

УДК 625.171

Канд. техн. наук В. В. КОЧЕРГИН, д-р Г. ГРАБНЕР, инж. И. Н. МАКСИМОВ,
д-р. техн. наук, проф. В. О. ПЕВЗНЕР

Система выявления участков пути с повышенным уровнем воздействия на экипаж скоростного подвижного состава

Аннотация. Рассматриваются этапы разработки и анализ результатов работы системы непрерывного контроля показателей динамической системы экипаж — путь (КПДС), предназначенной для индикации участков пути в части определения мест, вызывающих повышенное воздействие на экипаж в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях. Целью индикации является непрерывная оценка необходимости проведения внепланового обследования конкретных участков пути. Система КПДС не заменяет существующих методов диагностики пути, а является дополнением к ним.

Система КПДС разработана на базе универсального диагностического комплекса и установлена на электропоездах «Сапсан» № 2 и № 6. Индикация состояния пути выполняется по признаку наличия повышенных уровней реакций динамической системы вагона электропоезда на конкретных участках пути.

Результаты измерений (индикации), выполненных на линии Москва — Санкт-Петербург, показывают высокую повторяемость участков пути с повышенным уровнем воздействия на несущие элементы экипажа по длине пути и во времени.

Анализ влияния неровностей на динамическую нагруженность экипажа выполнялся в рамках исследовательской работы при проведении ходовых динамико-прочностных испытаний электропоезда Desiro RUS («Ласточка»).

На основании выполненных исследований разработаны Технические требования к системам КПДС второго поколения, в которых предусмотрено наличие тензометрических каналов, их использование позволит продолжить и развить направление исследований влияния вертикальных неровностей различной длины (менее 3 м, 3–25 м и более 25 м) на формирование напряженного состояния несущих элементов экипажа.

Ключевые слова: неровности пути; индикация участков пути; повышенный уровень воздействия; показатели динамики; напряженное состояние; методы диагностики пути; короткие неровности; вертикальные ускорения

Анализ результатов ходовых динамико-прочностных и динамических испытаний, а также опыт эксплуатации электропоездов «Сапсан» на линиях Санкт-Петербург — Москва и Москва — Нижний Новгород свидетельствует о наличии трех факторов нагружения экипажной части вагонов электропоезда, обусловленных различными причинами, лежащими в плоскости оценки состояния пути. Эти три фактора определяют нагружение различных элементов экипажной части и заключаются в следующем:

1. Наличие не выявляемых штатными средствами измерения и оценки пути длинных неровностей в профиле, вызываемых, как правило, деформациями подбалластного слоя и земляного полотна.

2. Наличие неровностей пути в плане, не в полной мере выявляемых штатными средствами диагностики пути, вызывающих значительные горизонтальные поперечные ускорения рамы тележки.

3. Наличие коротких неровностей пути, вызывающих ударное воздействие на узлы, связанные с необрессоренными массами (колеса, оси колесных пар, буксовые подшипники, необрессоренные части опорно-осевых редукторов).

Длинные неровности пути в профиле в наибольшей степени оказывают влияние на колебания кузовов вагонов, что в ряде случаев приводит к резкому росту амплитуд колебаний кузова на пневмоподвешивании второй ступени и касанию кузова аварийных упоров. Так, при проведении сертификационных динамико-прочностных испытаний электропоезда «Сапсан» на одних и тех же местах высокоскоростного участка в опытных поездках в салонах вагонов фиксировались повышенные уровни вертикальных ускорений, вызывающие дискомфорт пассажиров. При этом неровности, вызывающие эти колебания, не регистрировались штатными системами путеизмерения. Необходимо отметить, что рессорное подвешивание вагонов электропоездов «Сапсан» весьма совершенно и обеспечивает необходимый комфорт пассажиров в достаточно широком диапазоне изменения состояния пути.

Результаты многочисленных исследований ОАО «ВНИИЖТ» в части влияния неровностей пути в плане и профиле на показатели динамики и прочности экипажей высокоскоростного электропоезда «Сапсан» показали необходимость выявления участков пути с повышенным воздействием на экипаж.

Различные подходы к решению подобных задач и способы их решения приведены в [1–10]. В работах [1, 2, 3, 8, 9] рассмотрен широкий круг вопросов взаимодействия пути и подвижного состава при различных способах задания параметров неровностей пути. В статье доктора техн. наук, проф. Ю. С. Ромена [7] рассматривается возможность оборудования путеизмерителей или центров диагностики вычислительными комплексами, в которые заложена модель динамических колебаний и нагружения элементов скоростного подвижного состава при использовании в качестве возмущающих функций характеристик натуральных

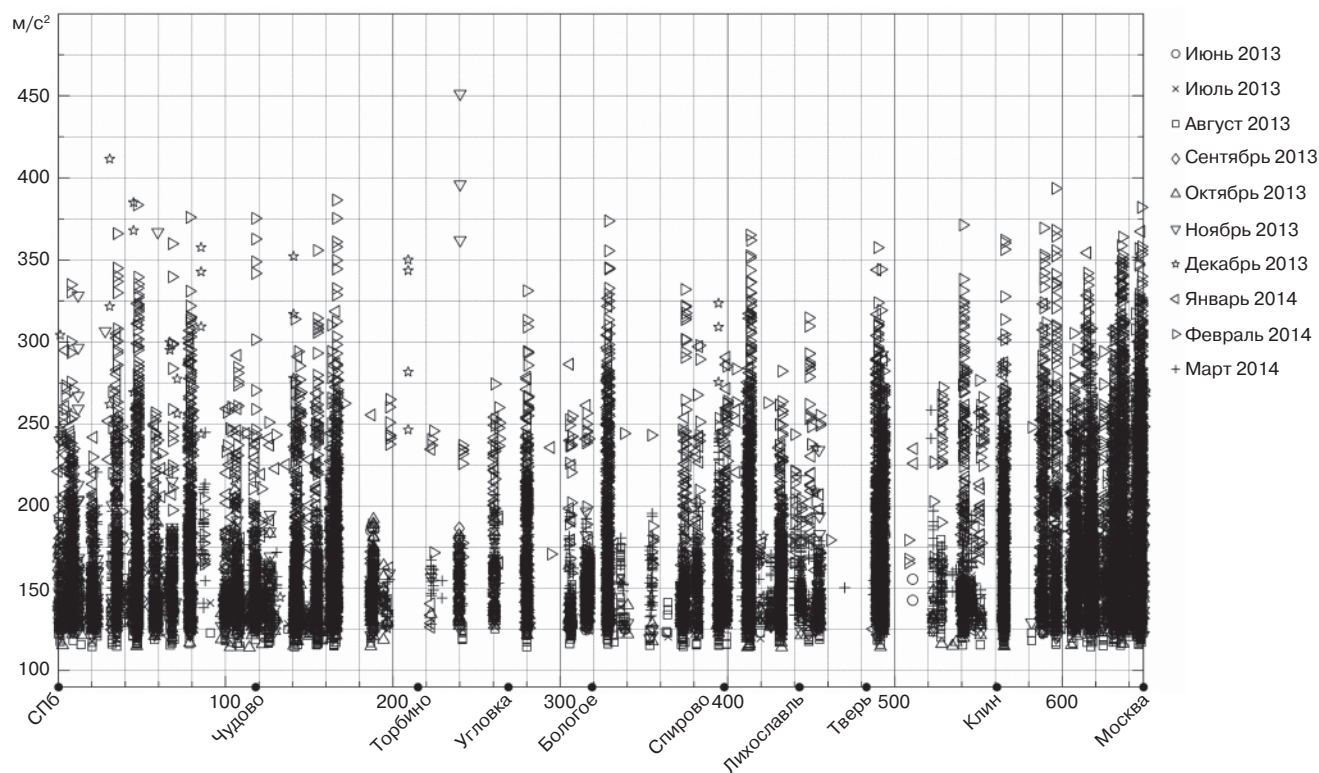


Рис. 1. График повторяемости во времени участков пути с повышенным уровнем вертикальных ускорений букс электропоезда «Сапсан» на линии Москва — Санкт-Петербург

неровностей, получаемых на базе штатных измерений. Вопросам использования характеристик неровностей пути в системе диагностики и управления состоянием пути посвящены работы [4, 5, 6].

В случае с электропоездом «Сапсан» было признано целесообразным приступить к созданию системы непосредственной индикации участков пути с повышенным уровнем воздействия на подвижной состав по показателям динамики экипажей и напряжения в их элементах.

Система выявления (индикации) участков пути с повышенным уровнем показателей динамики скоростного подвижного состава (система непрерывного контроля показателей динамической системы экипаж — путь (КПДС)) предназначена для индикации участков пути в части определения мест, вызывающих повышенное воздействие на экипаж в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях. Целью индикации является непрерывная оценка потребности проведения внепланового обследования конкретных участков пути.

Система КПДС не заменяет существующих методов диагностики пути, а является дополнением к ним.

Идея создания системы индикации была поддержана информацией о выполняемой «Сименс АГ» разработке универсального комплекса для диагностики ходовых частей электропоезда «Сапсан». Разработка КПДС на базе универсального диагностического

комплекса выполнялась в соответствии с Техническими требованиями.

Индикация состояния пути выполняется по признаку наличия повышенных уровней реакций динамической системы вагона электропоезда на конкретных участках пути.

Оценка реакции подвижного состава осуществляется по ускорениям на элементах экипажа, характеризующих уровни необрессоренной динамики, — буксах колесных пар (вертикальные ускорения), для обрессоренной динамики — по горизонтальным поперечным ускорениям рам тележек и вертикальным и горизонтальным поперечным ускорениям кузова вагона. Система КПДС установлена на электропоездах «Сапсан» № 2 и № 6 на 4-м и 5-м вагонах соответственно. Системы КПДС регистрируют уровни ускорений на всем протяжении движения поезда с привязкой их к участкам пути по показаниям системы GPS, встроенной в систему КЛУБ-У.

Признаком наличия отклонений в содержании пути, требующих принятия мер по их устранению, является повторяемость на одном и том же отрезке пути повышенных реакций датчиков системы КПДС, установленных на нескольких поездах.

В процессе освоения системы КПДС и опытной ее эксплуатации были выполнены измерения на линии Санкт-Петербург — Москва. На рис. 1 представлены результаты измерений вертикальных ускорений

букс, выполненных в период с июня 2013 по январь 2014 г. На рис. 1 отчетливо видны участки пути с повышенным воздействием на экипаж и устойчивой повторяемостью во времени этих воздействий. Вертикальные колонки ускорений характеризуют состояние этих участков как требующих той или иной степени реагирования. Следует отметить, что существующие средства путеизмерения на ряде участков пути с повышенным воздействием на экипаж характеризуют их состояние как отличное.

Для обработки результатов непрерывных измерений разработан метод, который позволяет подробно анализировать и производить оценку наиболее значимых результатов. В соответствии с этим методом выполняется амплитудная обработка процессов, регистрируемых датчиками системы КПДС. Анализ выполняется по максимальным значениям амплитуд.

Для более полного получения характеристик неровностей на выявленных при индикации участках с повышенным влиянием пути на динамические показатели экипажа было решено использовать так называемые натурные неровности, соответствующие реальному положению пути, а не их отображения, получаемые с помощью диагностических средств при измерениях от хорд различной длины. Опыт применения таких неровностей при оценке состояния пути имеется и в нормативных документах Европы (например,

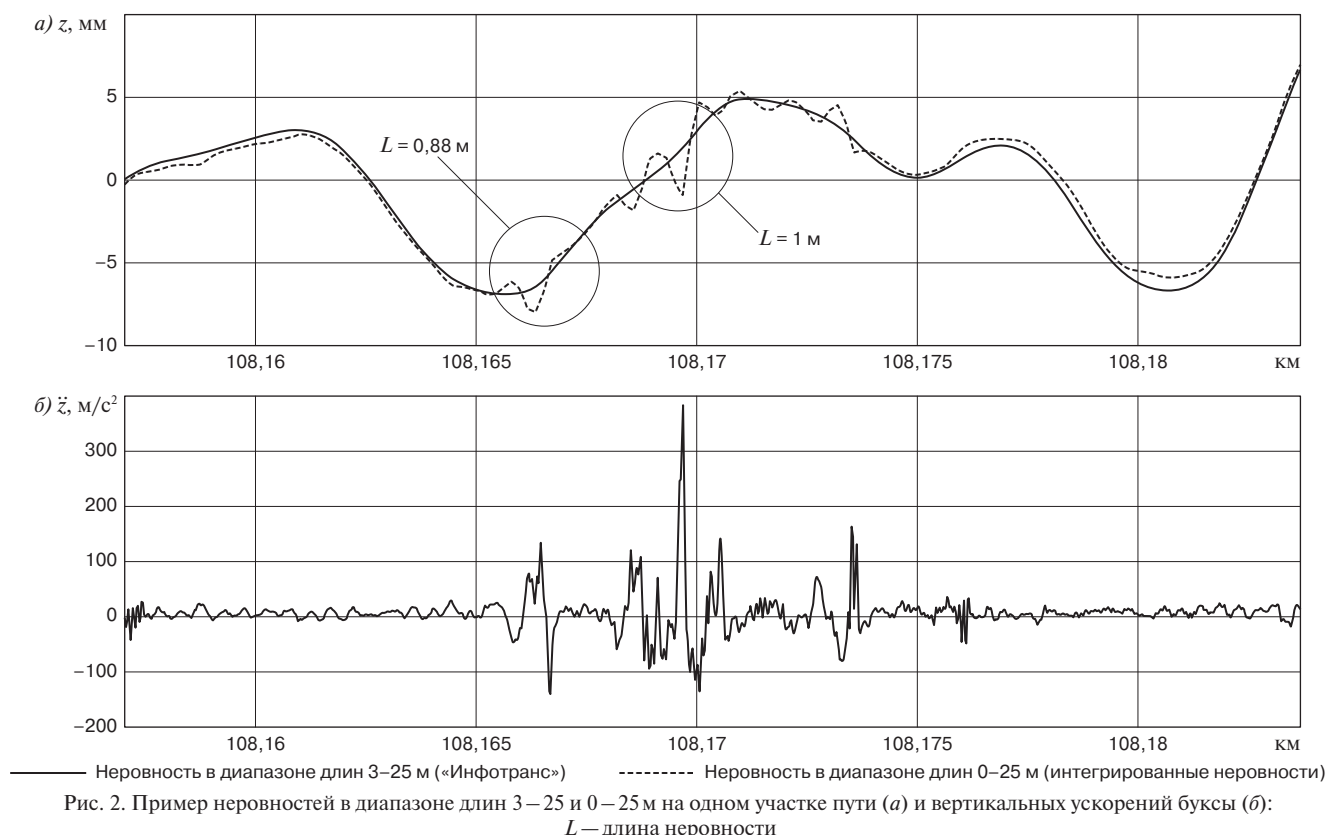
UIC 518, EN 13848). Получение параметров этих неровностей возможно двумя способами:

- на базе промеров пути с использованием преобразования Фурье и соответствующих передаточных функций [4];
- путем двойного интегрирования сигналов датчиков вертикальных ускорений на буксе испытываемого подвижного состава [10].

При сравнении «натурных» неровностей, полученных по методике «Инфотранс» и методом двойного интегрирования сигналов датчиков вертикальных ускорений на буксах системы КПДС в диапазоне длин 3–25 м, получено весьма близкое совпадение этих неровностей. Это дало возможность применить метод двойного интегрирования вертикальных ускорений на буксах для получения и анализа натурных неровностей длиной менее 3 м.

Анализ влияния полученных неровностей длиной менее 3 м на динамическую нагруженность экипажа был продолжен в рамках исследовательской работы при проведении ходовых динамико-прочностных испытаний электропоезда Desiro RUS («Ласточка»).

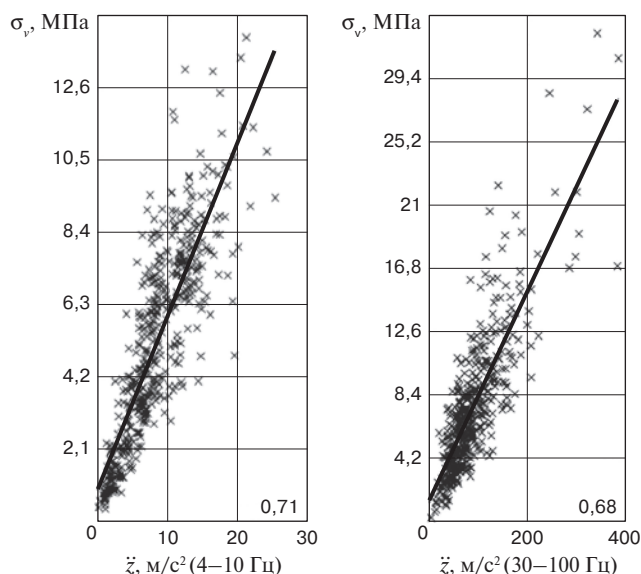
Сравнение неровностей длиной 3–25 м и 0–25 м показывает, казалось бы, незначительные их отличия (рис. 2), однако наличие неровностей длиной до 1 м приводит к повышенному уровню вертикальных ускорений на буксе (величиной до 400 м/с²).



При проведении этой работы датчики ускорений были установлены аналогично расположению датчиков системы КПДС. Дополнительно к датчикам ускорений системы КПДС рама тележки была оборудована тензометрическими измерительными схемами для измерения напряженного состояния и выявления возможной корреляции с процессами ускорений.

Опытные поездки выполнялись на линиях Санкт-Петербург — Москва, Москва — Нижний Новгород, Санкт-Петербург — Великий Новгород и на Московском пригородном узле.

Одной из целей данной работы было исследование влияния неровностей различной длины на формирование напряженного состояния несущих элементов тележки. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты обработки синхронных записей вертикальных ускорений на буксах и динамических напряжений в раме тележки в зоне сочленения поперечной балки с боковиной (верхний и нижний пояс), которые были обработаны по максимальным амплитудным значениям без фильтрации и с фильтрацией в полосах частот



Динамические напряжения в несущих элементах тележки определяются неровностями пути длиной до трех метров.

№ п/п	Диапазоны частот, Гц	Диапазоны длин неровностей, м	1Л19*		1Л20*	
			σ_v	%**	σ_v	%**
1	4—10	4,44—11,1	14	29	10	22
2	10—30	1,48—4,44	26	54	27	63
3	30—100	0,44—1,48	33	67	35	68
4	Нефильтрованный процесс		48		43	

*Измерительные точки расположены на внутреннем контуре сочленения боковой и поперечной балок.

**Доля максимального значения нефильтрованного процесса.

Рис. 3. Напряжения в раме тележки для различных диапазонов частот вертикальных ускорений на буксе:

σ_v — напряжения в измерительных точках; z — вертикальные ускорения букс

4—10, 10—30 и 30—100 Гц, что при скорости движения 160 км/ч соответствует длинам неровностей 4,44—11,1, 1,48—4,44 и 0,44—1,48 м.

Данные, приведенные в таблице на рис. 3, наглядно показывают, что наиболее значимое влияние на формирование напряженного состояния несущих элементов тележки оказывают неровности длиной менее 3 м. Так, неровности пути длиной 0,44—1,48 м в зоне сочленения боковой и поперечной балок рамы тележки вызывают напряжения величиной 33 МПа, что составляет 67% максимальных напряжений, замеренных в данной точке.

На практике такие неровности встречаются достаточно часто. Природа их возникновения, вид и форма могут быть самыми разнообразными. На рис. 4 приведен пример короткой неровности, в ряде случаев не фиксируемой штатными средствами путеизмерения и, следовательно, не принимаемой во внимание при оценке состояния пути и определении допускаемой скорости движения. При этом такие неровности оказывают определяющее влияние на формирование напряженного состояния несущих элементов тележки и, естественно, оценку этого напряженного состояния.

Неразрывно с этим связано развитие направления исследований неровностей пути длиной менее 3 м и их влияния на формирование напряженного состояния в несущих элементах экипажей.

Принципиально важно, что задача разработки нормативов допускаемых уровней ускорений, регистрируемых системой КПДС, требующих той или иной степени реагирования, неразрывно связана с исследуемыми показателями воздействия на экипаж. В этом направлении получены первые результаты, которые показывают необходимость проведения большого объема измерений с одновременной регистрацией динамических (ускорений) и прочностных (напряжений несущих элементов) параметров. На основе этих измерений могут быть получены нормативные значения допускаемых уровней ускорений для принятия соответствующих решений.

В перспективных требованиях к системам КПДС второго поколения предусмотрено наличие тензометрических каналов, использование которых позволит продолжить и развить направление исследований влияния вертикальных неровностей различной длины (менее 3 м, 3—25 м и более 25 м) на формирование напряженного состояния несущих элементов экипажа. Установка систем КПДС предусматривается как на поездах «Сапсан», так и на более массовых поездах «Ласточка».

Для обеспечения устойчивой повторяемости (индикации) мест с повышенным уровнем воздействия на экипаж скоростного подвижного состава системами КПДС должно быть оборудовано не менее трех поездов для каждого замкнутого маршрута.

Выводы. 1. На основании опыта многолетних исследований взаимодействия пути и подвижного состава разработана система выявления (индикации) участков пути с повышенным уровнем воздействия на несущие элементы экипажа — система непрерывного контроля показателей динамической системы экипаж — путь (КПДС). Система КПДС не заменяет существующих методов диагностики пути, а является дополнением к ним.

2. Система КПДС разработана на базе универсального диагностического комплекса и установлена на электропоездах «Сапсан» № 2 и № 6.

3. Результаты измерений (индикации) показывают высокую повторяемость участков пути с повышенным уровнем воздействия на несущие элементы экипажа по длине пути и во времени.

4. С использованием фрагментов системы КПДС выполнен анализ влияния неровностей различной длины, в том числе менее 3 м, на динамическую нагруженность рамы тележки электропоезда Desiro RUS («Ласточка»). Анализ показал преимущественное влияние на формирование напряженного состояния несущих элементов тележки неровностей длиной менее 3 м.

5. На основании выполненных исследований разработаны Технические требования к системам КПДС второго поколения, в которых предусмотрено наличие тензометрических каналов, использование которых позволит продолжить и развить направление исследований влияния вертикальных неровностей различной длины (менее 3 м, 3–25 м и более 25 м) на формирование напряженного состояния несущих элементов экипажа. В Технических требованиях предусматривается также возможность передачи результатов обработки измерений непосредственно в диагностические центры инфраструктуры для принятия соответствующих решений.

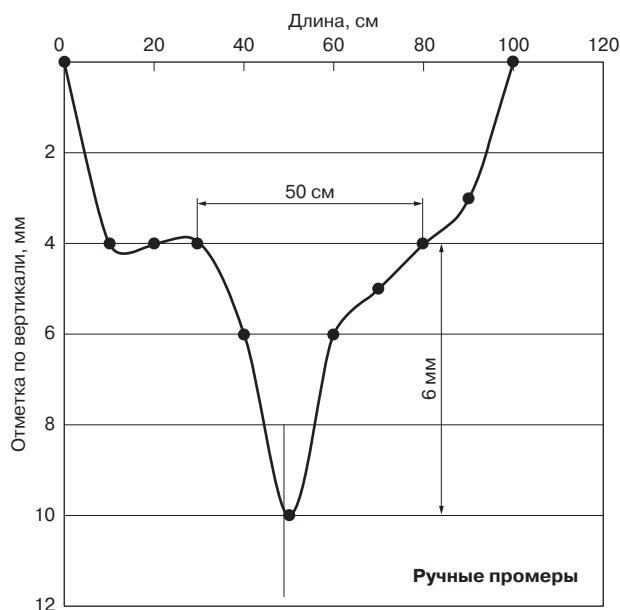


Рис. 4. Пример «короткой» неровности, не фиксируемой штатными системами путеизмерения (разрешенная скорость 120 км/ч)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 560 с.
2. Грачева Л.О. Взаимодействие вагонов и железнодорожного пути // Труды ЦНИИ МПС. М.: Транспорт, 1968. 206 с.
3. Данович В.Д., Мокрый Т.Ф., Трубицкая Е.Ю. Исследование пространственных колебаний пассажирского вагона. — В кн.: Динамика и прочность сложных механических систем. Киев: Наукова думка, 1977. 58 с.
4. Ефимов А.Н., Малинский С.В., Певзнер В.О. Исследование спектральных характеристик неровностей железнодорожного пути // Исследование взаимодействия пути и современного подвижного состава: межвузовский сборник научных трудов / ДИИТ. 1987. С. 45–52.
5. Певзнер В.О. Деформативность и стабильность пути // Путь и путевое хозяйство. 2005. № 2. С. 23–26.
6. Певзнер В.О., Суслов О.А., Ромен Ю. С. О разработке дополнений к нормативной документации по дифференциации скоростей движения пассажирских и грузовых поездов в местах

действия предупреждений об ограничении скорости // Труды международной научно-практической конференции «Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава». Днепропетровск, 2013. С. 15.

7. Оценка состояния пути на основе моделирования процессов взаимодействия в системе колесо — рельс / Ю. С. Ромен [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2014. № 5. С. 58–62.

8. Халупович Х.Г. Исследование спектров случайных колебаний в конструкциях подвижного состава железных дорог: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. 1968. 22 с.

9. Haigermoser A., Bezin Y., Coudert F., Eickhoff B., Grabner G., Kraft S., Thomas D., Zacher M. Der Einfluss der Gleislage auf das Fahrverhalten der Fahrzeuge — Ergebnisse aus dem EU-Projekt DYNOTRAIN. ZEVrail: Zeitschrift für das gesamte System Bahn, 2013, no. 137, pp. 159–171.

10. Neveu S., Vicol T., Coudert F. Use of Axle-Box Acceleration to monitor Track Vertical Geometry and Short Defects of Rails / S. Neveu, T. Vicol, F. Coudert. Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology — Civil-Comp Press — 2014. P. 83.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЧЕРГИН Виктор Васильевич,
заведующий отделением «Транспортная механика»,
ОАО «ВНИИЖТ».
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10.
Тел.: (495) 602-80-14.
E-mail: tdp@vniizht.ru

ГРАБНЕР Геральд,
инженер-расчетчик, «Сименс АГ».
Австрия, 8020, Грац, Эгенбергер ул., 31.

Тел.: +43 664 8855 7061.
E-mail: gerald.grabner@siemens.com

МАКСИМОВ Игорь Николаевич,
зав. лабораторией, ОАО «ВНИИЖТ».
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10.
Тел.: (499) 260-42-74.
E-mail: tdp1@vniizht.ru

ПЕВЗНЕР Виктор Ошеревич,
главный научный сотрудник, ОАО «ВНИИЖТ».
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10.
Тел.: (499) 260-45-60.
E-mail: vpevzner@list.ru

A system to identify track sections producing excessive impacts on the undercarriage of high-speed rolling stock

Victor V. Kochergin, Candidate of Technical Science, Head of Department for Transport Mechanics, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (495) 602 8014. E-mail: tdp@vniizht.ru

Gerald Grabner, DI. Dr., Structural Analyst, Siemens Transportation Systems GmbH & Co KG, Egenberger Strasse 31, 8020 Graz, Austria. Tel.: +43 664 8855 7061. E-mail: gerald.grabner@siemens.com

Igor N. Maksimov, Laboratory Chief, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 260 4274. E-mail: tdp1@vniizht.ru

Victor O. Pevzner, Dr. of Technical Science, Professor, Chief Researcher, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 260 4560. E-mail: vpevzner@list.ru

Abstract. Considerations relate to the stages of development and output evaluation of workability of a system for continuous control of parameters incidental to 'undercarriage/track' dynamic system (CPDS), aimed to identify track sections responsible for excessive impacts on the undercarriage along the vertical and horizontal transverse axes. Monitoring aims to produce a continuous evaluation of the need to perform a non-scheduled examination of specific track sections. CPDS System does not replace the existing methods for track diagnostics but elaborates them.

CPDS System was developed on the basis of a standard diagnostic facility and was installed onboard 'Sapsan' trains No. 2 and No. 6. Indication of track conditions is focused on indicators incidental to excessive reaction levels in the EMU vehicle dynamic system manifested on certain track sections.

Analysis of measurements (indications) performed along the line Moscow—St.-Petersburg have shown high recurrence when registering track sections (their length and seizure time) producing excessive impacts on the bearing elements of a vehicle.

Analysis of impacts on dynamic burden of undercarriage produced by track irregularities was performed as a part of researches held at the time of EMU Desiro RUS ('Lastochka') running dynamic-strength tests on the line.

On the grounds of above researches an Engineering Specification for the second generation of CPDS System has been produced to include a requirement for strain-measuring channels, which will allow to continue and promote researches related to the impact of vertical track irregularities of various length (less than 3 m, 3–25 m and above 25 m) upon stress formation in the bearing elements of a vehicle.

Keywords: track irregularities; track sections labelling; higher level of impact; dynamics parameters; stress condition; methods for track diagnostics; short irregularities; vertical accelerations

References

1. Verigo M.F., Kogan A.Ya. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [Track interaction with the rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1986. 560 p.
2. Gracheva L.O. *Vzaimodeystvie vagonov i zheleznodorozhnogo puti* [Interaction of cars and railway tracks]. Trudy TsNII MPS [Proc. All-Union Cent. Res. Inst. of Railway Transport], 1968, no. 356. 206 p.
3. Danovich V.D., Mokriy T.F., Trubitskaya E.Yu. *Issledovanie prostranstvennykh kolebaniy passazhirskogo vagona* [The study of spatial fluctuations of the passenger car]. Dinamika i proch-

nost' slozhnykh mekhanicheskikh sistem [Dynamics and strength of complex mechanical systems]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1977. 58 p.

4. Efimov A.N., Malinskiy S.V., Pevzner V.O. *Issledovanie spektral'nykh kharakteristik nerovnostey zheleznodorozhnogo puti* [Study of the spectral characteristics of the railway track irregularities]. *Issledovanie vzaimodeystviya puti i sovremennogo podvizhnogo sostava*. Mezhvuz. sb. nauch. tr. DIIT [Investigation of the interaction of track and modern rolling stock. Interuniv. coll. sci. pap. DIRE]. Dnepropetrovsk, 1987, pp. 45–52.

5. Pevzner V.O. *Deformativnost' i stabil'nost' puti* [Deformability and stability of the track]. Put' i putevoe khozyaystvo, 2005, no. 2, pp. 23–26.

6. Pevzner V.O., Suslov O.A., Romen Yu.S. *O razrabotke dopolneniy k normativnoy dokumentatsii po differentsiatsii skorostey dvizheniya passazhirskikh i gruzovykh poezdov v mestakh deystviya preduprezhdeniy ob ogranichenii skorosti* [On the development of additions to the standard documentation for the differentiation of the velocity of movement of passenger and freight trains in areas exposed to warnings about speed limits]. 'Problemy vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava'. Tr. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Problems of track interaction with the rolling stock]. Proc. int. sci.-pract. conf.]. Dnepropetrovsk, 2013, p. 15.

7. Romen Yu.S. et al. *Otsenka sostoyaniya puti na osnove modelirovaniya protsessov vzaimodeystviya v sisteme koleso—rel's* [Assessment of the track state based on modeling of the interaction in the wheel—rail system]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2014, no. 5, pp. 58–62.

8. Khalupovich Kh.G. *Issledovanie spektrov sluchaynykh kolebaniy v konstruktsiyakh podvizhnogo sostava zheleznynykh dorog*. Kand. tekhn. nauk. diss. Avtoref. [Study of the spectra of random fluctuations in the constructions of railway rolling stock. Cand. tech. sci. diss. Synopsis]. 1968. 22 p.

9. Haigermoser A., Bezin Y., Coudert F., Eickhoff B., Grabner G., Kraft S., Thomas D., Zacher M. *Der Einfluss der Gleislage auf das Fahrverhalten der Fahrzeuge—Ergebnisse aus dem EU-Projekt DYNOTRAIN* [On the influence of track geometry quality on the running characteristics of the vehicles—results from the EC-funded research project DYNOTRAIN]. *ZEVRail: Zeitschrift für das gesamte System Bahn*, 2013, no. 137, pp. 159–171.

10. Neveu S., Vicol T., Coudert F. Use of axle-box acceleration to monitor track vertical geometry and short defects of rails. Proc. 2nd Int. Conf. on Railway Technology. Civil-Comp Press Publ., 2014, p. 83.