловые положения измерительных осей отдельных датчиков относительно приборной системы координат. Затем пересчитать значения задаваемых испытательными средствами эталонных сигналов и получить более достоверную информацию о масштабных коэффициентах и нелинейностях выходных характеристик калибруемых датчиков.

В качестве математической модели, описывающей показания триады акселерометров, принимается выражение:

$$\begin{bmatrix} U_x^a \\ U_y^a \\ U_z^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} MK_x^a + MK_x^a(U_x^a) & 0 & 0 \\ 0 & MK_y^a + MK_y^a(U_y^a) & 0 \\ 0 & 0 & MK_z^a + MK_z^a(U_z^a) \end{bmatrix} \cdot D_a \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta a_x \\ \Delta a_y \\ \Delta a_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где MK_i^a – масштабные коэффициенты акселерометров ($i = x, y, z$);

$MK_i^a(U_i^a)$ – функция, характеризующая зависимость масштабного коэффициента от уровня выходного сигнала (нелинейность масштабного коэффициента);

$$D_a = \begin{bmatrix} \cos \alpha_x \cos \beta_x & \cos \beta_x \sin \alpha_x & -\sin \beta_x \cos \alpha_x \\ -\sin \alpha_y \cos \gamma_y & \cos \alpha_y \cos \gamma_y & \cos \alpha_y \sin \gamma_y \\ \cos \gamma_z \sin \beta_z & -\sin \gamma_z \cos \beta_z & \cos \beta_z \cos \gamma_z \end{bmatrix} \quad \text{– матрица, характеризующая}$$

положение измерительных осей акселерометров относительно системы координат $Oxyz$, связанной с ИИМ;

a_i – действующее на ось i акселерометра ускорение;

Δa_i – смещение «нулевых» сигналов акселерометров.

В результате серии последовательных разворотов ИИМ вокруг трех ортогональных осей на угол θ задаются такие положения, при которых становится возможным определение в первую очередь сдвига нуля акселерометра, затем углов неортогональности измерительных осей, масштабного коэффициента, например, для акселерометра с измерительной осью x_a :

$$\Delta a_x = \frac{1}{4} \left(U_x^x \Big|_{\theta=0} + U_x^x \Big|_{\theta=\pi} + U_x^y \Big|_{\theta=0} + U_x^y \Big|_{\theta=\pi} \right),$$

где $U_i^j \Big|_{\theta=\theta_0}$ – выходной сигнал акселерометра с измерительной осью Oi_a при разворотах

ИИМ вокруг приборной оси Oj на угол θ_0 .

$$\alpha_x = \arctg \frac{\left(U_x^x \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} + U_x^z \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} - U_x^x \Big|_{\theta=\frac{3\pi}{2}} - U_x^z \Big|_{\theta=\frac{3\pi}{2}} \right)}{\left(U_x^z \Big|_{\theta=\pi} + U_x^y \Big|_{\theta=\frac{3\pi}{2}} - U_x^z \Big|_{\theta=0} - U_x^y \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} \right)};$$

$$\beta_x = \arctg \frac{\left(U_x^x \Big|_{\theta=\pi} + U_x^y \Big|_{\theta=\pi} - U_x^x \Big|_{\theta=0} - U_x^y \Big|_{\theta=0} \right)}{\left(U_x^z \Big|_{\theta=\pi} + U_x^y \Big|_{\theta=\frac{3\pi}{2}} - U_x^z \Big|_{\theta=0} - U_x^y \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} \right)}.$$

Далее с учетом полученных углов отклонения α_x и β_x рассчитываются проекции ускорений, действующие непосредственно на измерительную ось акселерометра при вращении вокруг ортогональных осей:

$$a_x^y = g \cdot (-\sin \theta \cos \alpha_x \cos \beta_x - \cos \theta \cos \alpha_x \sin \beta_x),$$

$$a_x^z = g \cdot (\cos \theta \cos \alpha_x \cos \beta_x - \sin \theta \cos \beta_x \sin \alpha_x).$$

Строится график зависимости отношения выходного сигнала данного акселерометра (с вычетом сдвига нуля) к входному воздействию $(U_x^y - \Delta a_x) / a_x^y$ от рассчитанного входного воздействия a_x^y , перепроектированного с использованием полученных углов в систему координат, связанную с измерительными осями акселерометров (аналогично для реализации, полученной при вращении вокруг оси Oz). Данный график характеризует изменение масштабного коэффициента в зависимости от величины входного сигнала и должен быть аппроксимирован (обычно достаточно полинома первого порядка). При этом значение самого масштабного коэффициента, исходя из симметричности выходной характеристики, определяется как среднее значение по полученному графику:

$$MK_x^a = \frac{1}{2} \left(\frac{U_x^y \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} - \Delta a_x}{a_x^y \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}}} + \frac{U_x^y \Big|_{\theta=\frac{3\pi}{2}} - \Delta a_x}{a_x^y \Big|_{\theta=\frac{3\pi}{2}}} \right),$$

Коэффициенты математической модели, характеризующие показания акселерометров с измерительными осями y_a и z_a выводятся аналогичным образом.

Корректность использования предложенной математической модели проверена применением рассчитанных коэффициентов к реализациям, полученным в ходе калибровочных испытаний, погрешность определения линейных ускорений не превысила $0,01 \text{ м/с}^2$.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований по проверке достоверности предложенного во 2-й главе метода определения вертикальных перемещений на специализированном вибростенде, позволяющем задавать амплитуду и частоту вибраций. Был проведен спектральный анализ полученных данных, в результате чего определены значения масштабных коэффициентов акселерометров с диапазоном измерения $\pm 35g$ при действии ускорений, превышающих гравитационное.

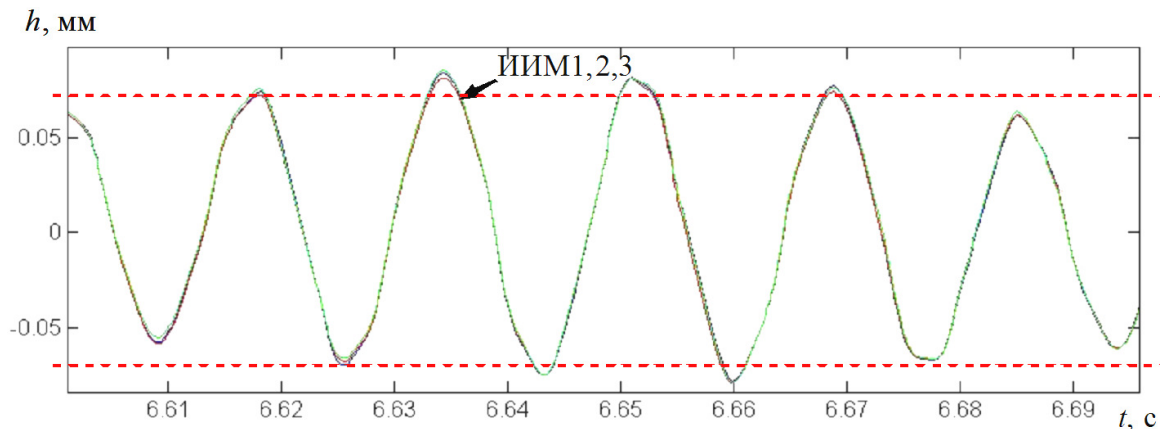


Рисунок 6 – Результат определения амплитуды вибраций при частоте 60Гц и амплитуде ускорений $1g$

С использованием разработанного метода коррекции показаний акселерометров были получены амплитуды вибраций (рис. 6) по показаниям трех ИИМ, расположенных на вибростенде. На графике также показаны пределы изменения вертикальных

перемещений стенда, рассчитанные по известным значениям амплитуды и частоты. Погрешность определения амплитуды вибраций не превысила 0,015мм, что подтверждает возможность определения вертикальных неровностей рельсового пути с требуемой точностью (не хуже 1мм).

Математическая модель, описывающая показания гироскопов, имеет аналогичный выражению (2) вид. Однако в связи с тем, что измерительные модули устанавливаются на буксы вагона и испытывают ударные нагрузки, в правой части уравнения добавляется слагаемое, связанное с чувствительностью микромеханических гироскопов к линейным ускорениям:

$$\Delta\omega^a = \begin{bmatrix} 0 & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & 0 & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix},$$

где K_{ij} – коэффициенты чувствительности нулевых сигналов гироскопов к линейному ускорению.

Экспериментальные исследования по калибровке триады гироскопов состоят из двух этапов: сначала определяются коэффициенты чувствительности гироскопов к действующим по ортогональным осям линейным ускорениям, для чего используются реализации последовательных разворотов, проведенные при калибровке акселерометров; далее выполняются вращения с различной угловой скоростью.

Для определения сдвигов нулей $\Delta\omega_i$ и коэффициентов чувствительности датчиков к линейному ускорению K_{ij} строится зависимость показаний гироскопов от угла разворота ИИМ вокруг соответствующей оси [5]. Данный график описывается суммой двух гармонических сигналов с различными амплитудами и некоторой постоянной величины:

$$U_x^r = \Delta\omega_x + K_{xy}a_y + K_{xz}a_z,$$

где сигналы a_y и a_z сдвинуты по фазе на $\pi/2$. Так как разворот осуществляется в диапазоне от 0 до 360° , то в результате усреднения показаний данного гироскопа по всей реализации коэффициенты K_{ij} компенсируются, и среднее значение характеризует сдвиг нуля $\Delta\omega_x$. Для получения коэффициентов K_{ij} достаточно найти такие точки на графике, где одно из слагаемых обращается в нуль. Данное условие выполняется, когда проекция линейного ускорения на данную ось (a_i) отсутствует, то есть она находится в плоскости горизонта.

На рис. 7 показан график зависимости выходного сигнала одного из гироскопов от угла наклона платформы и скорректированный на полученные коэффициенты сигнал.

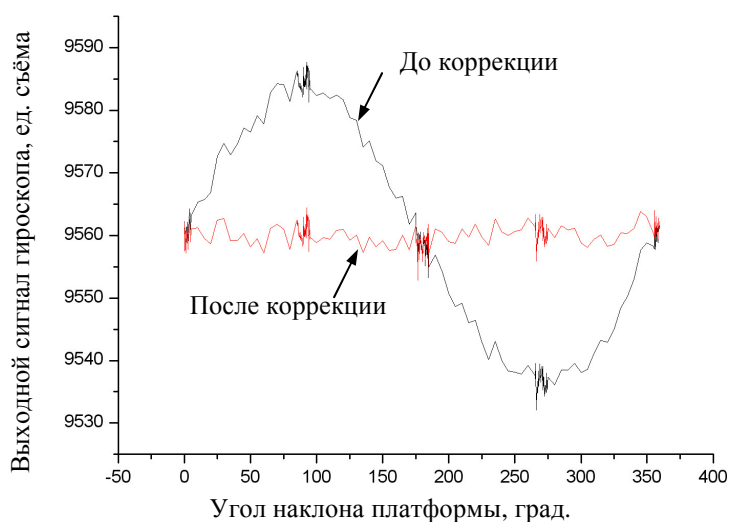


Рисунок 7 – График зависимости выходного сигнала гироскопа от угла наклона платформы

Остальные элементы математической модели определяются аналогично процедуре, описанной для акселерометров. Погрешность калибровки составила не более 0.1%.

В главе 4 приводятся результаты экспериментальных исследований СД РП в составе вагона-дефектоскопа ОАО «Радиоавионика» (рис.8 – один из четырех ИИМ на буксе тележки вагона в ходе экспериментального проезда).

С целью проверки достоверности инерциального метода определения просадки необходимо провести сравнение хордовой просадки с разновысотностью буксовых узлов первого и второго по ходу движения колес. Как уже было отмечено во второй главе, использование хордовых методов измерения приводит к искажению оценки формы и величины неровностей, длины которых менее базы тележки [3]. Следовательно, для обоснования достоверности предлагаемого метода при сравнении результатов определения вертикальных неровностей с использованием разработанного инерциального метода с хордовой просадкой, интервал коррекции вертикальной скорости λ_0 должен соответствовать длинам неровностей, которые способен выявить хордовый метод.

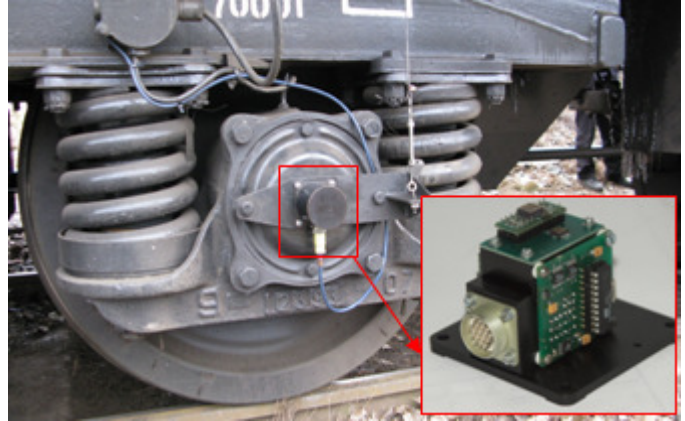


Рисунок 8 – Инерциальный измерительный модуль на буксовом узле вагона

Графики полученных траекторий движения буксовых узлов и хордовые просадки (Δh) приведены на рис. 9: ИИМ1 – первый по ходу движения измерительный модуль, ИИМ2 – второй.

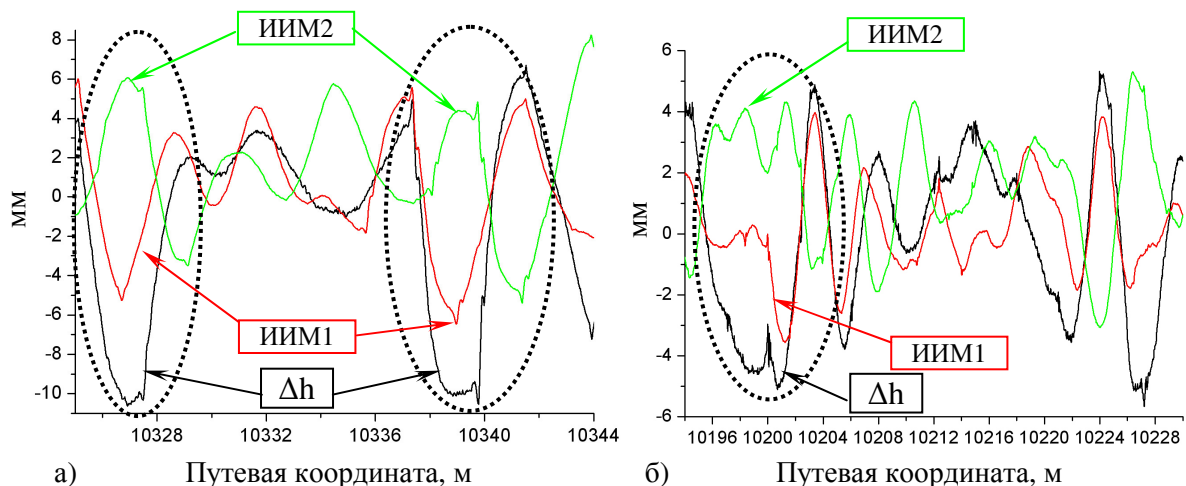


Рисунок 9 – Просадки рельсовых нитей (Δh) и вертикальные перемещения букс (ИИМ1, 2)

На выделенных участках графиков (рис. 9) видно, что разновысотность первого и следом идущего колес (разность между кривыми ИИМ1 и ИИМ2) соответствует кривой Δh , что подтверждает состоятельность оцененных траекторий движения буксовых узлов по показаниям ИИМ.

Анализ полученных результатов также подтверждает, что хордовый способ определения просадки характеризуется нечувствительностью к неровностям, длины

которых меньше базы тележки, в то время как разработанный инерциальный метод такого недостатка лишен. Отсюда можно сделать вывод: экспериментально подтверждены полученные ранее аналитические выражения, свидетельствующие о том, что хордовая просадка является дифференциальной оценкой и не может адекватно характеризовать геометрию рельса.

Таким образом, с использованием инерциального метода может быть получена просадка рельсового пути на длинах неровностей от межшпального прогиба до нижней границы чувствительности хордового метода – базы тележки. При этом процедура определения данного параметра не противоречит нормативно утвержденным правилам.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

1. Использование микромеханических инерциальных датчиков позволяет реализовывать на практике измерения в условиях динамического взаимодействия железнодорожного состава и рельсового пути. Это дает возможность совершенствовать существующие способы контроля состояния нижнего строения пути и предлагать новые. Разработанная СД РП позволяет определять основные геометрические параметры рельсового пути. Данная система может также применяться в усеченном составе (4 ИИМ и одометр) для модернизации вагонов-дефектоскопов и достаточно большого парка устаревших версий путеизмерительных вагонов, не используемых для контроля главных магистралей.

2. Разработан метод коррекции показаний вертикальных акселерометров, который базируется (следовательно, не противоречит) на нормативно утвержденной процедуре оценки вертикальных неровностей как отклонений от некоторой средней линии, аппроксимирующей положение рельсового пути.

3. Предложенная методика обработки данных калибровочных испытаний акселерометров и гироскопов предполагает определение в первую очередь неортогональностей измерительных осей, а затем масштабных коэффициентов датчиков, позволяет исключить методические погрешности определения параметров математических моделей показаний датчиков и достичь точности измерения угловых скоростей и линейных ускорений $0,1\%$ и $0,01\text{ м/с}^2$ соответственно. В работе также выполнена оценка возможности определения дефектов рельсов: волнообразной деформации, смятия головки рельса, рифлей – коротких (3-25 см) волнообразных неровностей на головке рельсов. Данные дефекты в настоящее время выявляются внешним осмотром с использованием ручных путеизмерительных приборов, то есть в принципе не могут быть определены такими оперативными средствами, как путеизмерительные вагоны и вагоны-дефектоскопы.

Таким образом, перспективность внедрения измерительных систем на базе микромеханических датчиков объясняется, в первую очередь, возможностью создания миниатюрных автоматизированных комплексов диагностики и оповещения в режиме «on-line», 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 и выявить тенденции в появлении и развитии дефектов.

Цитированная литература

1. Инструкция по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного вагона ЦНИИ –2 и мерам по обеспечению безопасности движения поездов (ЦП 515) [Текст]: Утв. МПС 14.10.1997г. / МПС РФ. М.: МПС, 1999.
2. Боронахин, А.М. Инерциальные методы и средства измерений геометрических параметров рельсового пути [Текст]: Дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.11.03 / Боронахин Александр Михайлович. – СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. – 160 с.
3. Мочалов, А.В. Инерциальные методы и средства динамических измерений параметров движения и деформаций объектов [Текст]: дис... докт. техн. наук: 05.11.03 / Мочалов Андрей Владимирович. – СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. – 298 с.
4. Филипня, Н.С. Разработка инерциальных методов и средств измерения параметров рельсового пути: дис... канд. техн. наук [Текст]: 05.11.16 / Филипня Наталья Сергеевна. – СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. – 141 с.
5. Лукьянов, Д.П. Микромеханические навигационные приборы [Текст]: учеб. пособие / Д.П. Лукьянов, В.Я. Распопов, Ю.В. Филатов. – СПб.: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2008. – 204с.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Содержание диссертации опубликовано в работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Олейник*, Л.Н. Малогабаритная интегрированная система диагностики рельсового пути / А.М. Боронахин, Л.Н. Олейник, Н.С. Филипня // Гироскопия и навигация. – 2009. – №1 (64). – С. 63-74.
2. Подгорная, Л.Н. Применение микромеханических датчиков для диагностики рельсового пути / А.М. Боронахин, Л.Н. Подгорная // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – №8. – С. 47–50.

Другие статьи и материалы конференций:

3. Анализ возможности использования микроакселерометров для определения просадок рельсовых нитей / А.О. Грунский, Л.Н. Олейник, А.Н. Ткаченко, Н.С. Филипня// Навигация и управление движением: материалы докл. VII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2006. – С. 100 – 105.
4. Анализ точностных характеристик инерциального измерительного модуля фирмы BOSCH / А.О. Грунский, Л.Н. Олейник, А.Н. Ткаченко, Н.С. Филипня. // Навигация и управление движением: материалы докл. VII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2006. – С. 33 – 38.
5. Исследование характеристик микромеханических чувствительных элементов и миниатюрных инерциальных модулей / Л.Н. Олейник, Е.Д. Масленок, А.Н. Ткаченко. //

* Здесь и далее по тексту Олейник Л.Н. читать как Подгорная Л.Н. на основании свидетельства о заключении брака № П-АК № 622730

Известия Государственного электротехнического университета. Сер. Приборостроение и информационные технологии. – 2007. – №1. – С. 59-69.

6. Олейник, Л.Н. Исследование характеристик инерциального модуля на базе микромеханических чувствительных элементов фирмы Analog Devices / Л.Н. Олейник, А.Н. Ткаченко // Навигация и управление движением: материалы докл. IX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2007. – С. 319-325.

7. Разработка специализированной интегрированной навигационной системы оперативного мониторинга состояния железнодорожного пути / А.М. Боронахин, Л.Н. Олейник, А.Н. Ткаченко, Н.С. Филипеня // Гироскопия и навигация. – 2008. – № 2 (61). – С. 104.

8. Разработка малогабаритной интегрированной системы диагностики рельсового пути / А.М. Боронахин, Л.Н. Олейник, А.Н. Ткаченко, Н.С. Филипеня // Навигация и управление движением: материалы докл. X конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2009. – С. 403-409.

9. Олейник, Л.Н. Алгоритм испытаний триады гироскопов на двухосном испытательном стенде / Л.Н. Олейник [и др.] // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Приборостроение и информационные технологии. – 2009. – №8. – С. 26-34.

10. Олейник, Л.Н. Результаты экспериментальных исследований малогабаритной интегрированной системы диагностики рельсового пути / Л.Н. Олейник, Р.В. Шалымов // Навигация и управление движением: материалы докл. XI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2010. – С.405 – 410.