

## Достигнутый результат внедрения поста акселерометрического универсального контроля и дальнейшие перспективы при определении дефектов на поверхности катания колес вагонов

А. С. Ададунов<sup>1</sup>, А. В. Нерезков<sup>2</sup>, В. И. Федорова<sup>2</sup>, О. А. Суслов<sup>2</sup>, А. В. Лесников<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>АО «ВНИИЖТ»

<sup>2</sup>Научный информационно-аналитический центр АО «ВНИИЖТ»

✉ Lesnikov.Andrej@vniizht.ru

### Резюме

В статье описывается методология возникновения основных дефектов на поверхности катания колеса и представлена современная технология определения и диагностирования этих дефектов на ходу поезда, основанная на акселерометрическом и акустико-эмиссионном методе. Технология представляет из себя пост акселерометрического универсального контроля, эксплуатирующийся по всей территории железных дорог общего пользования ОАО «Российские железные дороги». Пост позволяет выявлять дефекты поверхности катания колесных пар с точностью до стороны конкретного колеса вагона и оперативно передавать данные оператору на пункт технического обслуживания вагонов. Система исключает человеческий фактор в части осмотра колесных пар осмотрщиками вагонов на пунктах технического осмотра. Представлены вид и описание возможностей комплексного диагностического центра, собирающего всю техническую информацию с каждой системы, что позволяет в дальнейшем выгружать различную информацию в удобном виде для пользователя и также анализировать работу. Комплексный диагностический центр помогает контролировать работу 80 систем в реальном времени и своевременно уведомлять ответственных специалистов о неисправностях. В работе описаны дальнейшие пути развития системы и комплексного диагностического центра в части расширения функционала системы по оснащению его тензометрическими датчиками для определения загруженности подвижного состава и разработки предиктивных моделей для прогнозирования развития дефектов поверхности катания колес колесных пар.

### Ключевые слова

дефект на поверхности катания, система диагностики, подвижной состав, железнодорожный путь, комплексный диагностический центр

### Для цитирования

Ададунов А. С. Достигнутый результат внедрения поста акселерометрического универсального контроля и дальнейшие перспективы при определении дефектов на поверхности катания колес вагонов / А. С. Ададунов, А. В. Нерезков, В. И. Федорова, О. А. Суслов, А. В. Лесников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 192–199. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).192-199

### Информация о статье

поступила в редакцию: 10.12.2020, поступила после рецензирования: 19.12.2020, принята к публикации: 12.01.2021

## The achieved result of the introduction of the universal accelerometric control station and further prospects for determining railcar wheel thread defects

A. S. Adadurov<sup>1</sup>, A. V. Nerezkov<sup>2</sup>, V. I. Fedorova<sup>2</sup>, O. A. Suslov<sup>2</sup>, A. V. Lesnikov<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>All-Russian Railway Research Institute (VNIIZHT) AO

<sup>2</sup>The branch of VNIIZHT Data-Analytic Research Center (NIATs)

✉ Lesnikov.Andrej@vniizht.ru

### Abstract

The article describes the methodology of the main defects' occurrence on the wheel thread and presents a modern technology of determining and diagnosing these defects under way, based on the accelerometric and acoustic emission method. The technology is a station of accelerometric universal control, operated throughout the public railways of "Russian Railways" OAO. The station allows you to detect wheel thread defects with accuracy to the side of a particular wheel of the railcar and quickly transmit data to the operator at the railcar check station (RCS). The system eliminates the human factor in the part of the wheelset inspection by the railcars inspectors at the RCS. The view and description of the capabilities of an integrated diagnostic center that collects all the technical information from each system, which allows you to further download various information in a convenient form for the user and also allows you to download the performance analysis. The integrated diagnostic center also allows monitoring the operation of 80 systems in real time and notifying responsible specialists of malfunctions on time. The article also describes the

further development of the system and the integrated diagnostic center in terms of expanding the functionality of the system to equip it with strain gauges for determining the load of rolling stock and developing predictive models to predict the development of wheel thread defects.

### Keywords

wheel thread defect, diagnostic system, rolling stock, railway track, comprehensive diagnostic center

### For citation

Adadurov A. S., Nerezkov A. V., Fedorova V. I., Suslov O. A., Lesnikov A. V. Dostignutyi rezul'tat vnedreniya posta akselerometricheskogo universal'nogo kontrolya i dal'neishie perspektivy pri opredelenii defektov na poverkhnosti kataniya kolyos vagonov [The achieved result of the introduction of the universal accelerometric control station and further prospects for determining railcar wheel thread defects]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 1 (69), pp. 192–199. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).192-199

### Article Info

Received: 10.12.2020, Revised: 19.12.2020, Accepted: 12.01.2021

### Введение

Одной из наиболее важных сборочных единиц в подвижном составе является колесная пара, которая передает нагрузку от кузова вагона и входящего в него груза на железнодорожный путь. Поэтому очень важно своевременно диагностировать возникающие повреждения поверхности катания колес и принимать меры по отцепке вагонов по причине неисправности колесных пар в ремонт для предотвращения крушений на железнодорожном транспорте. Проводить раннюю диагностику по предупреждению дефектов помогает пост акселерометрического универсального контроля (далее – ПАУК), в котором заложено определение дефектов на стадии предбраковочного размера, что позволяет определить расстояние, которое вагон пройдет с имеющимся на колесе дефектом и стадия браковочного размера, когда вагон подлежит отцепке в текущий отцепочный ремонт (ТОР).

### Причины образования дефектов на поверхности катания колес

Как известно, одной из основных причин появления дефектов на колесах и рельсах является контактная усталость. Особенность взаимодействия колеса и рельса заключается в том, что в этом контакте реализуются очень высокие контактные напряжения (до 1 000 МПа иногда и выше), приводящих при больших коэффициентах трения к так называемым пластическим деформациям поверхностей трения [1]. Другая особенность процессов качения с проскальзыванием колес (особенно в кривых) имеется значительное поперечное проскальзывание, которое обусловлено силами крипа и оказывающими большее повреждающее воздействие, чем продольное (продольная сила крипа). Все описанные повреждающие воздействия приводят к возникновению дефектов поверхности катания (ДПК) колесной пары, которые наносят постоянный вред верхнему строению пути.

Силы крипа зависят от упругого скольжения или крипа, характеристик сцепления колес с рельсами, а

также износа колеса и рельса. Важную роль в этом отношении играют материалы, из которых изготовлены колеса и рельсы. Явление крипа возникает при условии, когда два твердых тела при качении друг по другу вызывают значительное взаимное давление. Значения окружных скоростей двух катящихся дуг по другу тел неравны. Безразмерный коэффициент упругого скольжения одного тела по другому (или крип) как раз и используется для определения этих отклонений от условий чистого качения двух тел. Понятие крипа вводится для продольного и поперечного направлений. Картер [2, 3] определил продольный крип  $\xi_x$  (1) и поперечный крип  $\xi_y$  (2) в виде следующих отношений:

$$\xi_x = \frac{\vartheta_{\text{хд}} - \vartheta_{\text{хчк}}}{\vartheta_{\text{хк}}}, \quad (1)$$

где  $\vartheta_{\text{хд}}$  – скорость действительного поступательного движения;  $\vartheta_{\text{хчк}}$  – поступательная скорость чистого качения;  $\vartheta_{\text{хк}}$  – поступательная скорость, вызванная качением;

$$\xi_y = \frac{\vartheta_{\text{уд}} - \vartheta_{\text{учк}}}{\vartheta_{\text{ук}}}, \quad (2)$$

где  $\vartheta_{\text{уд}}$  – скорость действительного поперечного движения;  $\vartheta_{\text{учк}}$  – поперечная скорость чистого качения;  $\vartheta_{\text{ук}}$  – поперечная скорость, вызванная качением [4].

Другой вид крипа –  $\xi_{\text{сп}}$  – поворотный крип (3), определяемый фактором поворота двух контактирующих тел вокруг оси, перпендикулярной плоскости области контакта. Поворотный крип впервые ввел Калкер [5–7], и он определяется отношением:

$$\xi_{\text{сп}} = \frac{\omega_{\text{вт}} - \omega_{\text{нт}}}{\vartheta_{\text{нк}}}, \quad (3)$$

где  $\Omega_{\text{вг}}$  – угловая скорость вращения верхнего тела;

$\Omega_{\text{нт}}$  – угловая скорость вращения нижнего тела;

$\mathcal{D}_{\text{нк}}$  – номинальная скорость качения.

Сила крива является функцией скорости и равна коэффициенту крива, умноженного на крива. Из-за «рысканья» (извилистое движение) колесной пары в пути следования (рис. 1), уравнения движения колесной пары будут иметь вид (4) и (5):

$$y: m\ddot{y} = (P_{yL} - P_{yR}) + (N_L \sin \delta_R - N_R \sin \delta_R) - (F_{\xi yL} + F_{\xi yR}); \quad (4)$$

$$x: I_z \ddot{\psi} = b(P_{xL} + P_{xR}) + (r - y\gamma)F_{\xi xR} - (r + y\gamma)F_{\xi xL}, \quad (5)$$

где  $P_{yL}$  и  $P_{yR}$  – поперечные силы, передаваемые на левую и правую торцевую часть оси;  $P_{xL}$  и  $P_{xR}$  – продольные силы, передаваемые на левую и правую часть оси;  $N_L$  и  $N_R$  – нормальные силы в левой и правой точках контакта колес с рельсами;  $F_{\xi yL}$  и  $F_{\xi yR}$  – поперечная сила крива в левой и правой точках контакта колес с рельсами;  $F_{\xi xL}$  и  $F_{\xi xR}$  – продольная сила крива в левой и правой точках контакта колес с рельсами;  $b$  – половина расстояния между точками контакта колеса с рельсом;  $(r - y\gamma)$  и  $(r + y\gamma)$  – разница в радиусах катания левого и правого колеса.

Возникновение продольной и поперечной сил крива связано со спецификой движения колесной пары, что подробно расписано в работе [8]. Для прямых участков пути без неровностей, движение колесной пары в рельсовой колее происходит по траектории, которую называют извилистым движением колесной пары (рис. 2). При этом боковое перемещение центра колесной пары и угол виляния изменяются по гармоническому закону [9]. Такая траектория обусловлена в общем конической формой поверхности катания колес, следствием которой является наличие разности радиусов кругов катания при наличии поперечного перемещения колесной пары [8].

Таким образом, с учетом того, что движение колесной пары связано с поперечными и продольными силами и со спецификой обслуживания вагонов на инфраструктуре (не убирают колодки при трогании, при роспуске с горок производят торможение подбросом башмаков и др.), возникают дефекты эксплуатационного и неэксплуатационного характера. Дефекты поверхности катания типа ползун, навар, выщербина, неравномерный прокат, нарушающие осевую симметрию поверхности катания колес, приводят к существенному повышению амплитудных значений ударных динамических нагрузок как на элементы ходовой части вагона, так и на железнодорожный путь [10–12]. Далее показаны взаимосвязи дефектов, неисправностей и повреждений подшипников, колес и тележек (рис. 3). Своевременное обнаружение дефектов поверхности катания, вызывающих сверхнормативные ударные нагрузки в си-

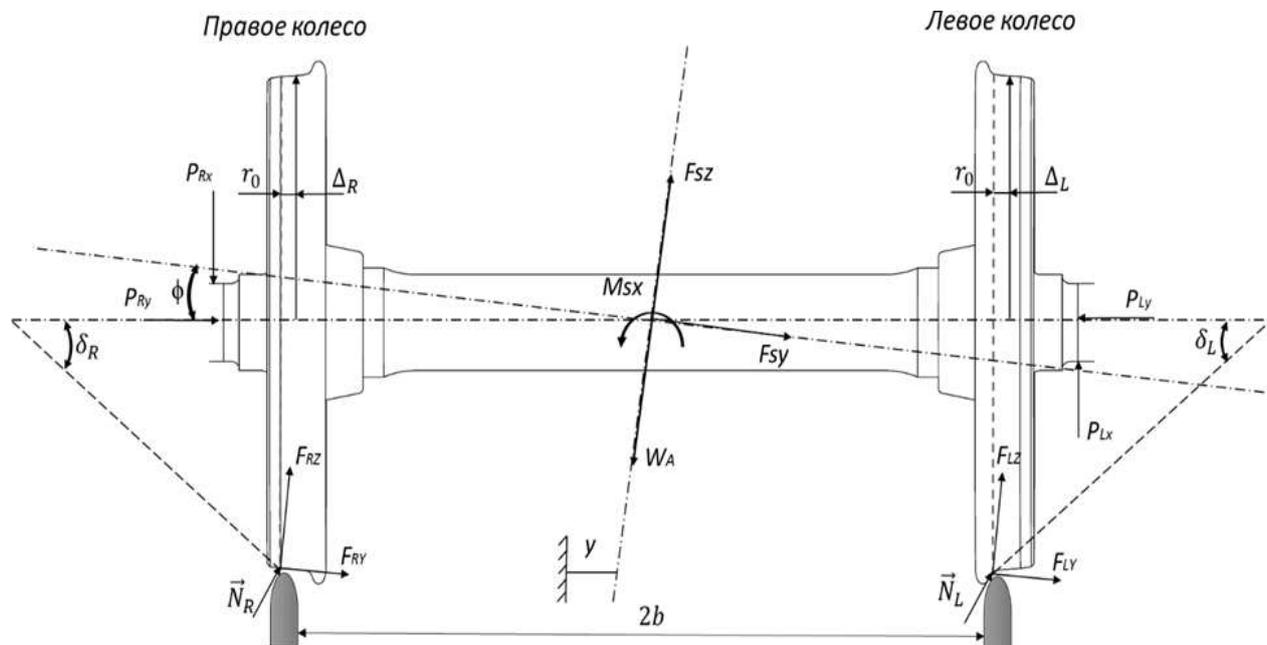


Рис. 1. Схема возможных перемещений колесной пары

Fig. 1. Diagram of possible wheelset displacements

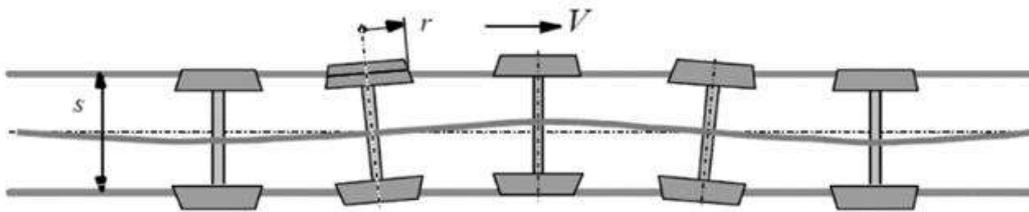


Рис. 2. Траектория движения колесной пары без проскальзывания  
 Fig. 2. Trajectory of movement of the wheelset without sliding

стеме «колесо – рельс», является актуальной задачей [13–15], причем процесс обнаружения опасных дефектов поверхности катания и передачи этой информации соответствующим службам ОАО «РЖД» должен в полной мере отвечать современному уровню развития науки и техники, т. е. должен быть реализован с помощью автоматизированных систем.

**Решение проблемы диагностирования дефектов поверхности катания на колесах**

Решение поставленной задачи по выявлению колес с наличием дефектов на поверхности катания было реализовано ОАО «РЖД» в конце 2018 г., когда на сети началось внедрение ПАУК технического состояния колесных пар [16].

Подсистема предназначена для автоматического выявления, мониторинга, диагностики и формирования базы данных грузовых вагонов (возможно применение и для другого вида железнодорожного подвижного состава), которые имеют на поверхности катания колес колесной пары дефекты в соответствии с [17].

В состав Подсистемы входит напольное оборудование, уличный шкаф и сервер для обработки и отправки данных в пункт технического обслуживания вагонов (далее – ПТО). Напольное оборудование состоит из датчиков прохода колес, датчиков-акселерометров и датчиков акустической эмиссии, благодаря такому набору датчиков Подсистема способна определять, на каком колесе имеется дефект поверхности катания, и классифицировать дефект на соответствие браковочным размерам согласно [17]. В уличном шкафу установлены микроконтроллеры для первичной обработки, сбора информации с напольного оборудования и отправки ее на сервер. На сервере уже происходит окончательная обработка данных по разработанным алгоритмам, определяются дефекты на составе, их классификация по уровню тревог и отправляется обработанная информация на ПТО, где силами вагонного эксплуатационного депо осуществляется контроль состояния колесных пар и по необходимости отцепка в ТОР. Общий вид напольного оборудования и уличного шкафа Подсистемы на перегоне представлены (см. рис. 4).

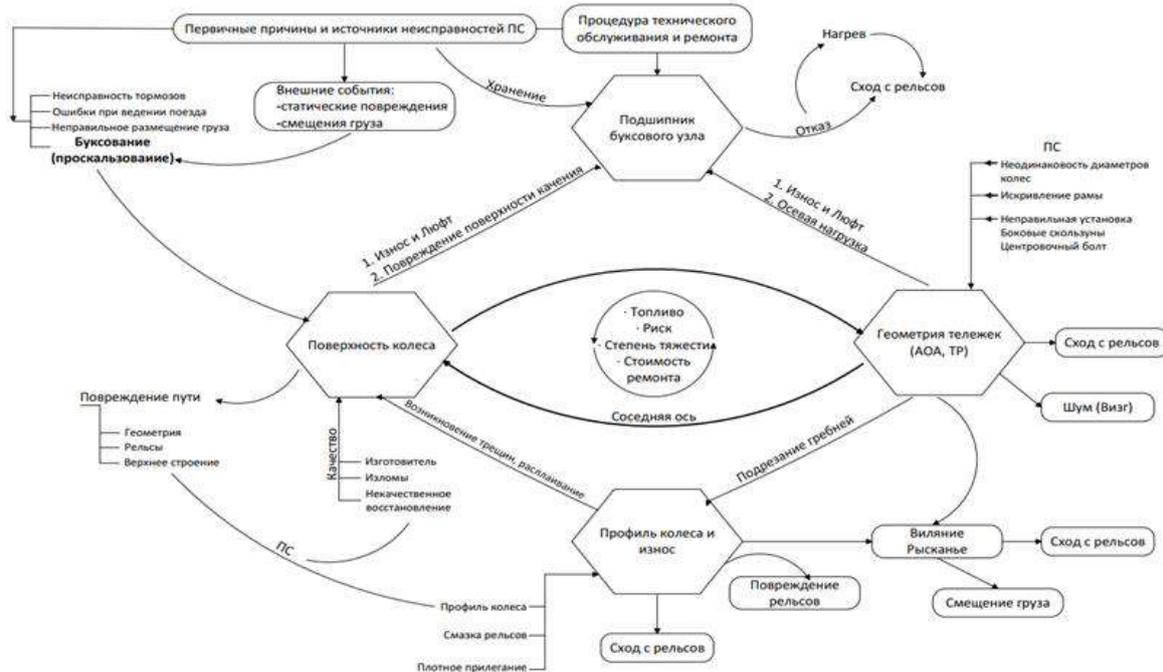


Рис. 3. Система взаимодействия подвижного состава и пути  
 Fig. 3. The system of interaction between rolling stock and tracks



**Рис. 4.** Общий вид подсистемы  
**Fig. 4.** General view of the subsystem

Силами специалистов Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта было организовано научно-техническое сопровождение внедрения системы, в ходе которого осуществлялась настройка и контроль ее показаний на предмет обеспечения заданных параметров надежности и работоспособности. В настоящее время введено в эксплуатацию и успешно эксплуатируется 80 Подсистем, которые позволяют определять наличие дефектов с подтвержденной достоверностью постановки диагноза не менее 99 %.

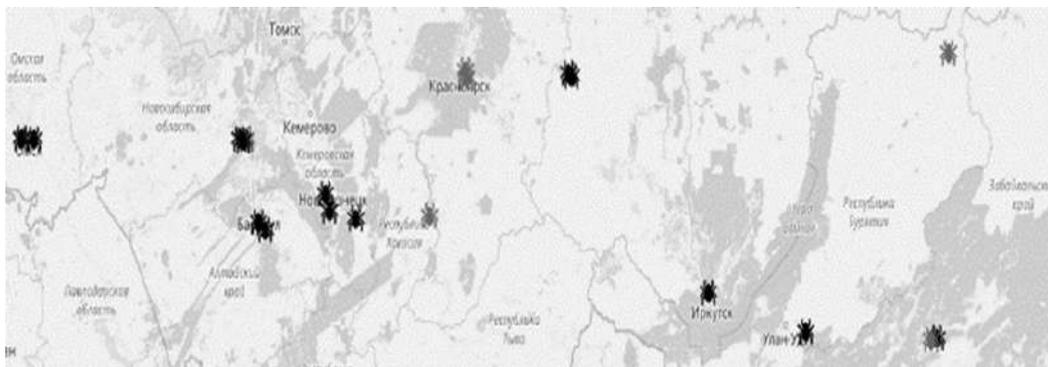
Необходимо отметить важность расположения Подсистем в Сибирском регионе (БАМ, ТрансСиб), где сосредоточены максимальные грузопотоки, внедрено тяжеловесное движение, а эксплуатация подвижного состава происходит в сложных климатических условиях, при наличии кривых малого радиуса в сочетании с затяжными спусками и подъемами.

В настоящий момент на территории Западно-Сибирской железной дороги эксплуатируются в Омском регионе три Подсистемы, Новосибирском – четыре, Барнаульском – две и Кемеровском – три. На Красноярской железной дороге в Красноярском регионе эксплуатируются две Подсистемы, в Абаканском – одна. На Восточно-Сибирской железной дороге в Тайшетском регионе эксплуатируются две Подсистемы, в Северобайкальском, Иркутском и Улан-Удэнском – по одной. На Забайкальской железной дороге две Подсистемы в Карымском районе. Таким образом, в Сибирском регионе находятся в эксплуатации 22 Подсистемы. Благодаря текуще-

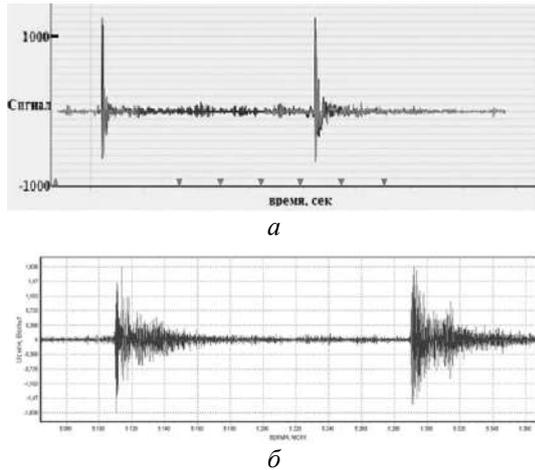
му расположению Подсистем, охватывается весь грузопоток Сибирского региона (рис. 5).

За время эксплуатации подсистем вагонными эксплуатационными депо было обнаружено 976 дефектных колес, которые были направлены в ТОР, что способствовало недопущению вагонов в эксплуатацию и снижению угрозы безопасности движения. Подсистема формирует отчет по каждому пройденному составу, где указаны скорость проследовавшего состава, наличие дефекта и его оценочный критерий (критический или предупредительный) с точностью до стороны колесной пары и ее оси в поезде (например, критический дефект находится с левой стороны 3-й колесной пары вагона № 84312254, порядковый номер вагона в составе 56). В то же время после каждого прохождения грузового состава через измерительный участок и формирования отчета о нем, данные о дефектах отправляются в Систему контроля автоматизированную транспортную (далее – СКАТ), где уже аккумулируются данные со всех систем контроля подвижного состава, таких как Комплекс технических измерений, Комплекс технических средств многофункциональный, пост акустического контроля и т. д. [18, 19]. Подсистема исключает человеческий фактор из процесса обнаружения ДПК колес, что снижает риск пропуска браковочного колеса и выпуска вагона с неисправностями для дальнейшего следования. При визуальном осмотре поверхности катания колесной пары нет возможности осмотреть около 1/3 поверхности из-за наличия тормозной колодки и места соприкосновения колеса с рельсом, но благодаря правильному расположению напольного оборудования на измерительном участке, равном 6,1 м (6 датчиков по левой нити и 6 по правой нити с определенно заданным расстоянием), имеется возможность фиксировать ДПК на двух полных оборотах колесной пары, для исключения пропуска дефекта.

Вид получаемых сигналов с напольного оборудования представлен (рис. 6), где однозначно определяются удары, которые соответствуют одному ползуну на двух оборотах колесной пары.



**Рис. 5.** Расположение подсистем в Сибирском регионе  
**Fig. 5.** Location of subsystems in the Siberian region



**Рис. 6.** Сигнал, полученный от колеса, имеющего ползун глубиной 1,3 мм:

*a* – датчики акселерометров;

*б* – акустико-эмиссионные датчики

**Fig. 6.** The signal received from the wheel having a slide flat with a depth of 1.3 mm:

*a* – accelerometer sensors;

*b* – acoustic emission sensors

### Перспективы

В рамках сбора информации и анализа ее по всей сети железных дорог, Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта создает Комплексный диагностический центр (далее – КДЦ). Вид его интерфейса представлен далее, где на главном экране присутствует карта России с нанесенными на нее координатами всех Подсистем с отображением текущей ситуации по каждой из них (рис. 7).

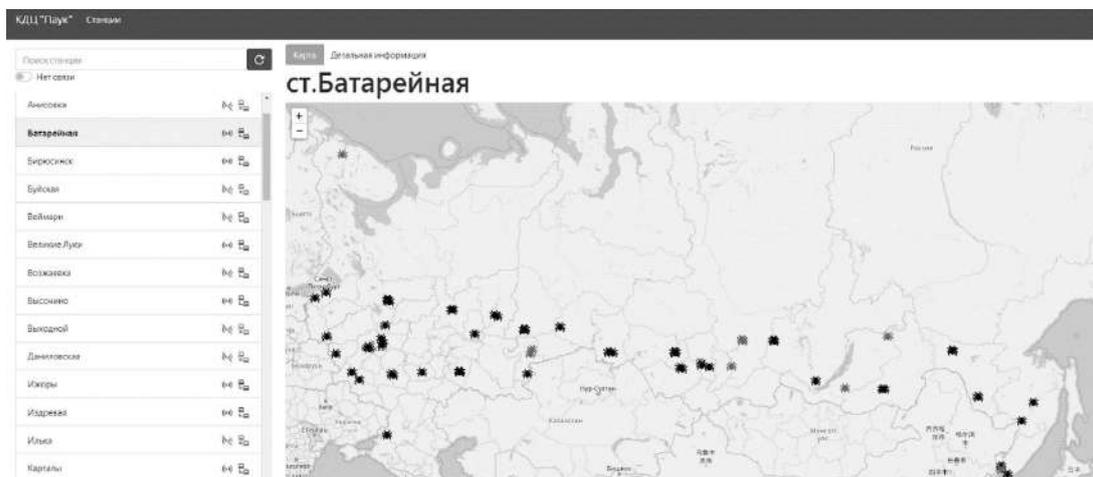
Для развития КДЦ планируется реализовать контроль работоспособности Подсистем в реальном времени с сообщением об изменении их статуса ответственным специалистам. Осуществляется кон-

троль в части связи с линейным сервером, с постоянным мониторингом функционирования акселерометрических и акустических датчиков, контроля версий прошивки датчиков и микроконтроллеров. Хранение данных о состоянии колесных пар прошедших составов, количестве проследовавших осей, вагонов, составов, отсеивание для анализа пассажирских составов, самоходного специального подвижного состава, также локомотивов, следующих в одиночку. Отслеживание вагона и его состояния по всей сети железных дорог, Создание предиктивных моделей о развитии ДПК на вагонах и т. д.

### Выводы

Согласно проекту «Цифровая железная дорога ОАО «РЖД», Управление вагонного хозяйства Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» приняли в эксплуатацию 80 из 80 Подсистем по всей сети железных дорог. Благодаря их работе значительно уменьшились пропуски ДПК и сократилось время обработки и осмотра подвижного состава сотрудниками ВЧДЭ в ПТО. По прибытии поезда на станцию оператор заблаговременно может отследить количество дефектов и их место, а именно, привязку к вагону, оси, стороне. ПАУК полностью интегрирован со СКАТ, который предназначен для приема, обработки и отображения информации в реальном времени от аппаратуры контроля технического состояния подвижного состава в пути следования.

В ближайшее время планируется дооснащение Подсистем тензометрическими датчиками, которые позволят измерять вес проследовавшего вагона, что будет отражаться в КДЦ и поможет более точно определять величину воздействия состава на железнодорожный путь. Перечисленные дополнения и функции Подсистемы, направленные на оптимизирование процесса контроля состояния поверхности катания колесных пар и повышение безопасности



**Рис. 7.** Интерфейс главного экрана Комплексного диагностического центра

**Fig. 7.** Interface of the main screen of the Integrated Diagnostic Center

движения поездов на путях общего пользования ОАО «РЖД».

Это один из шагов на пути к переходу контроля воздействия подвижного состава на железнодорожный путь от геометрических параметров поверхности колесных пар к силовому согласно ГОСТ Р

55050-2012 «Железнодорожный подвижной состав», а также установление норм допустимого воздействия на железнодорожный путь и методов испытаний, что позволит более объективно оценивать отрицательное воздействие подвижного состава на инфраструктуру ОАО «РЖД».

### Список литературы

1. Коссов В.С., Коссов В.С. Контактные задачи железнодорожного транспорта. М. : Машиностроение, 2004. 496 с.
2. Картер Ф. О действии Ведущего колеса локомотива // Труды Лондонского королевского общества. 1926. Т. 112. С. 151.
3. Картер Ф. Об устойчивости движущегося локомотива // Труды Лондонского королевского общества. 1928. Т. 121. С. 585–611.
4. Гарг В.К., Дуккипати Р.В. Динамика подвижного состава. М. : Транспорт, 1988. 391 с.
5. Калкер Д., Браун А. Обзор теории контакта качения колеса с рельсом. В общей проблеме контакта при качении // Труды Американского общества инженеров-механиков. Подразделение прикладной механики. 1980. Т. 40. С. 77–92.
6. Калкер Д. Обзор теории контакта качения колеса с рельсом // Динамика автомобильных систем. 1979. Т. 8. С. 317–379.
7. Калкер Д. Расчет износа колесных рельсов с помощью программы CONTACT // Механика контакта и износ рельсовой колесной системы. Гладуэлл ; Гонем ; Калоусек, 1987. С. 3–26.
8. Орлова А.М., Савушкин Р.А., Федорова В.И. Разработка улучшенного профиля колеса для грузового вагона. Теоретическое обоснование // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77(5). С. 269–279.
9. Ромен Ю.С., Бороненко Ю.П. Гармонизация профилей рельса и колесной пары // Вестник ВНИИЖТ. Т. 75, № 4. С. 201–206.
10. Федорова В.И., Орлова А.М., Определение основных характеристик взаимодействия колеса с рельсом для разработки улучшенного профиля колеса грузового вагона // Транспорт: проблемы, идеи перспективы : сб. тр. LXXVII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб., С. 126–130.
11. Коган А.А. Воздействие на путь поездов, имеющих в своем составе вагоны с ползунами на колесных парах // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 3. С. 3–7.
12. Гарипов Д.С., Кудюров Л.В. Динамика вагонного колеса, имеющего ползун // Вестн. транспорта Поволжья. 2010. № 3 (23). С. 64–70.
13. Сладковский А.В., Погорелов Д.Ю. Исследование динамического взаимодействия в контакте колесо – рельс при наличии ползун на колесной паре // Вісник Східноукраїнського національного університету. 2008. № 5. С. 88–95.
14. Ададунов А.С., Тюпин С.В., Лапин А.М. Техническая диагностика колесных пар: современные методы и средства выявления дефектов // Техника железных дорог. 2013. № 4. С. 32–35.
15. Матяш Ю.И., Сосновский Ю.М. и др. Повысить достоверность диагностирования технического состояния грузовых вагонов // Вагоны и вагонное хозяйство. 2017. № 3 (51). С. 45–46.
16. Пост комплексного контроля как инновационный подход к диагностике ходовой части вагона / А.С. Ададунов, Р.Ю. Бушуев и др. // Вагоны и вагонное хозяйство. 2015. № 4. С. 24–27.
17. РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм. Введ. 2018–01–01.
18. Ададунов А. Автоматизированная система контроля за работой специального подвижного состава // Бюл. объедин. учен. совета ОАО «РЖД». 2016. № 6. С. 29–35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28351488> (дата обращения 04.12.2020).
19. Вережкина О., Шапашал А., Кравец А. Технические средства обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте. Ростов н/Д : Изд-во РГУПС, 2009. С. 15–33.
20. ГОСТ Р 55050-2012 Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Введ. 2013–07–01. М. : Стандартинформ, 2013. 25 с.

### References

1. Kossov V., Sakalo V. Kontaktnye zadachi zheleznodorozhnogo transporta [Railway transport contact problems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2004. 496 p.
2. Carter F.W. On the action of locomotive driving wheel. *Proc. of Royal Society of London*, 1926. Vol. 112. 151 p.
3. Carter F.W. On the stability of running locomotive. *Proc. of the Royal Society of London*, 1928. Vol. 121. Pp. 585–611.
4. Garg V., Dukkipaty R. Dynamics of railway vehicle systems. Academic Press Canada, 1984. (Russ. ed.: Garg V., Dukkipaty R. *Dinamika podvizhnogo sostava*. In Pan'kin N (ed.), Moscow: Transport Publ., 1998. 391 p.
5. Kalker J.J. Survey of wheel-rail rolling contact theories. In the general problem of rolling contact. In Browne A.L. and Tsai N.T. (eds.) *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Division*, 1980. Vol. 40. Pp. 77–92.
6. Kalker J.J. Survey of wheel-rail rolling contact theory. *Vehicle system dynamics*, 1979. Vol. 8. Pp. 317–379.
7. Kalker J.J. Wheel-rail wear calculation with the program CONTACT. *Contact mechanics and wear of rail/wheel system II*. Gladwell, Ghonem and Kalousek, 1987. Pp. 3–26.
8. Orlova A., Savushkina R., Fedorova V. Razrabotka uluchshennogo profilya koleasa dlya gruzovogo vagona. Teoreticheskoe obosnovanie [Development of an improved wheel profile for a freight car. Theoretical substantiation]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [VNIIZHT Scientific Journal]*, 2018.
9. Romen Yu. S., Boronenko Yu. P. Garmonizatsiya profilei rel'sa i kolesnoi pary [Harmonization of rail and wheelset profile]. *Vestnik VNIIZHT [VNIIZHT Scientific Journal]*, No. 75(4) Pp. 201–206.

10. Fedorova V., Orlova A. Opredelenie osnovnykh kharakteristik vzaimodeistviya koleasa s rel'som dlya razrabotki uluchshenogo profilya koleasa gruzovogo vagona [Determination of the main characteristics of the interaction of the wheel with the rail for the development of an improved profile of the railcar wheel]. *Tezisy «Nedeli nauki-2017 «Transport: problemy, idei perspektivy». Sbornik trudov LXXVII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh 17–24 aprelya 2017 g. [Abstracts of the Science Week - 2017 "Transport: Problems, Ideas of Prospects" Collection of Papers LXXVII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists April 17–24]*, 2017. Pp. 126–130.
11. Kogan A. Vozdeistvie na put' poezdov, imeyushchikh v svoem sostave vagony s polzunami na kolesnykh parakh [Impact of trains containing railcars with slid flats on wheelsets on the track]. *Vestnik VNIIZhT [VNIIZHT Scientific Journal]*, 2014. No. 3. Pp. 3–7.
12. Garipov D., Kudyurov L. Dinamika vagonnogo koleasa, imeyushchego polzun [Dynamics of a railcar wheel with a slid flat]. *Vestnik transporta Povolzhya*, 2010. No. 3 (23). Pp. 64–70.
13. Sladovskii A., Pogorelov D. Issledovanie dinamicheskogo vzaimodeistviya v kontakte koleso – rel's pri nalichii polzunov na kolesnoi pare [Investigation of dynamic interaction in wheel-rail contact in the presence of slid flats on the wheelset]. *Visnik Skhidnoukrains'kogo natsional'nogo universitetu [Bulletin of the East Ukrainian National University]*, 2008. No. 5. Pp. 88–95.
14. Adadurov A., Tyupin S., Lapin A. Tekhnicheskaya diagnostika kolesnykh par: sovremennyye metody i sredstva vyavleniya defektov [Technical diagnostics of wheelsets: modern methods and means of detecting defects]. *Tekhnika zheleznykh dorog [Railway Equipment Magazine]*, No. 4. PK Politizdat OOO Publ, 2013. Pp. 32–35.
15. Matiash Y., Sosnovskii Y. Povysit' dostovernost' diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya gruzovykh vagonov [On the increase of the reliability of diagnosing the technical condition of freight cars]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo [Railcars and rolling stock facilities]*, 2017. No. 3 (51). Pp. 45–46.
16. Adadurov A., Bushuev R. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya za rabotoi spetsial'nogo podvizhnogo sostava [Integrated control post as an innovative approach to diagnostics of the railcar truck]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo [Railcars and rolling stock facilities]*, 2015. No. 4. Pp. 24–27.
17. Rukovodyashchii dokument po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kolesnykh par s bukovymi uzlamy gruzovykh vagonov magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 (1524) mm. Data vvedeniya 2018-01-01. [GD SRIRT 27.05.01-2017. Guidance document for the repair and maintenance of wheelsets with axleboxes for freight cars of 1520 (1524) mm track gauge trunk road. Date of introduction is January 01, 2018].
18. Adadurov A. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya za rabotoi spetsial'nogo podvizhnogo sostava [Automated control system for special rolling stock operation]. *Byulleten' ob "edinennogo uchenogo soveta OAO «RZhD» [Bulletin of the Joint Scientific Council of "Russian Railways" OAO]*, 2016. No. 6. Pp. 29–35 [Electronic media]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28351488>.
19. Verevkina O., Shapshal A., Kravets A. Tekhnicheskie sredstva obespecheniya bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte [Technical means of ensuring safety on railway transport]. Rostov State Transport University Publ., 2009. Pp. 15–33.
20. GOST R 55050-2012 Zheleznodorozhnyi podvizhnoi sostav. Normy dopustimogo vozdeistviya na zheleznodorozhnyi put' i metody ispytaniy. [GOST R 55050-2012 National Standard of Russian Federation "Railway Rolling Stock. Norms of track interaction and testing methods"].

### Информация об авторах

**Ададуров Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I; советник генерального директора Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, e-mail: Adadurov.Aleksandr@vniizht.ru

**Федорова Вероника Игоревна** – канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I; начальник отдела комплексных инновационных проектов Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, mail: Fedorova.Veronika@vniizht.ru

**Суслов Олег Александрович** – д-р техн. наук, профессор, Российский университет транспорта; технический эксперт отдела комплексных инновационных проектов Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, e-mail suslov.oleg@vniizht.ru

**Нерезков Алексей Викторович** – заместитель директора филиала по развитию Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, e-mail: Nerezkov.Alexey@vniizht.ru

**Лесников Андрей Викторович** – главный специалист отдела комплексных инновационных проектов Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, e-mail: Lesnikov.Andrej@vniizht.ru

### Information about the authors

**Aleksandr S. Adadurov** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; Adviser to the Director General, All-Russian Railway Research Institute, e-mail: Adadurov.Aleksandr@vniizht.ru

**Veronika I. Fyodorova** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; Head of the Integrated Innovation Projects of All-Russian Railway Research Institute, e-mail: Fedorova.Veronika@vniizht.ru

**Oleg A. Suslov** – Doctor of Engineering Science, Professor of the Russian University of Transport; Technical Expert of the Department of Integrated Innovation Projects of All-Russian Railway Research Institute, e-mail suslov.oleg@vniizht.ru

**Aleksei V. Nerezkov** – Deputy development branch director of All-Russian Railway Research Institute, e-mail: Nerezkov.Alexey@vniizht.ru

**Andrei V. Lesnikov** – Specialist of the Integrated Innovation Projects Department of All-Russian Railway Research Institute, e-mail: Lesnikov.Andrej@vniizht.ru