



УДК 531.383

А. М. Боронахин, Е. Д. Бохман, Д. Ю. Ларионов,
Л. Н. Подгорная, Ю. В. Филатов, Р. В. Шалымов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Инерциальные технологии в задачах мониторинга рельсового пути

Проводится обзор результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области разработки методов и средств мониторинга состояния рельсового пути, проводимых на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем. Рассмотрены результаты научной деятельности по разработке и применению эффективных наукоемких технологий в задачах диагностики железнодорожного пути за последние 20 лет.

Диагностика рельсового пути, динамическое взаимодействие вагона и рельсового пути, БИНС, геометрические параметры рельсовой колеи, дефекты поверхности катания рельсов, навигация на рельсовом пути

Значительная часть грузо- и пассажироперевозок 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). В связи с этим 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 [1].

В таблице приведены точностные характеристики, обеспечиваемые существующими высокоточными путеизмерительными комплексами России [2], и требования Евросоюза [3], предъявляемые к системам диагностики высокоскоростных линий железнодорожного транспорта. Основной вывод, который из нее следует, – это несоответствие максимально возможной скорости движения реальной скорости инспекционного проезда. Повышение скорости движения путеизмерительного вагона (ПВ) требует модернизации не только аппаратной, но и методической части, так как на высоких скоростях движения начинают сказываться

новые виды возмущений, в том числе аэродинамического характера [4].

Научная группа кафедры лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС) СПбГЭТУ уже более 20 лет занимается вопросами инерциальных технологий для обеспечения безопасности железнодорожного движения. За это время существенных успехов удалось достичь в решении таких задач, как анализ динамического взаимодействия вагона и рельсового пути, измерение геометрических параметров железнодорожного полотна с использованием различных измерительных схем, диагностика дефектов на поверхности катания рельса и колеса с выработкой прогноза их развития, навигация на рельсовом пути.

Анализ динамического взаимодействия вагона и рельсового пути. Анализ динамического взаимодействия в системе «вагон/путь» необходим для «нормирования» результатов измерений ПВ по скорости движения и оказываемой нагрузке на путь, вследствие которой возникают его упругие деформации. Процедура «нормирования» [5] позволяет учитывать различие степени деформации пути от прохождения подвижных единиц с различными массогабаритными и скоростными характеристиками (грузовые и скоростные поезда).

Пути измеритель	Основные контролируемые параметры								Скорость, не более, км/ч
	Уровень, мм		Шаблон, мм		Рихтовка, мм		Просадка, мм		
	Диапазон	Погрешность	Диапазон	Погрешность	Диапазон	Погрешность	Диапазон	Погрешность	
ЦНИИ-4МД «ПИК ПРОГРЕСС»	±160	±3.0	1520 -10/+40	±1.0	±225	±4.0	±50	±2.0	160
ЭРА «ИНФОТРАНС»	±155	±0.8	1520 -10/+40	±0.8	±225	±0.8	±50	±0.8	160
ИНТЕГРАЛ «ТВЕМА»	±160	±1.0	1520 -10/+40	±0.8	±225	±1.0	±50	±1.0	160
Требования Евросоюза	±225	±0.5	1520 -15/+50	±0.5	±50*	±0.5	-	-	200 300
±100**									
±500***									

* При длине хорды от 3 до 25 м.

** При длине хорды от 25 до 70 м.

*** При длине хорды от 70 до 200 м (для скоростей более 250 км/ч).

Модель пути, обладающего упругими свойствами (рис. 1), представляется в виде неразрезной балки, проходящей над рядом промежуточных опор-шпал N_i (пружин). Сила Q , прикладываемая точно к балке, имитирует создаваемую колесом вертикальную нагрузку. Силы инерции элементов пути при существующих скоростях движения поездов малы по сравнению с весовой составляющей и силами инерции колеблющихся масс подвижного состава, и ими без существенной для практической цели погрешности можно пренебречь.

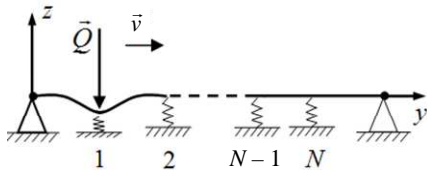


Рис. 1

Получена математическая модель для определения значения опускания опор-шпал Δz_i под движущейся нагрузкой:

$$\begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \vdots \\ \Delta z_i \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1i} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2i} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{j1} & b_{j2} & \dots & b_{ji} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_i \end{bmatrix},$$

где b_{ji} – коэффициенты матрицы B : $b_{ji} =$

$$= \frac{c_p l_i (L - l_j) [L^2 - l_i^2 - (L - l_j)^2]}{6GL} \text{ для } i < j; \quad b_{ji} =$$

$$= \frac{c_p (L - l_i) l_j \{ l_i (2L - l_i) - l_j^2 \}}{6GL} \text{ для } i > j \quad (c_p -$$

жесткость рельсовой нити; G – изгибная жесткость рельса; $L = Nd$ – длина балки; d – расстояние между опорами-шпалами; N – количество опор-шпал; l – расстояние до точки приложения силы; y – продольная координата точки, в которой определяется прогиб слева и справа от точки приложения нагрузки).

1. Сила воздействия нагрузки на рельс определялась как

$$Q_i(v) = mg + ma_{\text{дин}i}(v),$$

где $ma_{\text{дин}i}(v)$ – динамическая составляющая, определяемая частотой свободных колебаний балки; v – скорость движения.

Разработанное программное обеспечение позволило смоделировать часто встречающийся на практике случай – наличие так называемых отрясенных шпал, т. е. шпал, которые в результате эксплуатации рельсового пути перестали иметь контакт с балластным слоем (шпала «висит» на рельсовой нити). В качестве возмущения моделировалось движение колес одной из тележек вагона (рис. 2) при наличии «отрясенных» шпал (•) и геометрической неровности: 1 – без нагрузки, 2 – при расположении движущейся тележки в момент времени согласно рисунку и траектории движения колес K_1 (кривая 3) и K_2 (кривая 4).

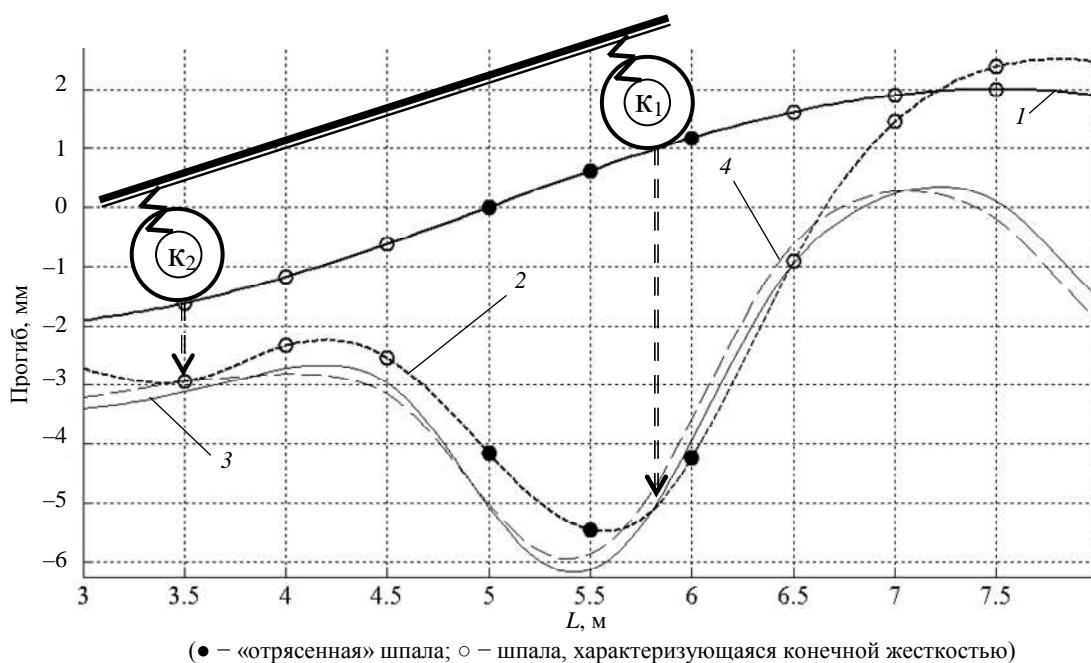


Рис. 2

Следует отметить, что даже при отсутствии колебательного движения кузова вагона относительно горизонтальной плоскости, которое возникает при движении вагона и вызывает изменение значений нагрузок, передаваемых на путь в точках контакта (колесо–рельс), траектории движения колес K_1 и K_2 (рис. 2, линии 3 и 4) не совпадают.

Результаты имитационного моделирования реакции рельсового пути на динамическое воздействие со стороны вагона позволили сформулировать требования к микромеханическому модулю (ММ) по полосе пропускания. Вариант аппаратной реализации ММ, разработанного для оснащения вагона-дефектоскопа производства ОАО «Радиоавионика» (АВИКОН-03М), приведен на рис. 3. Исходя из максимального значения скорости движения в процессе диагностики, в состав ММ были включены по 3 одноосных ММГ ADXRS 614 и MMA ADXL 278, трехосный MMA ADXL 325 и термодатчик.



Рис. 3

Экспериментальные исследования комплекта из четырех ММ подтвердили аналитические

оценки, позволили оценить динамику движения буксовых узлов и сформулировать необходимый и достаточный перечень обобщенных координат для составления математической модели, описывающей колебательные движения элементов вагона (кузова, рам тележек, колесных пар).

Исходя из принципа освобождения от связей рельсовый путь заменялся реакцией на движение по нему подвижной единицы. В качестве сил, действующих со стороны гасителей колебаний, рассматривались сила упругости рессоры и диссипативная сила сопротивления движению демпфера. Дифференциальные уравнения движения вагона были найдены с использованием уравнения Лагранжа 2-го рода, где в качестве обобщенных сил учитывались как потенциальные (действие сил тяжести и упругости), так и непотенциальные (влияние сил реакции связи вагона с рельсовым путем, диссипации механической энергии в гасителях колебаний). В результате была получена математическая модель вагона, представляющая собой систему из 21 дифференциального уравнения, описывающую динамику колесных пар, рам тележек и кузова вагона.

Использование ММ для измерения действующих сил позволило без потери точности в сравнении с существующими математическими описаниями сократить порядок дифференциальных уравнений с 4-го до 2-го.

Совпадение спектров, полученных по результатам моделирования и обработки сигналов БИНС2М, установленной на кузове вагона-дефектоскопа

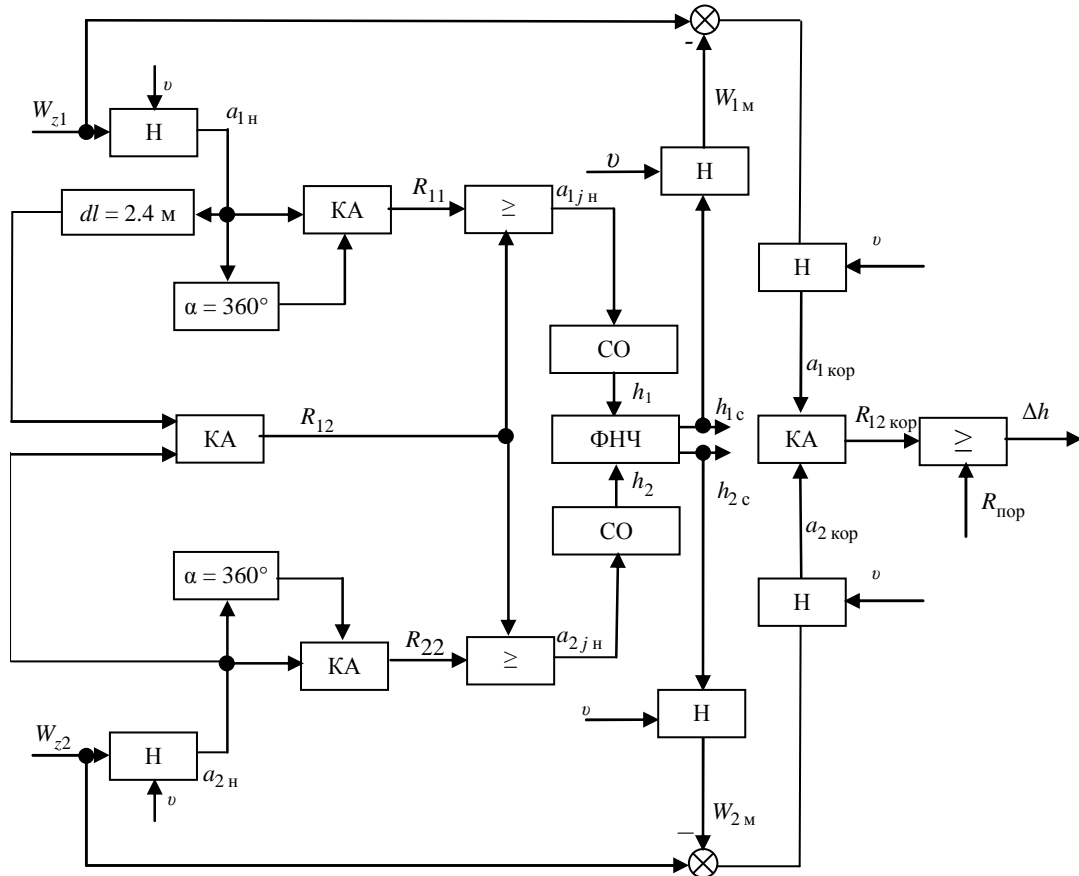


Рис. 4

АВИКОН-03М, подтвердило достоверность предложенной модели и позволило сформулировать требования к динамическим характеристикам бесплатформенной инерциальной системы (БИНС) в случае ее установки на кузове вагона или раме тележки.

Диагностика дефектов на поверхности катания рельсовых нитей. С мая 2011 г. на Октябрьской железной дороге начал эксплуатироваться вагон-дефектоскоп АВИКОН-03М, разработанный ОАО «Радиоавионика» по заказу ОАО «РЖД». В состав диагностического комплекса вагона включены новые системы, в числе которых малогабаритная инерциальная система диагностики рельсового пути [6], [7] (МИСД РП), разработанная научным коллективом кафедры ЛИНС СПбГЭТУ. За счет установки микромеханических датчиков на буксовые узлы колесных пар тележки вагона система определяет дефекты на поверхности катания рельсов и другие короткие геометрические неровности в профиле.

Структурная схема алгоритма определения вертикальных неровностей рельсовых нитей приведена на рис. 4 [8]. Сигналы вертикальных микромеханических акселерометров, измеряющих линейные ускорения буксовых узлов тележки вагона (W_{z1} – для впередиидущего колеса, W_{z2} –

для следом идущего колеса), нормируются в блоке Н по значению скорости движения вагона v .

Нормировка осуществляется в соответствии с представлением неровности (как для рельсового пути, так и для колес вагона), описываемой выражением

$$h = \frac{A_1}{2} \left(\cos \frac{2\pi vt}{L_2} - 1 \right) + \frac{A_2}{2} \left(\cos \frac{2\pi vt}{\lambda_2} - 1 \right), \quad (1)$$

где A_1 – глубина неровности (просадки длиной до 1 м); A_2 и λ_2 – глубина и длина импульсной неровности.

Глубина неровности h_H в этом случае определяется как

$$h_H = a_{\max} \left(\frac{\lambda}{2\pi v} \right)^2, \quad (2)$$

где a_{\max} – значение максимума ускорения в сигнале ММА; λ – длина волны неровности.

В этом случае исключение влияния скорости движения средства измерения на результат измерений ускорения (нормирование по скорости) выполняется в блоке Н только на величину $(2\pi v)^2$, так как длина неровности колеса неизвестна.

Далее каждый из сигналов $a_{1н}$ и $a_{2н}$ участвует в корреляционном анализе (блок КА) на соседних оборотах колеса для выявления дефектов поверхности катания 1-го и следом идущего по рельсовой нити 2-го колеса (R_{11} и R_{22} соответственно). Одновременно с этим вычисляется R_{12} – коэффициент взаимной корреляции показаний ММА, приведенных к одной путевой координате (b_T – расстояние между осями колесных пар тележки).

Полученные коэффициенты корреляции сравниваются в блоке « \geq », и если R_{11} и R_{22} превышают R_{12} , то принимается решение, что на протяжении двух оборотов колес значения ускорений определяются в большей степени геометрией колеса, нежели рельса. Тогда данные с ММА передаются в блок статистической обработки СО, где формируется профиль колеса с СКО ≤ 0.1 мм. Известно, что некруглость колес, возникающая в процессе эксплуатации, составляет от одной до четырех волн неровностей, что соответствует пространственной частоте (длина окружности колеса ≈ 3 м) от 0.3 до 1.3 м^{-1} . Это является определяющим условием при настройке фильтра низких частот ФНЧ.

Следует отметить, что полученные профили колес постоянно обновляются, так как геометрия колеса может измениться даже в течение одного проезда (влияние динамических воздействий при прохождении стыковых зазоров и дефектов рельсового пути, торможении и разгоне).

Полученные таким образом «маски колес» ($h_{1с}$, $h_{2с}$, мм) позволяют рассчитать $W_{1,2м}$ для коррекции текущих показаний ММА. При этом значения $a_{1,2\text{кор}}$ определяются исключительно импульсными неровностями рельсовых нитей. Использование «масок» колес позволило увеличить амплитуду пика взаимной корреляционной функции R_{12} на $\sim 10\%$.

Условием для принятия решения о наличии импульсной неровности поверхности катания рельсовой нити является превышение значением экспериментально полученного максимума R_{12} рассчитанного порога $R_{\text{пор}}$, определяемого для идеализированного случая, когда ММА не имеют инструментальных погрешностей (показания определяются только неровностью вида (1)) и процедуры сведения сигналов и нормирования выполнены

идеально. При выполнении такого условия путевые координаты первого и второго минимумов показаний ММА ($S_{\text{min}1}$ и $S_{\text{min}2}$) принимаются за начало и конец дефекта. Таким образом находится его протяженность λ . Затем в соответствии с выражением (2) определяется его глубина Δh .

Результаты сдаточных испытаний системы диагностики неровностей рельсового пути с использованием микромеханических модулей в составе АВИКОН-03М подтвердили заявленные требования по точности 1 мм.

В рамках работы по созданию системы для вагона-дефектоскопа была также предложена процедура определения в процессе монтажа взаимных угловых положений ММ и БИНС, также входящей в состав МИСД РП. При этом показания БИНС, работающей в автономном режиме, записываются в месте ее штатного положения, после чего она демонтируется, затем поочередно монтируется на четырех буксах и возвращается на свое место.

При опытной эксплуатации МИСД РП, учитывая достаточно частые плановые промеры одного из участков рельсового пути, было отмечено, что помимо выявления дефекта система может быть использована в качестве анализатора его развития [8]. На рис. 5 приведены показания одного из ММА. Проезды осуществлялись в разные дни (4 и 17 января, а также 3, 15 и 23 февраля) с одинаковой скоростью. Сигналы ММ в трех проездах (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 пяти экспериментальных проездов позволяет сделать заключение о том, что на рассматриваемом участке в период с 3 по 15 февраля был осуществлен ремонт (вырезан дефектный участок, а на его место вварен отрезок рельса). Следует очевидный вывод о целесообразности установки таких относительно недорогих средств диагностики на подвижные единицы регулярно (в данном случае 1 раз в неделю) курсирующих составов. В этом случае было бы возможно уже в декабре предыдущего года не только выявить данный дефект, но и оценить момент времени, когда он достигнет критического значения, требующего снижения скорости движения или вообще закрытия данного участка пути.

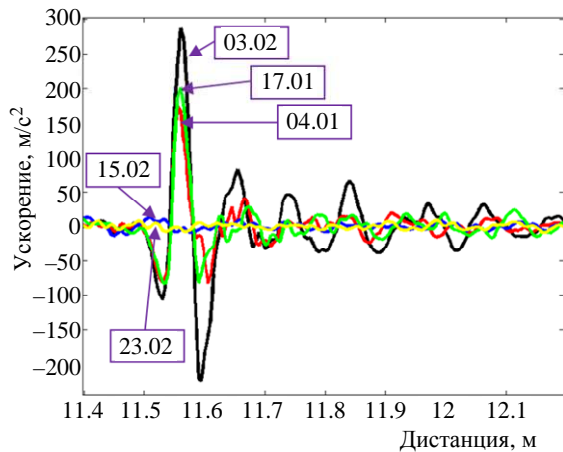


Рис. 5

В декабре 2011 г. проводились испытания комплекта из четырех микромеханических модулей, входящих в состав МИСД РП, в условиях повышенных скоростей движения (до 160 км/ч) при установке на буксовые узлы тележки путеизмерительного вагона КВЛ модели ПЗ.0 (ЗАО НПЦ ИНФОТРАНС). По результатам испытаний была показана готовность и работоспособность микромеханических модулей в определении коротких неровностей и дефектов на поверхности катания рельсов в условиях повышенных скоростей движения.

Измерение геометрических параметров рельсового пути. Для измерения геометрических параметров рельсового пути необходимо определить угловое положение кузова ПВ относительно горизонта. Эту задачу с высокой точностью решают БИНС, блок чувствительных элементов которой имеет в своем составе 3 лазерных гироскопа (ЛГ) и 3 акселерометра (Ак). Однако создание систем такого класса точности требует значительных финансовых вложений. Снизить стоимость БИНС можно следующими путями. С одной стороны, благодаря значительному количеству априорной информации о строении железнодорожного пути, возможно уменьшение количества чувствительных элементов и создание нового класса систем построения искусственного горизонта – аналоговых гировертикалей усеченного масштаба (АГВУС). АГВУС1-2 прошла испытания и была внедрена в состав вагона-измерителя контактной сети (ВИКС) и ПВ Петербургского метрополитена. С другой стороны, дорогостоящие ЛГ могут быть заменены на менее точные волоконно-оптические гироскопы (ВОГ). В любом случае, традиционным способом повышения точности БИНС является ее интегрирование с показаниями

приемной аппаратуры спутниковой навигационной системы и датчиком пройденной дистанции (одометром) – построение интегрированных систем ориентации и навигации (ИСОН).

Рассмотрим некоторые особенности построения ИСОН в условиях железнодорожного вагона. На отечественных ПВ реализованы следующие схемы установки БИНС:

а) использование моноблочной конструкции, включающей в себя БИНС и профилографы (шаблон), монтируемой на подрессоренную часть ходовой тележки;

б) установка БИНС на дополнительной плите;

в) установка БИНС на кузове вагона.

С точки зрения эффективного использования БИНС в задаче диагностики геометрических параметров рельсового пути на скоростях 160 км/ч, в том числе с точки зрения оптимальности конструктивных решений, предпочтителен вариант а).

Недостаток варианта б – сложность обеспечения необходимой жесткости дополнительной плиты, на которой также смонтированы профилографы (шаблон). Однако достоинство такого подхода – более комфортные условия для эксплуатации БИНС, так как благодаря дополнительной подвеске колебания платформы находятся в более низкочастотной области по сравнению с колебаниями рамы тележки (вариант а). Недостатком варианта в) является то, что при измерении просадок высокочастотные составляющие движения точек контакта «колесо–рельс» должны обеспечиваться системой датчиков Б–К. Также в случае установки БИНС на кузове вагона она будет определять движение семнадцатиметровой хорды (базы вагона) по рельсовому пути. Таким образом, измеряется не истинное положение пути в плане и в профиле, которое интересует службы пути, а траектория движения базы вагона [9].

Из существующих схем построения ПВ наиболее эффективной с точки зрения организации ИСОН и обеспечения современных требований (см. таблицу) является вариант с изготовлением моноблочной конструкции, в состав которой входят БИНС и профилометр поперечных сечений рельсовых нитей, установленной на подрессоренной раме тележки. При такой конфигурации БИНС как строитель опорной системы координат сможет давать как информацию о средней линии пути, так и углы поворота моноблочной конструкции, а значит, и углы, под которыми профилометры наблюдают рельсы.

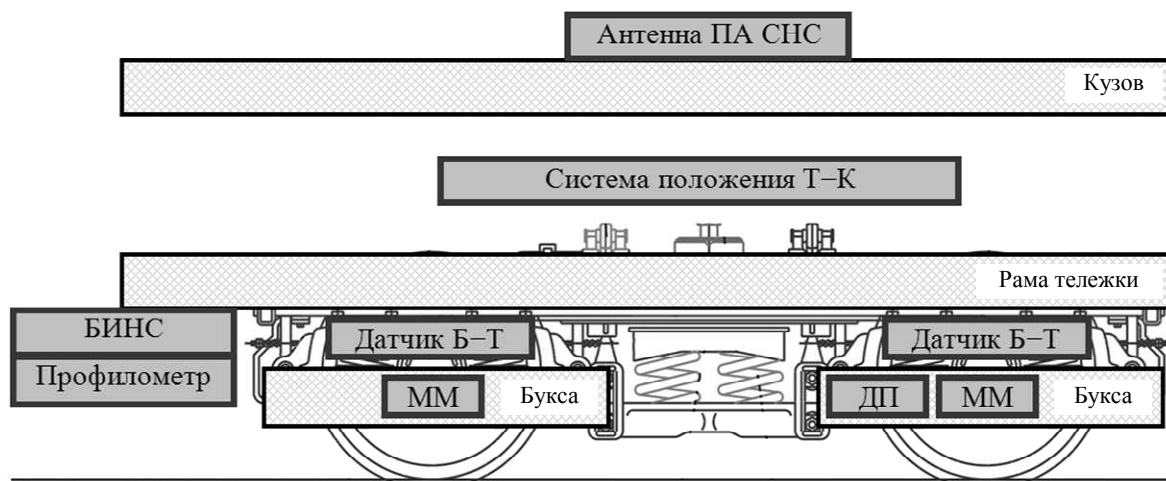


Рис. 6

Таким образом, реализуется схема измерения шаблона, уровня и рихтовки рельсового пути. Для реализации традиционного двухточечного хордового метода измерения просядок рельсовых нитей на базе тележки устанавливается комплект из четырех датчиков линейных перемещений «букса–тележка» (датчики Б–Т). Соответственно БИНС/профилометр/датчики Б–Т обеспечивают измерения отклонения от продольного профиля, перекосов и т. д. [2], [10].

В качестве построителя базовой системы координат остается БИНС, но требования к ней становятся более жесткими, учитывая место ее расположения (рис. 6). Для компенсации ее инструментальных погрешностей должны быть реализованы ставшие уже традиционными схемы коррекции по показаниям СНС и датчика пути ДП. В качестве дополнительных навигационных отметчиков (НО), используемых для коррекции погрешностей ДП, следует рассматривать не только пикетные столбы, положение которых фиксируется в настоящее время вручную, но и естественные характеристики рельсового пути (стыки, стрелочные переводы).

На первом этапе разработки системы измерения геометрических параметров пути был создан макет, позволяющий проводить испытания системы и демонстрировать ее возможности потенциальным заказчикам. Фото макета представлено на рис. 7. Макет представляет собой ручную тележку с установленной на нее жесткой плитой. На плите установлены 2 лазерных сканера и БИНС на ВОГ; таким образом, обеспечивается моноблочная конструкция инерциальной системы и профилометров. Спутниковая коррекция системы обеспечивается при помощи приемной антен-

ны ГЛОНАСС/GPS. Также тележка оснащена датчиком пути (одометром). Данные от всех датчиков поступают в ноутбук, где обрабатываются в реальном времени, а также записываются в базу данных. Питается система от двух свинцово-кислотных аккумуляторов.



Рис. 7

Было разработано программное обеспечение, осуществляющее распознавание профилей рельсов в режиме реального времени и интегрирование полученных данных с показаниями БИНС и ПА СНС, вычисляя значения геометрических параметров железнодорожного пути: ширины, поперечного уровня, продольного уклона, перекосов и рихтовки.

Навигация на рельсовом пути. Одним из направлений научных исследований является разработка интегрированных систем навигации на рельсовом пути. Суть данной разработки заключается в построении алгоритма коррекции датчика пройденного пути (одометра), от погрешности которого зависит точность локализации результатов диагностики, проводимой как

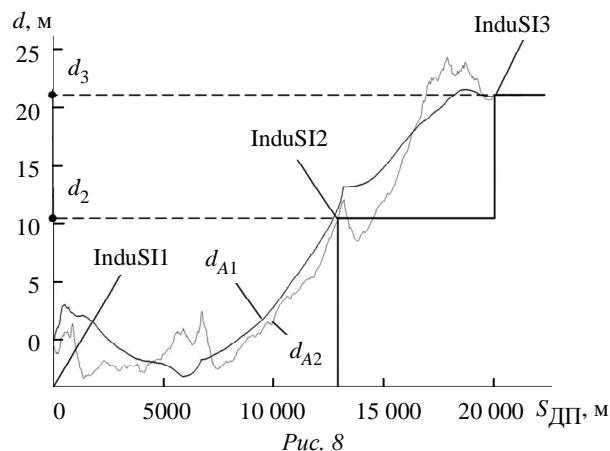
путеизмерительными вагонами, так и вагонами-дефектоскопами, вагонами-измерителями контактной сети, ручными средствами и т. д.

Поскольку все контролируемые параметры состояния рельсовой колеи фиксируются как функция пройденной ПВ дистанции, требования к точности ее измерения чрезвычайно высоки. ДП является основным прибором, по показаниям которого определяется пройденное вагоном расстояние, но его погрешность может составлять до 5 м на 1 км. Широко практикуемый ручной способ требует своевременного нажатия кнопки синхронизации при прохождении вагоном километровых столбов (пикетов), что является трудновыполнимой задачей при высоких скоростях движения вагона. Существует также автоматическая коррекция, которая требует установки в колее магнитного датчика (например, InduSI). При этом вагон должен быть оснащен считывающим устройством. Такой способ обеспечивает точность считывания 2 см при скорости движения до 200 км/ч, но подразумевает существенные дополнительные финансовые вложения в инфраструктуру, а также выполнение чрезвычайно трудоемких геодезических измерений длины рельсового пути между такими НО.

Научной группой кафедры ЛИНС была разработана и исследована ИСОН в составе БИНС/СНС/одометр [4], [11], [12], а также проведена ее апробация в составе ПВ Германии OMWE и России ЦНИИ-4МД и ИНТЕГРАЛ.

Для проверки эффективности работы схем ИСОН было выполнено несколько контрольных проездов немецкого ПВ OMWE по участку пути длиной 20 км с тремя датчиками InduSI, расстояние между которыми составляло примерно 12 и 8 км. Погрешность интегрированной системы контролировалась сравнением ее показаний с данными о дистанции между пикетами, предоставленными метрологической службой железной дороги. На рис. 8 показаны зависимости от пройденного пути разности $d_A = S_{ДП} - S_{ис}$ ($S_{ис}$ – дистанция по показаниям ИСОН, а $S_{ДП}$ – по ДП). Кривая d_{A1} соответствует оценке ошибки, определенной ИСОН при комплексировании БИНС/ДП и СНС по географическим координатам, d_{A2} – по скоростям. Начало проезда совпадает с расположением InduSI1. Точки d_2 и d_3 на оси ординат представляют действительные значения погрешностей показаний ДП на основе ин-

формации о местоположении InduSI. Расхождения показаний ИСОН и метрологических служб в точках InduSI2 и InduSI3 не превысили 20 см.



Результаты испытаний ИСОН в составе российского ПВ (ЦНИИ-4) также показали увеличение точности воспроизведения измерений пройденной дистанции от проезда к проезду по одному и тому же (одколейному) участку пути до 2 м при исходном расхождении 26 м. Анализ позволил получить модель погрешностей ДП:

$$\delta S = \delta S_0 + l \sum (m_1 + m_2 v + m_3 \dot{v}) \times \left(1 - \frac{m_4 (1 + m_5 \text{sign } v)}{R} \right) + v_{ДП},$$

где δS_0 – ошибка начальной выставки; $m_1 \approx 0.0005 \dots 0.005$ – относительная погрешность одометра; m_2 , m_3 и m_4 – коэффициенты зависимости погрешности от скорости, ускорения и движения по криволинейному участку пути; m_5 – коэффициент зависимости погрешности от направления движения; l – инкремент одометра (0.235 м); $v_{ДП}$ – случайная инструментальная погрешность.

Наиболее полным и эффективным способом повышения точности измерения пройденного пути является интегрирование одометра с ИНС, GPS и НО на трассе. Опытная эксплуатация ММ в составе АВИКОН-03М показала, что в качестве таких НО могут выступать конструктивные особенности рельсового полотна – стыки, стрелочные переводы и т. п., а использование процедуры взаимной корреляции сигналов одного и того же микромеханического модуля, но теперь уже в разных проездах при их предварительном сведении по показаниям ДП и сигналов СНС, в силу

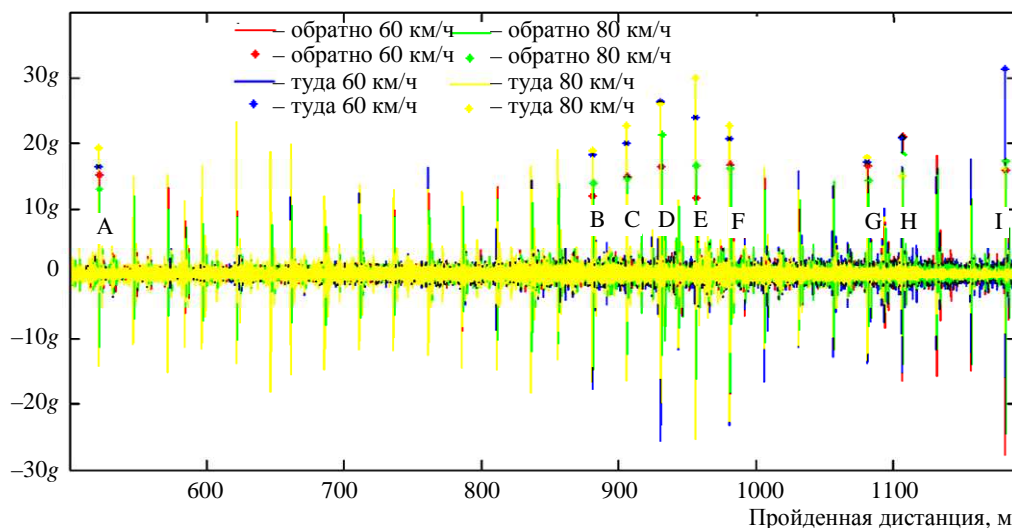


Рис. 9

квазипостоянства положения пути позволяет достичь существенного эффекта в задаче коррекции ДП. На рис. 9 приведены показания одного из ММ в восьми проездах одного и того же участка пути с разными скоростями движения.

Видно, что амплитуды сигналов меняются, но их пространственное положение, естественно, остается неизменным. Кроме того, измерение времени между реакциями на стык первого и следом идущего колеса, исходя из фиксированного расстояния между ними, позволяет дополнительно оценить текущую скорость движения.

Все рассмотренные ранее варианты реализации НО в той или иной степени предполагают использование сигналов приемной аппаратуры СНС. Однако штатный режим ее работы характеризуется значительными погрешностями (порядка 10...15 м) в определении координат, а реализация дифференциального режима предполагает строительство референц-станций каждые 50 км, что не всегда возможно. С другой стороны, сам по себе путь, являясь квазипостоянной структурой, несет в себе значительный объем априорной информации о траектории движения, что, безусловно, может быть использовано для случаев многократных прохождений контролируемого участка пути.

Характерной особенностью формы железнодорожного пути в плане является то, что траектория может быть представлена последовательно прямолинейных и криволинейных участков. Последние, в свою очередь, характеризуются серией переходных (рис. 10) и круговой кривых. Математически переходная кривая (клотоида) может быть описана следующими выражениями:

$\xi = L + aL^5$, $\eta = bL^3 + cL^7$, а круговая кривая: $\xi = R\sin(L/R)$, $\eta = R[1 - \cos(L/R)]$, где L – пройденная дистанция; R – радиус кривизны. Соответственно в случае формирования массива данных СНС, пополняемого от проезда к проезду, данные соотношения могут быть использованы для статистической обработки. При этом результаты аппроксимации становятся фактически электронной картой пути, содержащей в себе, в том числе, информацию о местах систематических пропаданий и искажений сигналов СНС, при прохождении которых корректировать показания БИНС следует исключительно по ДП.

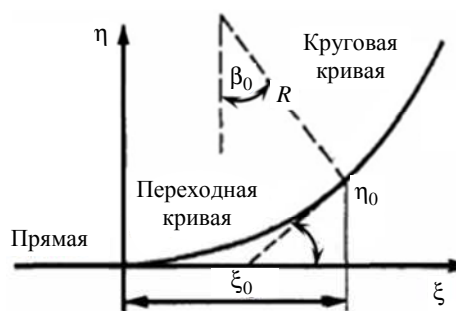


Рис. 10

Для эффективного комплексирования показаний БИНС и СНС, учитывая, что приемная антенна установлена на крыше вагона, необходимо брать в расчет ее колебательное движение. Особенностью железнодорожного транспорта является то, что помимо колебательного движения относительно плоскости горизонта при движении по криволинейным участкам пути курсы тележек и кузова вагона отличаются на десятые доли градуса. Были выработаны рекомендации по месту монтажа приемной антенны – над шкворнем те-

лежки, на которой установлена БИНС (см. рис. 6). В этом случае проекции вектора линейной скорости будут совпадать.

Таким образом, к настоящему времени можно выделить следующие основные результаты работы научной группы кафедры ЛИНС по созданию современного мониторингового оборудования для железных дорог:

1. Предложено использование ММ для измерения результирующих сил в точках контакта «колесо–рельс», а также для выявления импульсных неровностей рельсовых нитей, диагностируемых в настоящее время исключительно ручными средствами.

2. Разработано математическое описание динамического взаимодействия рельсового пути и подвижного состава, необходимое для выработки требований к точностным характеристикам инерциальных датчиков и систем на их основе в зависимости от мест установки. В результате стало возможно приступить к практической реализации методов нормирования результатов измерений ПВ по скорости и нагрузке, что позволит учитывать отличия в массогабаритных и динамических характеристиках ПВ и других типов подвижных единиц железнодорожных составов.

3. Разработана система диагностики неровностей рельсового пути с использованием ММ, которая позволяет автоматизировать процедуру измерения импульсных неровностей рельсовых нитей. При этом дополнительно диагностируются возникающие в процессе эксплуатации ПВ отклонения формы поверхности катания колес от цилиндрической. В результате достоверность

традиционных методов измерения просадок также возрастает.

4. Разработана ИСОН на рельсовом пути, предполагающая, во-первых, использование уточненной математической модели погрешностей ДП (зависимости от пространственного положения рельсового пути и динамических характеристик ПВ), а во-вторых, организацию дополнительных НО (стыки, стрелочные переводы и т. п.), для индикации прохождения которых могут быть эффективно использованы ММ. Предложенный алгоритм, использующий стыки в качестве навигационных отметчиков, позволяет снизить погрешности в определении местоположения дефектов рельсового пути со значения порядка 1м/км (погрешность датчика пути) до 1...6 см для скоростей движения 40...200 км/ч (в отличие от одометра погрешность не накапливается, а носит случайный характер), а значит, и совместно обрабатывать данные, полученные в результате нескольких экспериментальных проездов по одному и тому же участку рельсового пути. Показана принципиальная возможность формирования единой для всех ПВ и иных диагностических средств геоинформационной базы данных о состоянии пути – для определения местоположения и выявления тенденций развития дефектов. Подобная электронная карта должна содержать в себе в первую очередь такие параметры, как кривизна пути и географические координаты стационарных навигационных отметчиков (пикетные столбы и пр.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Inertial System for Railway Track Diagnostics / E. D. Bokhman, A. M. Boronahin, Yu. V. Filatov, D. Yu. Larrisonov, L. N. Podgornaya, R. V. Shalymov // Proc. on Symp. Inertial Sensors and Systems, Germany, 18–19 Sept. 2012, Karlsruhe. P. 17.1–17.20.

2. Технические указания по определению и использованию характеристик устройства и состояния пути, получаемых вагонами путеобследовательскими станциями ЦНИИ-4. Утв. МПС РФ 29.09.2003 № ЦПТ-55/15. М., 2003.

3. British standard. Railway applications – Track – Track geometry quality. P. 1: Characterisation of track geometry. BS EN 13848-1:2003+A1:2008.

4. Боронахин А. М. Интегрированные инерциальные технологии динамического мониторинга рельсового пути: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2013.

5. Мочалов А. В. Инерциальные методы и средства динамических измерений параметров движения и деформаций объектов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2002.

6. Подгорная Л. Н. Разработка и исследование интегрированной инерциальной системы диагностики рельсового пути на микромеханических чувствительных элементах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2010.

7. Боронахин А. М. Малогабаритная инерциальная система диагностики рельсового пути // Радиоэлектронные комплексы многоцелевого назначения: сб. науч. тр. Юбилейный вып. 1991–2011 ОАО «Радиоавионика». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.

8. Шалымов Р. В. Разработка и исследование инерциальной системы мониторинга рельсового пути: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2014.

9. MEMS-Based Inertial System for Railway Track Diagnostics / A. M. Boronahin, L. N. Podgornaya, E. D. Bokhman, N. S. Filipenya, Yu. V. Filatov, R. V. Shalymov, D. Yu. Larionov // Gyroscopy and Navigation. Vol. 2, № 4. P. 262–269.

10. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути: ЦП-774/ МПС РФ. М.: Транспорт, 2000.

11. Integrated System for Navigation on Railway Tracks / A. M. Boronahin, M. Rechel, J. Schmeister,

A. V. Mochalov // Proc. on Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany, 19–20 Sept. 2001. P. 17.0–17.18.

12. Боронахин А. М., Казанцев А. В., Карпасов С. А. Результаты экспериментальных исследований системы навигации на рельсовом пути в составе путеизмерительного вагона ЦНИИ-4 // Навигация и управление движением: IV НТК молодых ученых, 12–14 марта 2002 г./ ЦНИИ «Электроприбор». СПб., 2002. С. 286–291.

A. M. Boronachin, E. D. Bochman, D. Yu. Larionov, L. N. Podgornaya, Yu. V. Filatov, R. V. Shalymov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

INERTIAL TECHNOLOGIES IN THE TASKS OF RAIL TRACK MONITORING

Review of research and development results in the field of development of track state monitoring methods and means, held at the Department of Laser measuring and navigation systems is carried out. Results of research activities on the development and effective use of high technologies in the railway track diagnostics over the last 20 years are considered.

Diagnosis of the track, dynamic interaction of the track and the car, SINS, the geometric parameters of the rail track, the rolling surface defects of rails, navigation on the track
