

УДК 629.488.2:629.4.053.2

Система комплексной диагностики элементов высокоскоростного подвижного состава и инфраструктуры: анализ и внедрение

А. С. Катасонов, Н. В. Лысов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Катасонов А. С., Лысов Н. В. Система комплексной диагностики элементов высокоскоростного подвижного состава и инфраструктуры: анализ и внедрение // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 2. С. 114–128. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-114-128

Аннотация

Цель: рассмотреть вопрос комплексного диагностирования механической части высокоскоростного подвижного состава и путевой инфраструктуры, провести анализ влияния эксплуатационных факторов на техническое состояние узлов подвижного состава, определить основные проблемы и предложить возможные пути решения, рассмотреть перспективы развития отечественных разработок в области комплексного диагностирования подвижного состава и инфраструктуры. **Методы:** анализ конструктивных особенностей и влияния на безопасность движения, критерии и параметры ходовой устойчивости и комфорта пассажиров механической части высокоскоростного электропоезда «Сапсан», описание предпосылок и этапов создания, тестирования и эксплуатации системы непрерывного мониторинга параметров динамической системы «экипаж — путь» электропоездов «Сапсан», анализ влияния основных эксплуатационных факторов на техническое состояние механической части подвижного состава. **Результаты:** определена ключевая роль механической части электропоезда «Сапсан» в обеспечении безопасности движения и комфорта пассажиров. Выявлена необходимость создания и внедрения системы для непрерывного мониторинга динамических реакций в системе «механическая часть поезда — путевая инфраструктура». Рассмотрены результаты опытной эксплуатации прототипа системы в составе электропоездов «Сапсан» на примере исследований участков пути с повышенным воздействием на подвижной состав и проблем поперечной устойчивости электропоезда. Выявлено, что вертикальные ускорения буксовых узлов со значительными амплитудами позволяют выявить вертикальные неровности пути длиной до 3 м, а постоянная регистрация повышенных поперечных ускорений рамы тележки показывает необходимость решения вопросов, связанных с геометрией контакта колесо — рельс при извилистом движении подвижного состава в части параметров конусности. Определено текущее состояние и перспективы разработки отечественных систем комплексной диагностики. **Практическая значимость:** рассмотренная система диагностики позволяет осуществлять комплексный анализ проблем технического состояния механической части и инфраструктуры, определять взаимную зависимость и уровень влияния эксплуатационных факторов, что является путем к повышению надежности и отказоустойчивости узлов подвижного состава, безопасности движения и комфорта пассажиров. Ее интеграция в состав цифровой платформы позволит повысить эффективность организации технического обслуживания и управления ресурсами предприятий.

Ключевые слова: комплексная диагностика, высокоскоростной подвижной состав, путевая инфраструктура, измерительные датчики, динамическая система, мониторинг.

Вопрос определения технического состояния механической части высокоскоростного подвижного состава, а также анализа влияния эксплуатационных факторов на изменение этого состояния продолжает оставаться актуальным.

Это обусловлено тем, что механическая часть современного подвижного состава состоит из множества сложных технических узлов, которые постоянно взаимодействуют между собой и с элементами инфраструктуры, играя ключевую роль в обеспечении безопасности движения, надежности эксплуатации и комфорта пассажиров. В настоящее время особое внимание уделяется разработке и внедрению средств комплексного технического диагностирования подвижного состава и инфраструктуры. Эти средства позволяют в режиме реального времени проводить мониторинг и прогнозирование состояния элементов ходовой части, анализировать состояние и воздействие элементов путевой инфраструктуры на механическую часть, а также формировать текущую оценку параметров безопасности и комфорта.

Конструкция ходовой части высокоскоростных электропоездов серии ЭВС «Сапсан», эксплуатирующихся в России с 2009 года, разработана исходя из сложных условий взаимодействия с путевой инфраструктурой, обусловленных возникающими высокими динамическими нагрузками, необходимости эффективной передачи тяговых и тормозных усилий, а также предотвращения или минимизации последствий внезапно возникающих опасных воздействий или неисправностей. Помимо этого, применяемые в конструкции решения обеспечивают высокий уровень плавности хода в широком диапазоне возможных условий работы, а также максимальную степень унификации и возможность замены компонентов без необходимости проведения сложных операций и больших временных затрат. На рис. 1 приведена кинематическая схема тележки электропоезда «Сапсан», общая для моторных и немоторных тележек [1].

На рис. 1 цифрами обозначены: 1 — уровень головки рельса (УГР); 2 — колесная пара; 3 — рама тележки; 4 — буксовый узел; 5 — разрезной буксовый балансира 1-й ступени рессорного подвешивания; 6 — сайлент-блок буксового балансира 1-й ступени рессорного подвешивания; 7 — цилиндрическая пружина 1-й ступени рессорного подвешивания; 8 — гидравлический гаситель вертикальных колебаний 1-й ступени рессорного подвешивания; 9 — уровень кузова (продольная балка); 10 — опорная плита-траверса; 11 — пневматическая рессора 2-й ступени рессорного подвешивания (изображена на рисунке в форме пружины); 12 — гидравлический гаситель колебаний виляния тележки; 13 — болтовое соединение между рамой тележки и кузовом; 14 — гидравлический гаситель вертикальных колебаний кузова 2-й ступени рессорного подвешивания; 15 — торсион поперечной устойчивости кузова; 16 — регулируемая тяга торсиона поперечной устойчивости кузова; 17 — шарнирное крепление гасителя колебаний виляния к траверсе; 18 — тяга механизма передачи продольных усилий; 19 — упорный ограничительный резиновый буфер; 20 — механизм шкворня траверсы, установленный в центральном рычаге механизма передачи продольных усилий; 21 — гидравлический гаситель колебаний кузова в поперечном направлении.

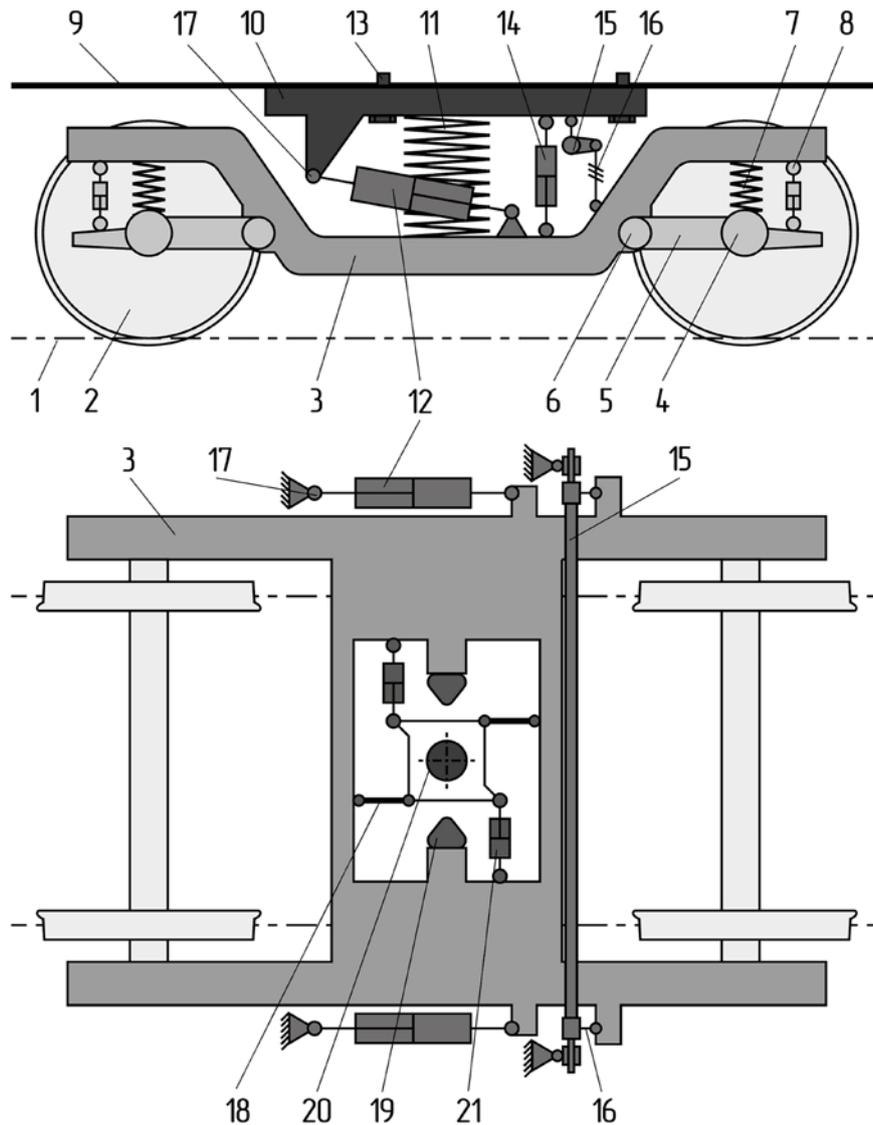


Рис. 1. Кинематическая схема основных узлов тележки электропоезда «Сапсан»
(Источник: авторская работа)

Возникновение и развитие дефектов в элементах ходовой части представляет собой критический фактор для безопасности движения и комфорта пассажиров. Например, неисправности пневматической рессорной подвески существенно снижают плавность хода, выход из строя гидравлических амортизаторов и торсионного механизма увеличивают риск потери устойчивости тележки, а дефекты подшипниковых узлов могут привести к сходу подвижного состава с рельсов. Поэтому необходимо создание системы, которая обеспечивает непрерывный мониторинг основных параметров, таких как температура подшипников и частота вращения колесных пар, а также регистрацию факторов, влияющих на снижение ресурса элементов и ухудшение эксплуатационных характеристик.

Динамические реакции в системе «механическая часть поезда — путевая инфраструктура» являются важными индикаторами, отражающими текущее состояние пути и его влияние на элементы ходовой части, а также на параметры комфорта и безопасности движения. Создание системы для непрерывной регистрации этих показателей имеет большое значение и позволяет осуществлять комплексную диагностику как путевой инфраструктуры, так и механической части поезда. Для электропоездов «Сапсан» на основании собранных с 2015 года данных диагностического комплекса непрерывного контроля параметров динамической системы «экипаж — путь» (КПДС) предложено разработать отечественный аналог этой системы, включающий как мониторинг элементов механической части, так и инфраструктуры. Эта система включает в себя измерительные датчики, установленные на тележках для регистрации ускорений в различных направлениях как в неподрессоренных, так и в поддрессоренных частях тележки, а также бортовой вычислительный комплекс для сбора, анализа и передачи данных.

Первым подходом к созданию данной системы была разработка компанией-изготовителем электропоездов «Сапсан» опытного диагностического комплекса и его установка на отдельные вагоны двух электропоездов. На протяжении опытной эксплуатации комплекса осуществлялся сбор и анализ регистрируемой информации, что позволило провести ряд исследований, цель которых заключалась в идентификации характера отклонений в текущем содержании выявляемых комплексом участков пути, которые вызывают повышенные динамические реакции и нагружение элементов ходовой части.

В рамках проведенных с 2015 года исследований был проведен анализ ускорений, возникающих на разных элементах механической части ЭВС «Сапсан» — рис. 2:

- ускорения на буксовых подшипниках справа и слева (az_1 , az_2), отфильтрованные в частотном диапазоне 0–80 Гц;
- ускорения на раме (a_{up}), отфильтрованные в частотном диапазоне 0–10 Гц;
- ускорения на кузове вагона (a_{us} , azs), отфильтрованные в частотном диапазоне 0–5 Гц.

Все графики построены для максимальных значений (max) и стандартных отклонений (std) в день.

Анализ представленных графиков выявил следующие закономерности:

- сезонные зависимости: на буксовых подшипниках и кузове вагона самые высокие значения зимой, на раме — летом;
- в целом примерно одинаковый уровень в течение всего года;
- значительные увеличения стандартного отклонения на буксовом подшипнике на отдельных участках.

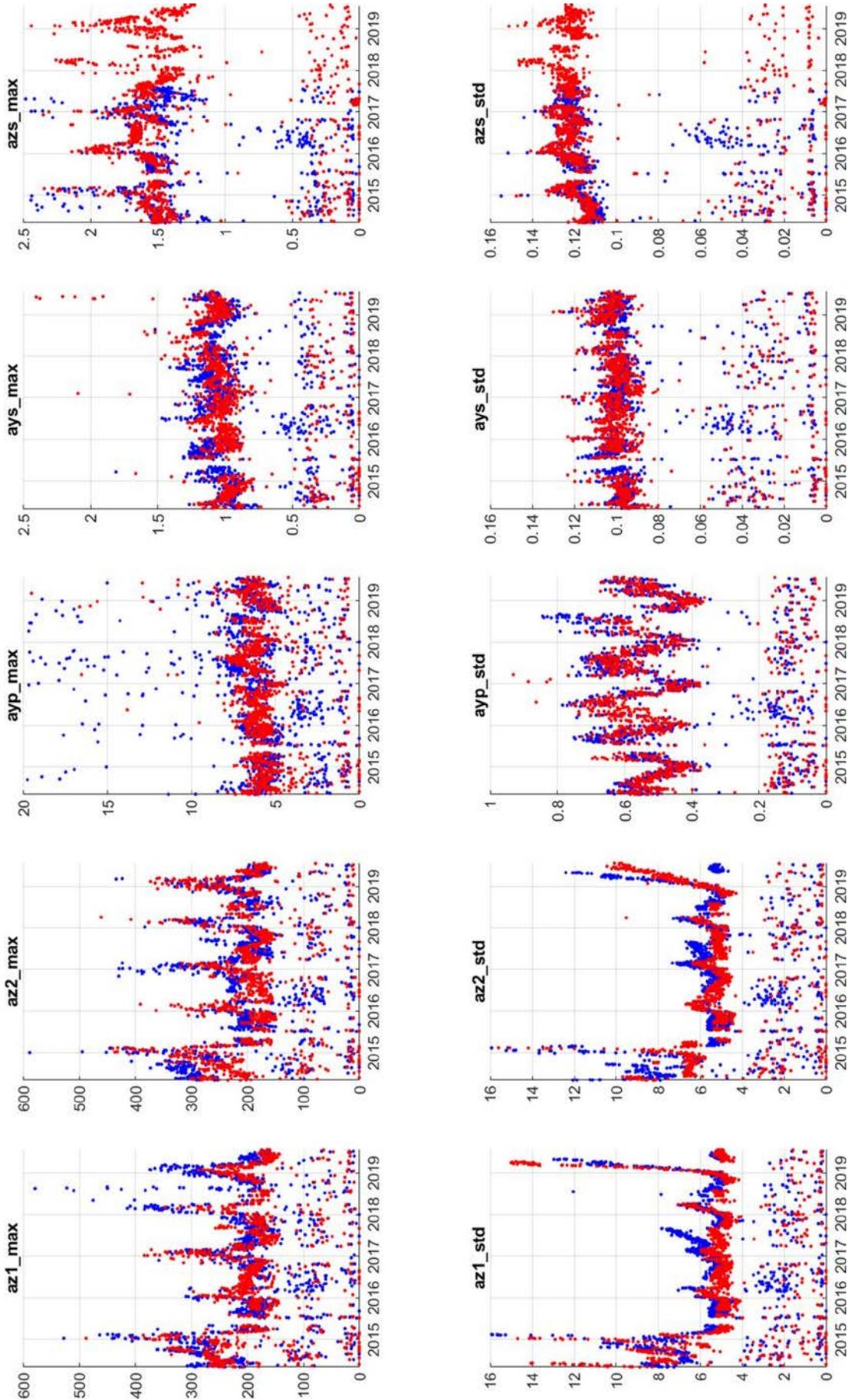


Рис. 2 (Источник: авторская работа)

На рис. 3 представлен пример зарегистрированных вертикальных ускорений буксы, а также кривые, характеризующие неровности пути в различных диапазонах длин. Кривая 2 на рис. 3 получена при промере участка пути путеизмерительным комплексом и соответствует диапазону неровностей пути длиной 3–25 м. Кривая 3 на том же рисунке получена путем двойного интегрирования сигнала вертикального ускорения датчика буксового узла системы КПДС и соответствует диапазону неровностей пути длиной 0–25 м. Кривая 4 отражает разность измерений неровностей этими двумя методами.

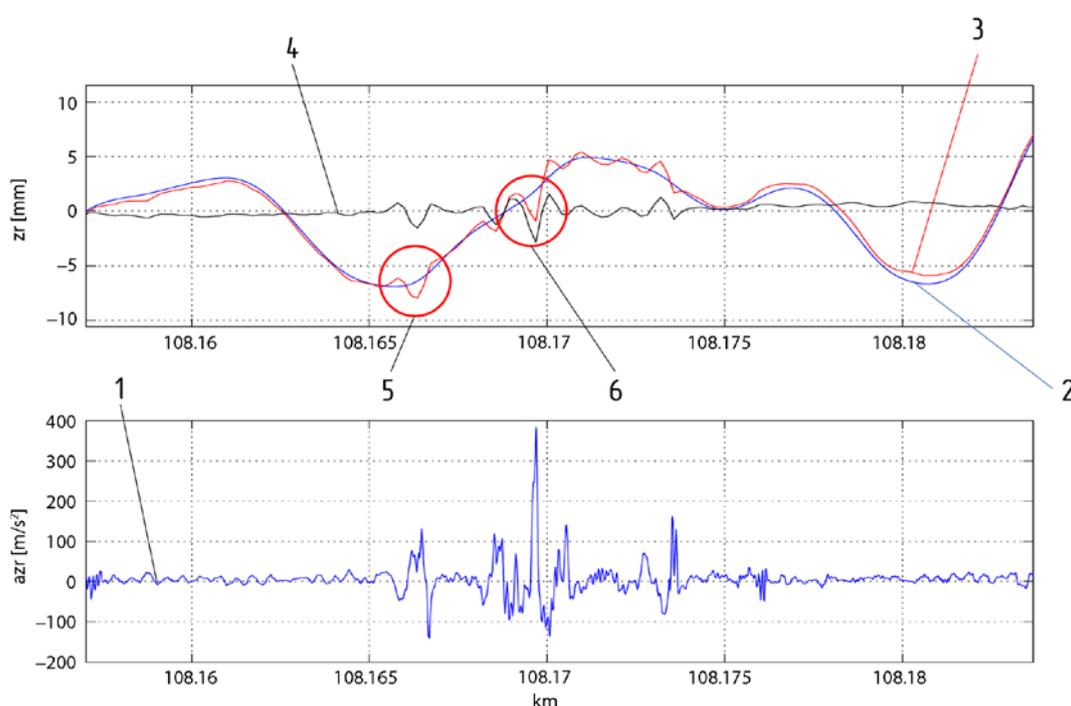


Рис. 3. Пример выявленных неровностей пути и зарегистрированных системой КПДС вертикальных ускорений буксового узла (Источник: [2])

Проведенный анализ показывает, что неровности пути в диапазоне длин до 1 м (5, 6 на рис. 3), не обнаруживаемые штатными путеизмерительными средствами, вызывают значительные вертикальные ускорения букс с амплитудами до 400 м/с^2 и, как следствие, высокие динамические реакции, которые оказывают влияние на техническое состояние и ходовые качества тележки.

Другим направлением исследования стал поиск и выявление причин частого срабатывания защитной функции контроля устойчивости хода (КУХ) при эксплуатации электропоездов «Сапсан» [3]. Эта функция входит в систему контроля параметров тележки электропоезда «Сапсан» и регистрирует горизонтальные поперечные ускорения рамы тележки, при превышении определенной величины и количества которых для недопущения потери ходовой устойчивости происходит ограничение максимальной скорости движения [4, 5].

Регистрация ускорений производится пьезоэлектрическими датчиками типа DGD-S производства компании Knorr-Bremse, смонтированными на всех тележках электропоезда. Таким образом, электропоезд «Сапсан» соответствует требованию об обязательном оснащении датчиками поперечных ускорений высокоскоростного подвижного состава, скорость которого в эксплуатации превышает 160 км/ч. Главной функцией датчиков является реагирование на изменяющиеся характеристики гидравлических гасителей колебаний виляния, таким образом осуществляется контроль их исправности. Система управления поездом реализует многоступенчатый алгоритм реакции — информирование машиниста путем вывода на дисплей интерфейса «человек — машина» соответствующего сообщения, а также трехступенчатое ограничение максимальной скорости — 220, 190 и 160 км/ч. Выполнение алгоритма происходит после того, как системой контроля фиксируются неоднократные превышения величин поперечных ускорений относительно заданных пределов. Независимо от типа реакции центральный блок управления формирует сообщение с соответствующей диагностической информацией, сохраняет его в энергонезависимой памяти, а также посредством беспроводной связи отправляет данную информацию на сервер компании, проводящей техническое обслуживание поездов. Предусмотрена постепенная отмена введенных ограничений в автоматическом режиме, если на протяжении последующих 30 км следования электропоезда не было выявлено повторных срабатываний с превышением установленных значений. Проблема поперечной устойчивости высокоскоростных поездов «Сапсан», впервые определенная после начала эксплуатации зимой 2009 года, остается актуальной по сей день. Крайне нежелательным фактором является и то, что многократные срабатывания алгоритма защиты и, как следствие, ограничения допустимых скоростей приводят к опозданиям.

Анализ срабатываний системы КУХ показал, что в большинстве случаев срабатывания происходят на одних и тех же участках пути. На рис. 4 сведены срабатывания системы КУХ на электропоездах «Сапсан» за одну календарную неделю (май 2024 года). Срабатывания по первому пути маркируются синим маркером, по второму пути — красным. Для каждого случая регистрируется время прихода диагностического сообщения, номер вагона и тележки, где зафиксировано превышение поперечных ускорений установленных предельных значений, ж/д координата, GPS-координаты и другие параметры (рис. 4).

В ходе исследования проводился анализ зависимости зарегистрированных поперечных ускорений на раме тележки от различных параметров рельсовой колеи и геометрии контакта «колесо — рельс». В результате было установлено, что наибольшее влияние на величину поперечных ускорений оказывает параметр эквивалентной конусности, являющийся геометрической характеристикой взаимодействия колеса конического профиля с профилем рельса при извилистом движении подвижного состава [6]. На рис. 5 приведен пример зарегистрированных поперечных ускорений рамы тележки на участке пути, где было зафиксировано срабатывание КУХ, а также расчетный параметр эквивалентной конусности.

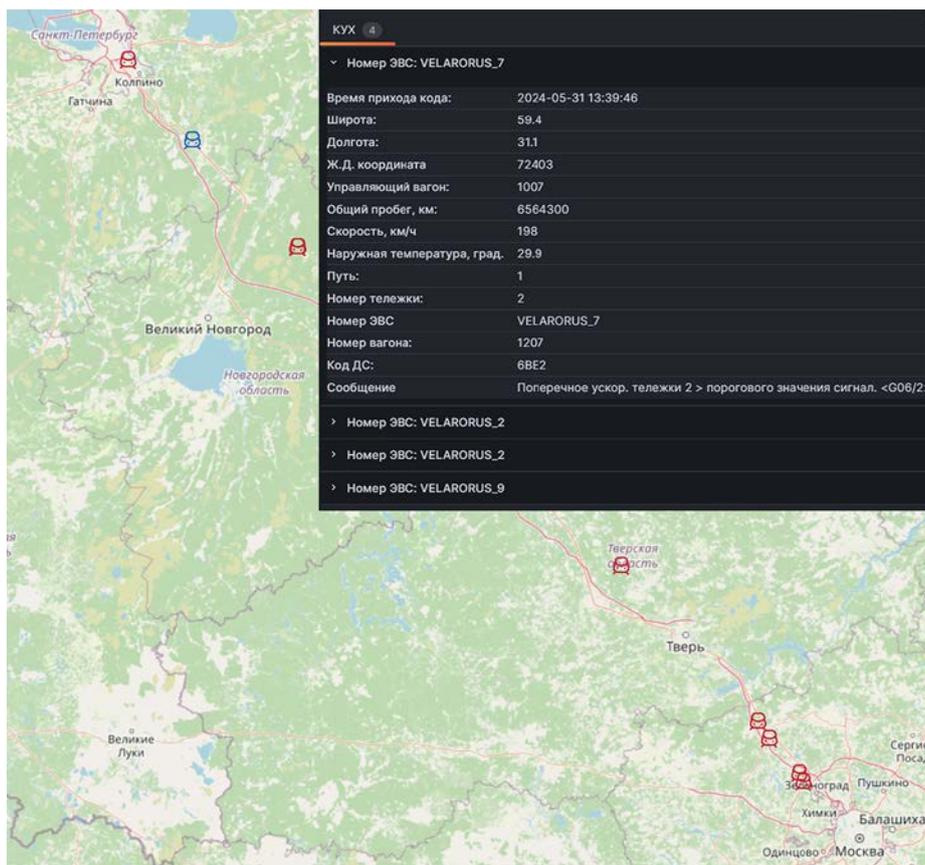


Рис. 4. Срабатывания системы КУХ на электропоездах «Сапсан» (Источник: авторская работа)

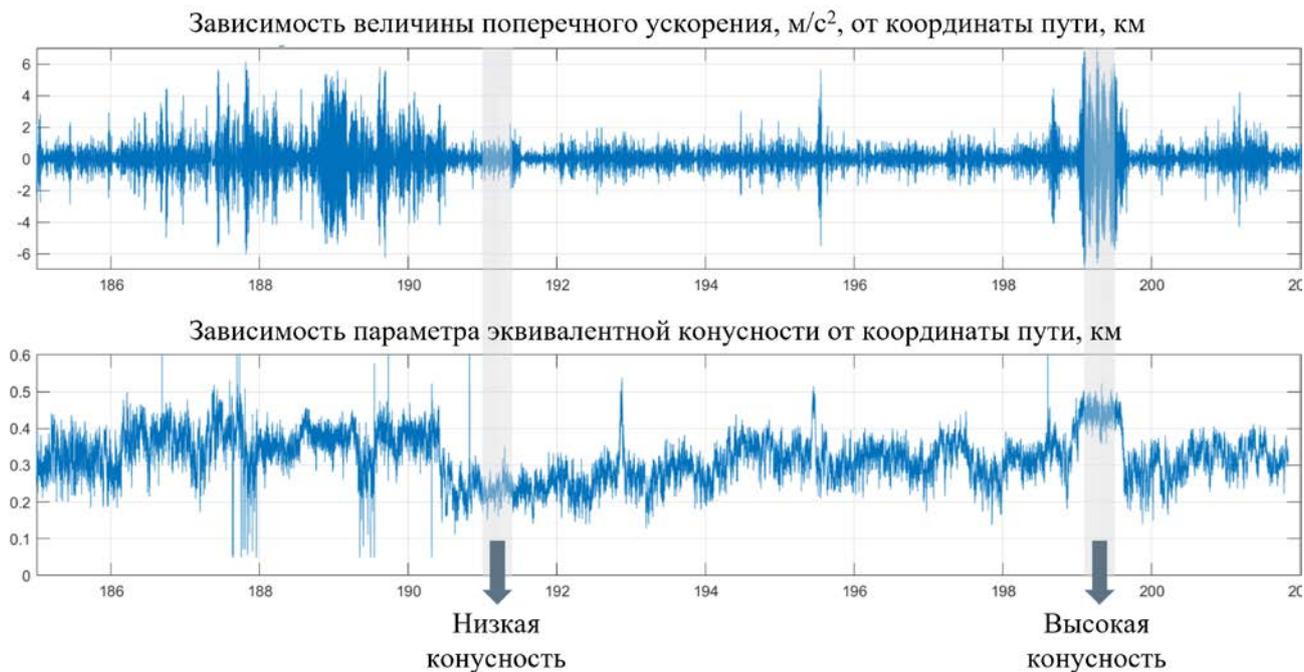


Рис. 5. Зависимость величины зарегистрированных поперечных ускорений рамы тележки от расчетного параметра эквивалентной конусности (Источник: [6])

Движение вагонов по прямым участкам пути на самом деле не является прямолинейным. Это обусловлено тем, что, помимо движения вдоль оси пути, происходит боковой отход, то есть перемещения в поперечном направлении, а в ряде случаев возникают явления боковой качки и виляний; последние представляют собой вращательные движения вокруг вертикальной оси. Во время такого сложного движения, называемого извилистым, имеет место возникновение значительных инерционных сил и, как следствие, бокового влияния на рельсы. Конический профиль бандажей колесных пар является причиной того, что круги катания, которыми опираются два колеса одной колесной пары, имеют разные радиусы, что показано на рис. 6.

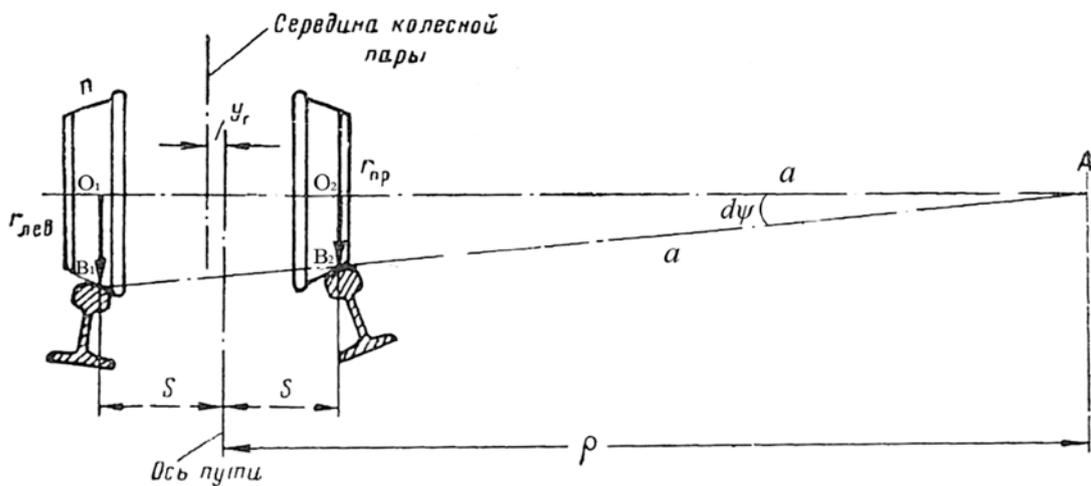


Рис. 6. Расположение колес с разными кругами катания (Источник: [6])

Вследствие этого линия, проведенная через точки контакта колес с головками рельсов, оказывается непараллельной оси колесной пары, то есть пересекается с ней в точке А. Данная точка является мгновенным центром вращения колесной пары в горизонтальной плоскости и расположена на определенном удалении от оси пути.

Рассматривая два треугольника AO_1V_1 и AO_2V_2 из рис. 6, можно определить радиусы левого и правого колес:

$$r_{\text{лев}} = (a + 2s) \operatorname{tg} d\psi; \quad r_{\text{прав}} = a \operatorname{tg} d\psi; \quad r_{\text{лев}} - r_{\text{прав}} = \Delta r = 2s \operatorname{tg} d\psi.$$

По рис. 6 дополнительно можно определить:

$$\operatorname{tg} d\psi = \frac{r_{\text{ср}}}{\rho}; \quad r_{\text{ср}} = \frac{r_{\text{лев}} + r_{\text{прав}}}{2},$$

где ρ — радиус кривизны траектории геометрического центра колесной пары.

Таким образом,

$$\frac{\Delta r}{2s} = \frac{r_{\text{cp}}}{\rho};$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\Delta r}{2sr_{\text{cp}}}. \quad (1)$$

Так как величина, на которую смещается середина колесной пары относительно оси пути, есть функция зависимости от величины Δr , а также имеет место обратная зависимость $\Delta r = f(y)$, то

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{f(y)}{2sr_{\text{cp}}} = 0. \quad (2)$$

Для стандартных колес принимают величину коничности (характеристика конической формы бандажей колес) n , равной $n = 0,05$, следовательно

$$\Delta r = f(y) = 2ny$$

и выражение (2) можно представить как:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{n}{sr_{\text{cp}}} = 0. \quad (3)$$

Данное уравнение является линейным дифференциальным с постоянными коэффициентами, поэтому его решение имеет вид:

$$y = A \sin \omega x + B \cos \omega x,$$

где $\omega = \sqrt{\frac{n}{sr_{\text{cp}}}}$.

Предполагая при $x = 0$, что $y = y_0$ и $\frac{dy}{dx} = 0$, получаем:

$$B = y_0; A = 0; y = y_0 \cos \omega x,$$

где y_0 — наибольшее отклонение центра колесной пары от оси пути.

Таким образом, колесная пара с коническими ободами колес при качении по предельно прямому участку пути совершает движение по синусоидальной траектории. Ее длина волны получается из соотношения:

$$\omega = \frac{2\pi}{L}, \text{ откуда } L = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{sr_{\text{cp}}}{n}}.$$

Как было сказано ранее, в процессе извилистого движения колесной пары в ней возникают силы инерции, которые создают дополнительные поперечные воздействия на головки рельсов.

При рассмотрении поперечной составляющей инерционной силы при извилистом движении она оказывается равной центробежной силе:

$$H_{ц} = \frac{mV^2}{\rho}.$$

С учетом (2) (3) $\rho = \frac{2sr_{cp}}{\Delta r} = \frac{r_{cp}}{ny}$, поэтому уменьшение коничности колес является предпочтительным в рамках снижения инерционных сил. Рекомендации для скоростного подвижного состава определяют значения коничности колес $n = 0,025$ или $0,01$. Однако уменьшение данной величины относительно стандартной сопряжено с повышением чувствительности колесных пар к неравенству диаметров колес, поэтому необходимым условием также является уменьшение допусков на неравенство диаметров колес [7].

В настоящее время с учетом накопленного опыта ведется активная разработка отечественного аналога диагностического комплекса КЖДС. В состав системы должны войти измерительно-вычислительные комплексы, осуществляющие диагностику и мониторинг по следующим основным направлениям:

- мониторинг параметров безопасности и комфорта;
- диагностика технического состояния ходовой части;
- диагностика состояния пути.

На данный момент прототип такого комплекса установлен на следующие электропоезда «Сапсан»: ЭВС2–01 (вагон SR10), ЭВС1–12 (вагоны SR01 и SR10), ЭВС1–19 (вагон SR10). В состав комплекса входят датчики ускорений, расположенные на тележке и внутри салона вагона, датчики выходных токов тягового преобразователя, главный вычислительный блок и антенна для удаленной передачи диагностической информации. Схема расположения компонентов приведена на рис. 7.

На рис. 7 цифрами обозначены: 1 — оборудование тележки; 2 — распределительный модуль; 3 — главный вычислительный блок; 4 — роутер и антенна беспроводной передачи данных; 5 — датчики поперечных и вертикальных ускорений буксового узла; 6 — датчики поперечных и вертикальных ускорений рамы тележки; 7 — трехосевой датчик ускорений на корпусе редуктора; 8 — внутрисалонный датчик поперечных и вертикальных ускорений (кузова); 9 — датчики выходных фазных токов тягового преобразователя.

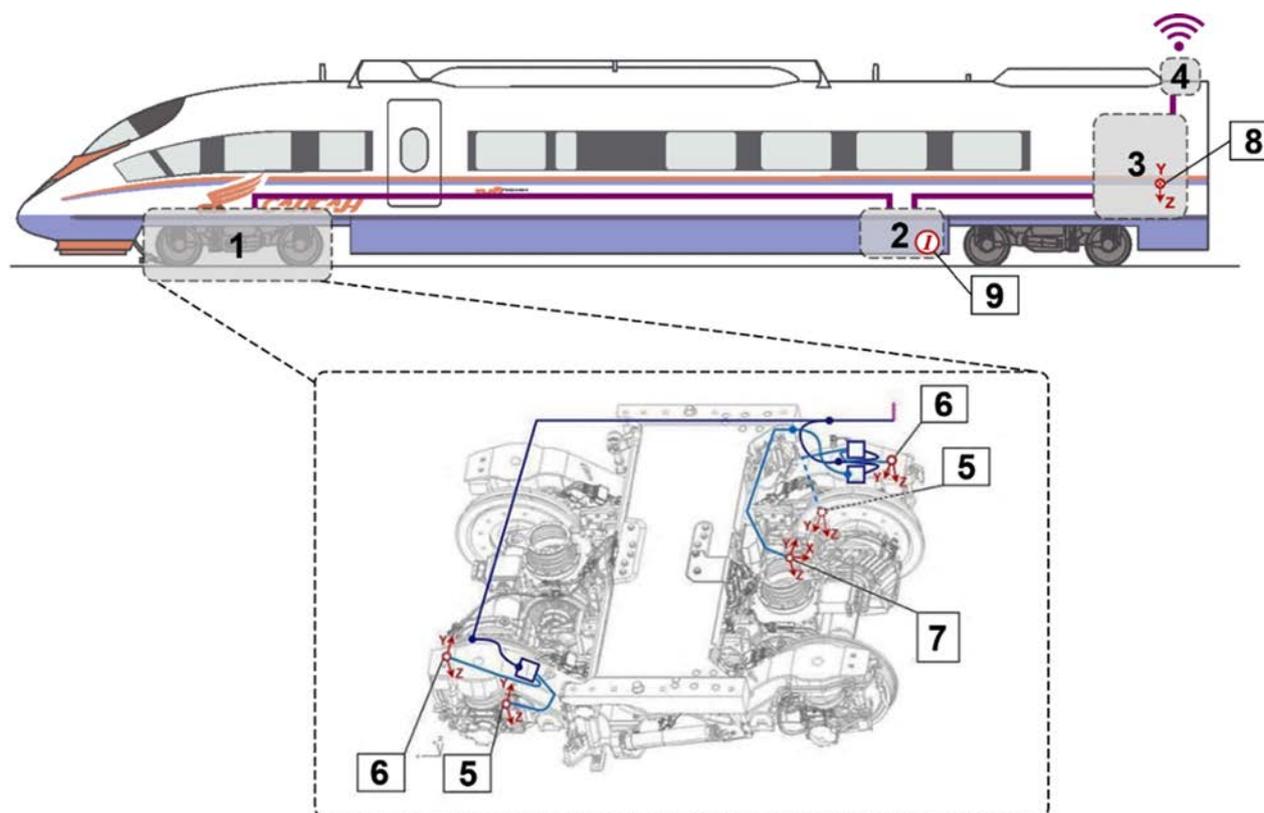


Рис. 7. Расположение элементов диагностического комплекса на вагоне электропоезда «Сапсан» (Источник: авторская работа)

В рамках опытной эксплуатации главной задачей является формирование и накопление базы диагностических данных и их корреляция со статистикой отказов. Организован мониторинг и оперативное информирование о состоянии элементов системы (исправность измерительных датчиков, статус подключения к сети беспроводной передачи данных). Перспективой развития системы КПДС является ее внедрение в единую цифровую платформу автоматизированной системы управления, составными частями которой будут являться подсистемы анализа диагностических данных, подсистемы планирования и управления ремонтом, подсистема закупок, диспетчерский аналитический центр и др. Это позволит, помимо мониторинга текущего состояния и параметров безопасности, создать эксплуатационные модели диагностируемых узлов для оценки и прогнозирования их остаточного ресурса, формировать рекомендации по виду и сроку проведения технических обслуживаний и ремонтных работ, контролировать качество проведенных работ. Применение и развитие этой системы будет являться очередным шагом к постепенному переходу к техническому обслуживанию подвижного состава по фактическому состоянию на основе методов предиктивной и прескриптивной диагностики.

Библиографический список

1. Богомолов Н. Ю. Высокоскоростные поезда «Сапсан» В1 и В2. Учебное пособие / Н. Ю. Богомолов, А. В. Ширяев, М. Ю. Изварин. М.: ОАО «Российские железные дороги», 2013. 522 с.
2. Кочергин В. В., Грабнер Г., Максимов И. Н. и др. Система выявления участков пути с повышенным уровнем воздействия на экипаж скоростного подвижного состава // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 2. С. 3–8.
3. Бржезовский А. М., Андреев В. Е., Аршинцев Д. Н. и др. О причинах аварийного срабатывания системы контроля устойчивости хода вагонов ЭВС «Сапсан» // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 2. С. 13–23.
4. Руководство по эксплуатации для электропоездов Velaro RUS/САПСАН (первой и второй серии) / SIEMENS, версия: Н, № документа А6Z00007385065, 2014. 666 с.
5. Velaro RUS. Функциональная спецификация «Контроль тележки» / SIEMENS, версия: F, № документа А6Z00001041521, 2020. 63 с.
6. Горский А. Н., Лысов Н. В. Извилистое движение вагонов подвижного состава // Электроника и электрооборудование транспорта. 2020. № 6. С. 9–13.
7. Динамика вагона / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Челноков. М.: Транспорт, 1978. 352 с.

Дата поступления: 15.04.2024

Решение о публикации: 31.05.2024

Контактная информация:

КАТАСОНОВ Антон Сергеевич — студент; anton.katasonov2012@gmail.com

ЛЫСОВ Николай Владимирович — канд. техн. наук, доцент; lysov.nikolay@vsmervice.ru

Integrated diagnostics system for high-speed rolling stock and infrastructure: analysis and implementation

A. S. Katasonov, N. V. Lysov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Katasonov A. N., Lysov N. V.* Integrated diagnostics system for high-speed rolling stock and infrastructure: analysis and implementation // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 2. P. 114–128. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-114-128

Abstract

Objective: to consider the issue of integrated diagnostics of the undercarriage equipment of high-speed rolling stock and track infrastructure, to analyze the impact of operational factors on the technical condition of rolling stock, to identify the main problems and propose possible solutions, to consider the prospects of domestic development in the field of integrated diagnostics of rolling stock and infrastructure. **Methods:** analysis of design features and impact on train operation safety, criteria and parameters of running stability and passenger comfort of the undercarriage equipment of the high-speed electric train “Sapsan”, description of prerequisites and stages of creation, testing and operation of the system of continuous monitoring of parameters of the dynamic system “undercarriage and track” of electric trains “Sapsan”, analysis of the impact of the main operational factors on the technical condition of the rolling stock undercarriage equipment. **Results:** the key role of the undercarriage equipment of the Sapsan electric train in ensuring operational safety and passenger comfort has been determined. The necessity of creating and implementing a system for continuous monitoring of dynamic reactions in the system “undercarriage equipment - track infrastructure” has been identified. The results of experimental operation of the prototype of the system in the Sapsan electric trains are considered on the example of research of track sections with increased impact on the rolling stock and problems of running stability of the electric train. It is revealed that vertical accelerations of axlebox units with significant amplitudes allow to reveal vertical irregularities of the track up to 3 m long, and constant registration of increased lateral accelerations of the bogie frame shows the necessity of solving the issues related to the geometry of wheel-rail contact at sinuous movement of rolling stock in terms of conicity. The current state and prospects of development of domestic systems of complex diagnostics are determined. **Practical importance:** the considered diagnostic system allows to carry out complex analysis of problems of technical condition of undercarriage equipment and infrastructure, to determine interdependence and level of influence of operational factors, which is the way to increase reliability and fault tolerance of rolling stock, operational safety and passenger comfort. Its integration into the digital platform will increase the efficiency of rolling stock maintenance planning and enterprise resource management.

Keywords: integrated diagnostics, high-speed rolling stock, track infrastructure, measurement sensors, dynamic system, monitoring.

References

1. Bogomolov N. Ju. Vysokoskorostnye poezda “Sapsan” V1 i V2. Uchebnoe posobie / N. Ju. Bogomolov, A. V. Shirjaev, M. Ju. Izvarin. M.: OAO “Rossijskie zheleznye dorogi”, 2013. 522 s. (In Russian)
2. Kochergin V. V., Grabner G., Maksimov I. N. i dr. Sistema vyjavlenija uchastkov puti s povyshennym urovnem vozdeystvija na jekipazh skorostnogo podvizhnogo sostava // Vestnik VNIIZhT. 2015. № 2. S. 3–8. (In Russian)

3. Brzhezovskij A. M., Andreev V. E., Arshincev D. N. i dr. O prichinah avarijnogo sbratyvanija sistemy kontrolja ustojchivosti hoda vagonov JeVS “Sapsan” // Vestnik VNIIZhT. 2014. № 2. S. 13–23. (In Russian)
4. Rukovodstvo po jekspluatacii dlja jelektropoezdov Velaro RUS/SAPSAN (pervoj i vtoroj serii) / SIEMENS, versija: H, № dokumenta A6Z00007385065, 2014. 666 s. (In Russian)
5. Velaro RUS. Funkcional'naja specifikacija “Kontrol' telezhki” / SIEMENS, versija: F, № dokumenta A6Z00001041521, 2020. 63 s. (In Russian)
6. Gorskij A. N., Lysov N. V. Izvilistoe dvizhenie vagonov podvizhnogo sostava // Jelektronika i jelektrooborudovanie transporta. 2020. № 6. S. 9–13. (In Russian)
7. Dinamika vagona / S. V. Vershinskij, V. N. Danilov, I. I. Chelnokov M.: Transport, 1978. 352 s. (In Russian)

Received: 14.04.2024

Accepted: 31.05.2024

Author's information:

Anton S. KATASONOV — Student; anton.katasonov2012@gmail.com

Nikolay V. LYSOV — PhD in Engineering, Associate Professor; lysov.nikolay@vsmsservice.ru