

УДК 531.383-11:531.714.7

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

Приводятся результаты разработки системы диагностики железнодорожного полотна, основанной на использовании инерциальных измерительных модулей на микромеханических гироскопах и акселерометрах, устанавливаемых непосредственно на буксовые узлы (крышки подшипников) колесных пар. Описывается алгоритм обработки показаний датчиков, позволяющий определять неровности на поверхности катания рельсов. Приводится описание аппаратной реализации системы диагностики, а также результаты опытных поездок.

В настоящее время доля грузоперевозок по железным дорогам составляет ~40% от всего грузооборота страны. При этом наблюдается возрастание данного показателя, что приводит к необходимости увеличения скоростей и плотности движения железнодорожных составов. Как следствие, повышаются риски возникновения техногенных катастроф, приводящих 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, предусматривающая оценку геометрических параметров пути, 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 применение ручных средств характеризуется высокой трудоемкостью и необходимостью закрытия перегонов для организации

Боронахин Александр Михайлович. Кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Член секции молодых ученых Академии навигации и управления движением.

Подгорная Людмила Николаевна. Кандидат технических наук, ассистент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Бохман Евгений Давидович. Инженер, директор ООО «ИНЕРТЕХ» (С.-Петербург).

Филипеня Наталья Сергеевна. Кандидат технических наук, инженер Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Филатов Юрий Владимирович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Шалымов Роман Вадимович. Студент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Ларионов Даниил Юрьевич. Студент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Статья по докладу на XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

измерений, а самоходных средств просто не хватает, что приводит к несоответствию частоты выполнения измерений и скорости возникновения дефектов. Согласно нормативным документам в случае обнаружения несоответствий состояния пути требуемым нормам безопасности накладываются ограничения на скорость движения железнодорожных составов (120; 100; 70, 40 км/ч, вплоть до закрытия участка пути) до их устранения [1, 2]. В результате возникает противоречие: увеличение грузооборота приведет к увеличению случаев возникновения дефектов, а измерительных средств для их оперативного обнаружения не существует.

Анализ имеющихся методов диагностики рельсового пути [3–5] позволяет говорить о следующих основных недостатках.

1. Геометрические параметры рельсового пути характеризуются как статическими неровностями, так и его упругими деформациями в результате динамического взаимодействия с путеизмерительным вагоном (ПВ). Это приводит к низкой степени воспроизводимости результатов многократных измерений при прохождении одного и того же участка на разных скоростях (меняются фаза и частота колебаний кузова вагона, что оказывает влияние на изменение распределения нагрузки). Следует также помнить о том, что локомотив и товарные вагоны характеризуются конструкциями и массами, отличными от пассажирского вагона, на базе которого создаются ПВ. Таким образом, вертикальные неровности, возникающие под нагрузкой, являются интегральной характеристикой состояния нижнего строения пути, так как зависят от его упругих свойств (жесткости), определяемых качеством балластного слоя и наличием в рельсовых нитях внутренних дефектов.

2. Методы привязки результатов контроля основываются на использовании датчиков пройденного пути, инструментальные погрешности которых также зависят от динамических процессов взаимодействия измерительного колеса и рельсовой нити. Изменение фрикционных свойств (коэффициента сцепления) в паре «колесо–рельс» приводит к возникновению систематически накапливаемой погрешности определения пройденного пути, коррекция которой осуществляется визуальным способом обнаружения оператором километровых столбов с ручным способом фиксации (нажатие кнопки пульта).

3. Существует широкий перечень дефектов рельсов, которые могут быть отнесены к геометрическим неровностям, однако способы их выявления предполагают внешний осмотр с использованием ручных измерительных приборов.

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 актуальной является разработка системы диагностики рельсового пути, отличающейся невысокой стоимостью и малыми габаритами, для оборудования регулярно курсирующих локомотивов (или вагонов). Подобный путь – оснащение одного из пассажирских вагонов измерительной системой – уже выбран на некоторых зарубежных железных дорогах, примером могут служить системы *POS TG* или *TrackMon* [6, 7].

В работе [8] рассмотрены основные принципы построения малогабаритной интегрированной системы диагностики рельсового пути (МИСД РП), которая по своим техническим характеристикам не уступает зарубежным аналогам, но экономически более привлекательна [6, 7].

В настоящей статье рассматриваются вопросы по расширению перечня контролируемых МИСД РП параметров. Предлагается алгоритм идентификации дефектов поверхности катания рельсовых нитей, в основе которого используются показания микромеханических акселерометров (ММА), входящих в состав инерциальных измерительных модулей (ИИМ), установленных на буксах колесных пар одной из тележек. В работе также приводятся результаты сдаточных испытаний МИСД РП в составе вагона-дефектоскопа производства ОАО «Радиоавионика» (С.-Петербург).

Идентификация вертикальных неровностей

Алгоритмы измерения основных геометрических параметров рельсового пути (продольного уклона, уровня, кривизны, перекосов и др.) изложены в [2, 8] и могут быть реализованы в автоматизированных средствах [9, 10]. Этого нельзя сказать о процедурах идентификации дефектов на поверхности катания рельсов. В настоящее время данный класс отклонений предусматривает визуальный контроль и ручные средства измерения [1], поэтому исследования по разработке алгоритма контроля таких достаточно часто встречающихся дефектов, как смятия головки рельса и пробуксовки на поверхности катания, являются чрезвычайно актуальными. При этом должна контролироваться глубина неровности h (от 1 до 6 мм при измерении на базе 1 м) с погрешностью не более 1 мм.

Предлагается алгоритм идентификации вертикальных неровностей (рис. 1), который использует информацию от вертикальных ММА, расположенных на буксах тележки вагона (проиллюстрирован алгоритм обработки показаний датчиков, расположенных на одной стороне тележки, аналогичной обработке подвергаются показания акселерометров с другой стороны). Сигналы ММА поступают в блок К, где происходит их масштабирование.

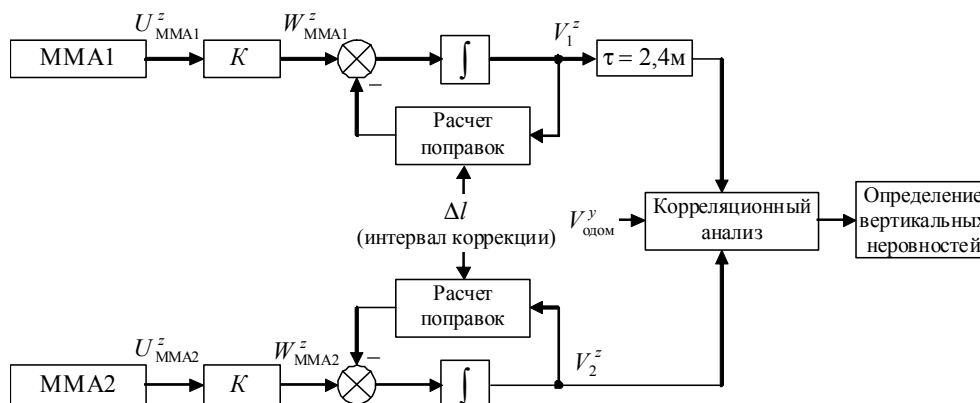


Рис. 1. Алгоритм определения вертикальных неровностей

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 просядок) как отклонений от некоторой средней линии, аппроксимирующей положение рельсового пути.

Расчет поправок в соответствии с априорно-известным положением пути основан на следующем допущении: среднее значение вертикальной скорости равно нулю на интервале коррекции, выбираемом исходя из длин неровностей, которые необходимо выявлять. Далее в сигнал ММА1, расположенного на буксе первого по ходу движения колеса, вводится задержка, которая определяется временем, требуемым для прохождения дистанции, равной базе тележки $\tau=2,4$ м (см. рис. 1), т. е. сигналы акселерометров приводятся к единой путевой координате. После этого они поступают в блок корреляционного анализа.

В случае, когда железнодорожный путь имеет неровность в вертикальной плоскости, сигналы акселерометров, расположенных на буксах как первого (ММА1), так и следом идущего (ММА2) колес, будут иметь характерный для данной неровности вид [11]. При отсутствии неровностей пути сигналы также будут коррелировать, однако значение корреляционного максимума будет значительно меньше, чем в случае прохождения неровности, и будет определяться присутствием вибраций из-за микронеровностей рельсового полотна, влиянием динамического взаимодействия вагона и рельсового пути и т. д. Отсутствие корреляции может объясняться нестабильностью выходного сигнала одного из датчиков или дефектами на поверхности катания колес, т. е. 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 $\Delta S = \frac{V}{f} = 3$ мм. Максимальное значение допустимого диапазона, в который может попадать максимум корреляционной функции, рассчитанный для скорости движения $V=200$ км/ч, соответствует 14 мм пройденного пути.

Таким образом, если взаимная корреляционная функция $R(\tau)$ имеет пик, принадлежащий допустимому интервалу $-\tau_0 \leq \tau \leq \tau_0$, определяется ширина корреляционного максимума (измеряется расстояние между ближайшими минимумами), что соответствует длине неровности λ . Рассчитывается значение корреляционной функции, которая была бы получена, если бы оба колеса проехали по пути, имеющему вертикальную неровность, и находится пороговое значение максимума, которое может принимать корреляционная функция при наличии неровности рельсового пути на исследуемом участке.

Рассмотрим случай, когда модель неровности описывается дугой окружности

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

где A – минимальное значение амплитуды неровности, регламентированной нормативными документами.

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

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

где Δl – интервал, на котором рассчитывается взаимная корреляционная функция; $\delta \dot{h}$ – допустимая погрешность определения вертикальной скорости, которая получена из выражения (1) и зависит от скорости движения вагона и допустимой погрешности определения вертикальной неровности δA

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

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 [12] 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 измерительные оси ММА1 и ММА2 всегда направлены по вертикали места, то при прохождении неровности, описываемой уравнением (1), изменение вертикального ускорения относительно g при проезде колеса по имеющему неровность участку пути составит

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

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

При определении вертикальных неровностей рельсовых нитей имеют место методические погрешности, вызванные допущениями о постоянстве ориентаций измерительных осей ММА1 и ММА2 (по вертикали), хотя в действительности имеется составляющая $W' = g \cdot \cos \psi$, где 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; h – глубина неровности.

После подстановки максимального значения просадки, принимаемого за отступление четвертой степени [2], 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 малым 2-го порядка по сравнению с ускорениями, возникающими вследствие изменения вертикальной координаты колеса при движении по неровности.

Аппаратный состав системы диагностики

В состав аппаратной части МИСД РП помимо четырех ИИМ (по два с каждой стороны) включены приемная аппаратура спутниковой навигационной системы (ПА СНС), датчик пути (одометр), четыре датчика линейных перемещений (ДЛП) и в качестве построителя базовой системы координат – бескарданный инерциальный измерительный модуль (БИИМ), устанавливаемый либо на раме тележки, либо на кузове вагона,

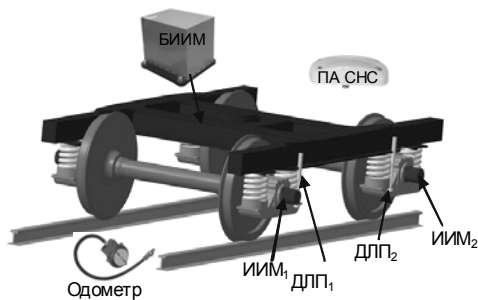


Рис. 2. Конфигурация МИСД

движение которого относительно букс контролируются ДЛП (рис. 2). В качестве БИИМ могут быть использованы, в зависимости от требуемой точности, трехосные системы на лазерных или волоконно-оптических гироскопах или специализированные аналитические гировертикали с усеченным составом чувствительных элементов [13].

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. На рис. 3 представлена тележка вагона-дефектоскопа фирмы ОАО «Радиоавионика» (С.-Петербург), на котором производился монтаж элементов МИСД РП.

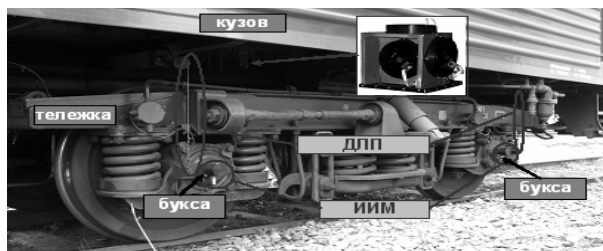


Рис. 3. МИСД РП в составе вагона-дефектоскопа

На рис. 4 – инерциальный измерительный модуль на микромеханических датчиках (а) и задействованной для опытного проезда интегрированной системы ориентации и навигации (ИСОН) на лазерных гироскопах БИНС2М производства ЗАО НПК «Электрооптика» (Москва), бесплатформенная ИНС которой монтировалась к несущей конструкции кузова вагона (б).

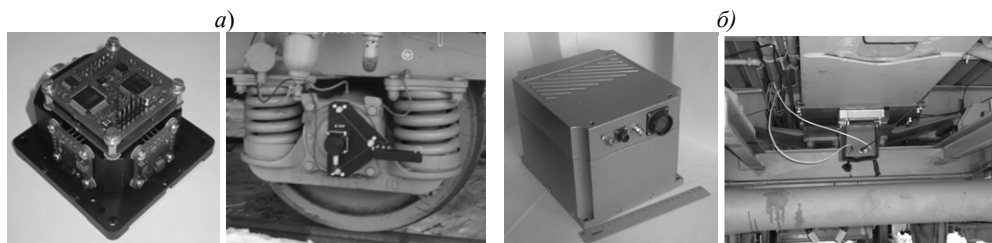


Рис. 4. ИИМ на микромеханических датчиках (а); БИНС2М (б)

Результаты опытных проездов

Экспериментальные проезды выполнялись на участках С.-Петербург – Вырица (март – июль 2011 г.) и С.-Петербург – Москва (сентябрь – ноябрь 2011 г.). Состояние криволинейного участка пути (рис. 5, а – график изменения курса по показаниям ИСОН при движении по одноколейному участку пути) характеризуется параметром «кривизна» – величина, обратная радиусу, которая определяется, как отношение угловой скорости к линейной (рис. 5, б). В данном случае выполнялась качественная оценка достоверности угловых измерений ИСОН – по воспроизводимости результатов в трех проездах одного и того же участка пути.

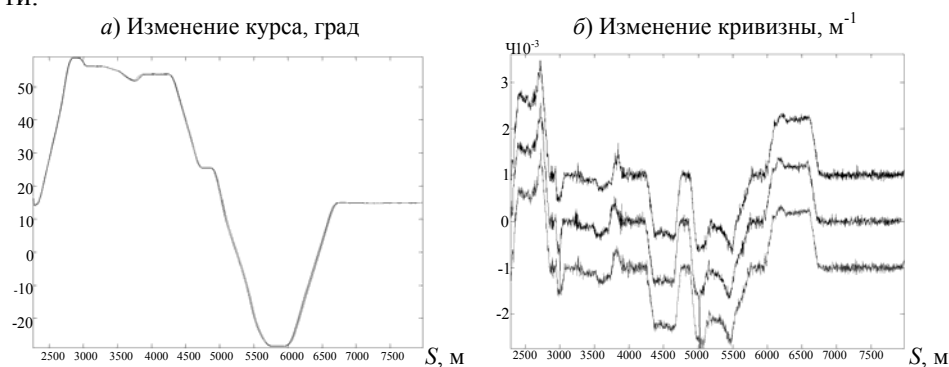


Рис. 5. Характеристики положения пути в плане

Аналогично были проанализированы результаты по углам поперечной и продольной качек кузова вагона (рис. 6).



Рис. 6. Характеристики положения пути относительно плоскости горизонта

Для наглядности графики на рис. 5, б и 6 разнесены по оси ординат на одинаковую величину вверх и вниз от графика, отражающего истинное значение соответствующего параметра. Отличие углов ориентации составило не более 1%.

В результате экспериментальных проездов также определялись дефекты на поверхности катания рельсов. В ходе проезда системой были измерены ускорения на буксах колесных пар тележки вагона, отображающиеся на нижнем графике интерфейса программного обеспечения (рис. 7).

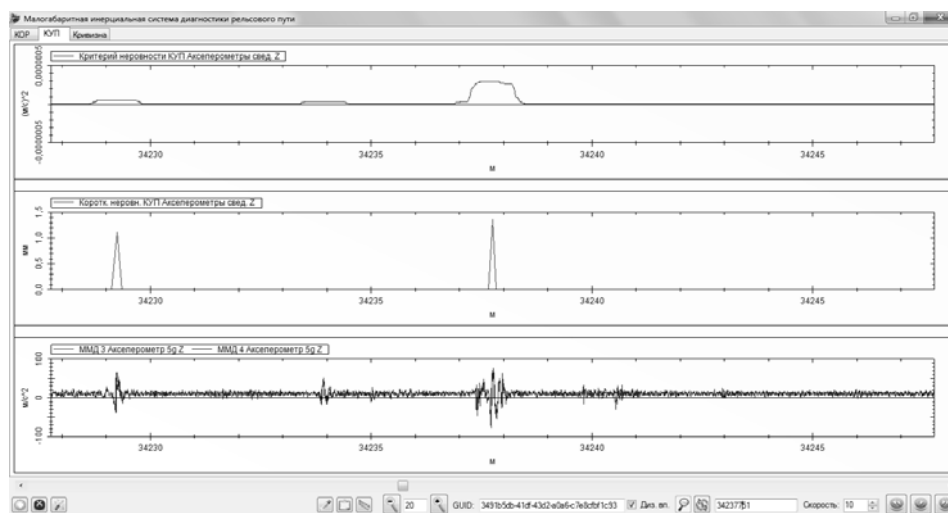


Рис. 7. Интерфейс программного обеспечения МИСД РП при определении дефектов поверхности катания

График полученной на данном участке взаимной корреляционной функции, являющийся критерием наличия неровности, представлен в верхней части интерфейса. В случае превышения заданного порогового значения на среднем графике (см. рис. 7) отображается условный знак в виде треугольника, высота которого равна глубине неровности, а основание – ее длине. Неровность, показанная в центральной части графика, была обнаружена по результатам двух проездов, разнесенных по времени на 1 неделю, и составила 1,4 мм в первом и 1,7 мм в следующем.

По данным системы видеорегистрации, имеющейся на вагоне-дефектоскопе, было установлено, что обнаруженным дефектом является смятие головки рельса в месте сварного стыка (рис. 8, а). На том же участке рельсового пути было осуществлено измерение ручным инструментом (рис. 8, б), который показал глубину смятия 1,5 мм. Таким образом, погрешность определения дефектов на поверхности катания отвечает требованиям нормативных документов [1].

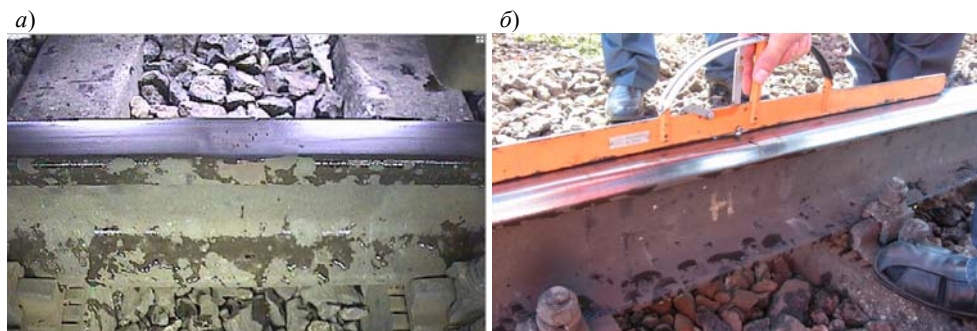


Рис. 8. Смятие головки рельса в месте сварного стыка (а) и его измерение ручным инструментом (б)

По результатам опытного проезда была также показана возможность использования МИСД РП для идентификации дефекта поверхности катания, возникшего при пробуксовке ведущих колес локомотива в момент трогания и получившего название «пробуксовка».

Сформированная по результатам проезда ведомость с видеокадром и параметрами (длиной и глубиной) дефекта приведена на рис. 9.

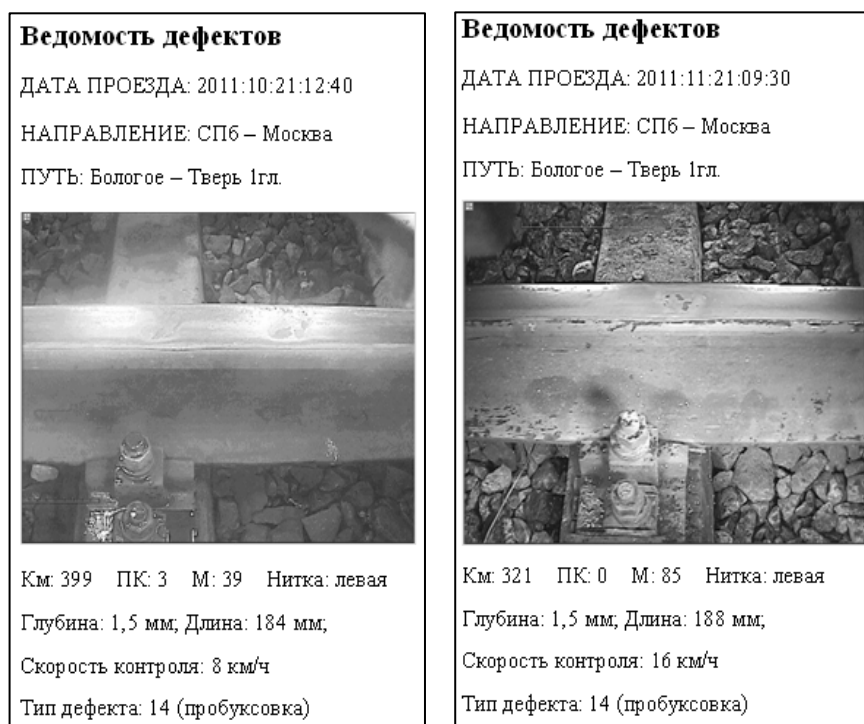


Рис. 9. Ведомости дефектов типа «пробуксовка»

Таким образом, трудоемкую и низкопроизводительную процедуру поиска и измерения дефектов на поверхности катания [1] можно автоматизировать с использованием МИСД РП, интегрированной с системой видеорегистрации: обнаружение и измерение дефекта производит система диагностики, а идентификация типа дефекта проводится оператором по данным с видеокамер.

Заключение

Микромеханические гироскопы и акселерометры благодаря их вибро- и ударопрочности (тысячи g) позволяют создавать миниатюрные инерциальные измерительные системы, которые могут быть установлены непосредственно на буксовые узлы подвижного состава. Контроль пространственных перемещений всех четырех колес одной из тележек обеспечивает дублирование измерений положения пути, в результате повышается достоверность идентификации дефекта.

Факт обнаружения МИСД РП дефектов поверхности катания подтверждается показаниями системы видеорегистрации, а точность измерения была оценена при помощи нормативно утвержденной процедуры с использованием ручного средства контроля. В результате чего можно сделать заключение об успешной автоматизации процедуры диагностики дефектов поверхности катания рельсовых нитей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Классификация** дефектов рельсов НТД/ЦП-1-93. Каталог дефектов рельсов НТД/ЦП-2-93. Признаки дефектных и остродефектных рельсов НТД/ЦП-3-93. Утверждены МПС РФ 22.03.1993.
2. **Технические** указания по определению и использованию характеристик устройства и состояния пути, получаемых вагонами путеобследовательскими станциями ЦНИИ-4. (ЦПТ - 55/15) [Текст] / Департамент пути и сооружений МПС России. - М. - 2003. - 100 с.
3. **Боронахин, А.М.** Новые инерциальные методы измерения параметров рельсового пути /А.М.Боронахин, В.И.Гупалов, Н.С.Филипеня // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ».- 2005. -№1. -С. 3 -7.
4. **Боронахин, А.М.** Инерциальные методы и средства измерений геометрических параметров рельсового пути: дис... канд. техн. наук. – СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. - 160 с.
5. **Филипеня, Н.С.** Разработка инерциальных методов и средств измерения параметров рельсового пути: дис... канд. техн. наук. - СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. - 141 с.
6. [http:// www.plassertheurer.com/](http://www.plassertheurer.com/)
7. **Zywiell, J.** Innovative Measuring System Unveiled // Jan Zywiell, Gunther Oberlechner. International Railway Journal. - 2001. - Sept. (http://www.applanix.com/media/downloads/articles_papers/POSTG_2001_09_InnovativeMeasuringSystem.pdf)
8. **Боронахин, А.М.** Малогабаритная интегрированная система диагностики рельсового пути / А.М.Боронахин, Л.Н.Олейник, Н.С.Филипеня // Гироскопия и навигация.-2009.- №1.-С.63-74.
9. www.pikprogress.ru
10. www.infotrans-logistic.ru
11. **Подгорная, Л.Н.** Разработка и исследование системы диагностики рельсового пути на микромеханических чувствительных элементах: дис... канд. техн. наук.– СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – 123 с.
12. **Rechel M.** Integrated System for Navigation on Railway Tracks / M.Rechel [etc.] / Proceedings on Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany, 19 - 20 Sept. 2001, p.p. 17.0 - 17.18.
13. **Гупалов, В.И.** Аналитические гировертикали усеченного состава / В.И.Гупалов, А.В.Мочалов, А.М.Боронахин // Гироскопия и навигация.- 2001.- 2 (33).- С. 25 - 36.

Abstract. The paper presents the results of development of the railway diagnostic inertial system. The key element of this system is a set of inertial measurement modules, based on micromechanical gyros and accelerometers, which are mounted directly onto the axle boxes (a cover of bearings) of the wheel pairs. Such a system architecture made it possible to carry out the scientific investigations of the action, provided by dynamic interaction between the train and the rail track onto the results of geometry deformation measurement, as well as to provide measurement of the parameters like defects of the rail rolling surface.

Key words: railway gauge state diagnostics, railway transport safety, inertial measurement module.