

УДК 625.031.1

Диагностика системы взаимодействия железнодорожного пути и подвижного состава по параметрам комфорта езды и эквивалентной конусности

А. С. Гапоненко, А. А. Киселев

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

Для цитирования: Гапоненко А. С., Киселев А. А. Диагностика системы взаимодействия железнодорожного пути и подвижного состава по параметрам комфорта езды и эквивалентной конусности // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2024. Т. 21, вып. 3. С.694–705. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-694-705

Аннотация

Цель: выявить влияние геометрических параметров колесных пар и рельсовой колеи на показатели плавности хода и уровня комфорта езды пассажиров для автоматизированной системы диагностики. **Методы:** при проведении исследований были использованы статистические методы. Выборка и анализ данных статистических наблюдений позволили выявить существующие подходы оценки уровней взаимодействия системы «колесо — рельс» при разных скоростях движения. Сгруппированные в ряды участки пути по пикетам были оценены по показателям комфорта езды пассажиров и эквивалентной конусности. Использованы материалы общего доступа и официальных сайтов, исследования авторов. **Результаты:** выявлен перечень факторов, влияющих на условия взаимодействия скоростного подвижного состава и железнодорожного пути. Получены данные показателей комфорта езды и эквивалентной конусности для линии Санкт-Петербург — Москва по пикетам при фактических реализуемых скоростях движения. **Практическая значимость:** определена возможность использования диагностики дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар и рельсов и геометрических параметров рельсовой колеи. Рекомендованы предложения по улучшению качественной оценки взаимодействия системы «колесо — рельс».

Ключевые слова: уровень комфорта, дискомфорт, комфортабельность езды пассажиров, эквивалентная конусность, ускорения, взаимодействие колеса с рельсом, колесная пара, профиль рельса, система диагностики

До начала 2000-х годов диагностика подвижного состава и диагностика путевой инфраструктуры велись независимо друг от друга. С появлением микропроцессорной системы диагностики ходовых частей появилась возможность непрерывного мониторинга сил взаимодействия пути и подвижного состава, построения прогнозных моделей их развития и предупреждения неисправностей. Эксплуатируемый в России высокоскоростной подвижной состав «Сап-

сан» оснащен микропроцессорной системой диагностики версии 1.0. В функциональные возможности системы диагностики входят такие компоненты, как контроль устойчивости хода (КУХ) и индекс состояния пути [1].

Система диагностики взаимодействия железнодорожного пути и подвижного состава «Сапсан» позволяет дополнить данные, полученные от мобильных средств диагностики инфраструктуры и других напольных систем бесконтактного контроля (контроль

нагрева буксовых узлов, контроль состояния поверхности катания колеса и т. д.). На основе мониторинга полученных данных о состоянии железнодорожного пути и реакции подвижного состава на неровности пути можно прогнозировать модель поведения каждой отдельной единицы подвижного состава с целью предупреждения отказа и своевременного обслуживания.

Использование датчиков ускорений позволяет ходовым тележкам выявлять как неровности пути, так и неровности на поверхности катания колес, а также отдельные неисправности ходовых частей (деградацию/излом рессор, амортизаторов колебаний и др.).

Датчики ускорений регистрируют ускорения на трех уровнях (рис. 1):

1. Неподдресоренные массы (установлены на буксовых узлах колесных пар) позволяют оценить уровень сил взаимодействия в зоне контакта колеса и рельса (ускорения величиной до 100g).

2. Датчики КУХ (установлены на раме тележки) позволяют выявить неисправности первой ступени рессорного подвешивания, а также оценить силы, вызванные извилистым движением колесных пар (ускорения до 5g). С повышением скорости движения

частота и амплитуда извилистых колебаний увеличиваются. При превышении «критической» скорости движения свободного зазора между гребнями колес и рельсами становится недостаточно для компенсации колебаний. «Критическая» скорость для одного и того же подвижного состава может значительно различаться в зависимости от состояния ходовых частей (износа колес, деградации амортизаторов поперечных колебаний) и состояния пути (сужения рельсовой колеи, износа головки рельсов).

3. Датчики второй ступени подвешивания (установлены на кузове вагона) позволяют выявить неисправности пневмоподвешивания и гасителей колебаний (рис. 2), а также оценить силы, вызванные длинными неровностями пути (ускорения до 2g).

Для привязки координат к путевой инфраструктуре используется приемник GPS или ГЛОНАСС и система беспроводной передачи информации о выявленных отступлениях на сервер организации, эксплуатирующей подвижной состав. Например, на основе измеренных данных в режиме реального времени формируется предупреждение о превышении предельного уровня (4-я степень) ускорения кузова вагона в вертикальной плоскости. Экспертная система анализа

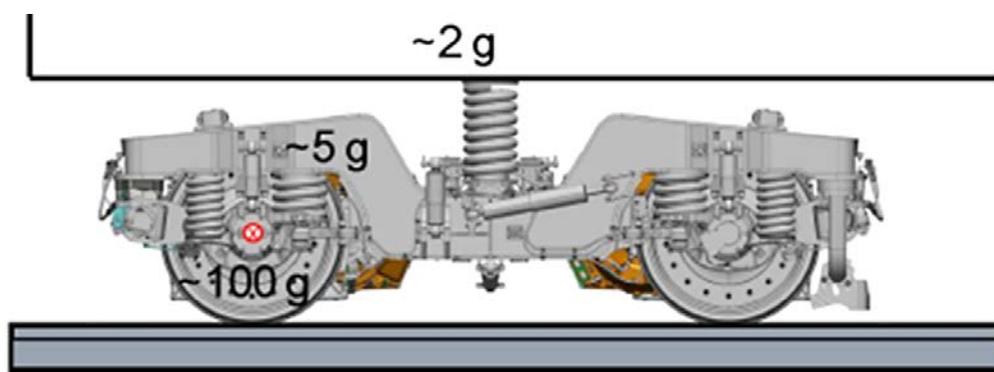


Рис. 1. Датчики ускорений, установленные на ходовой тележке «Сапсана»

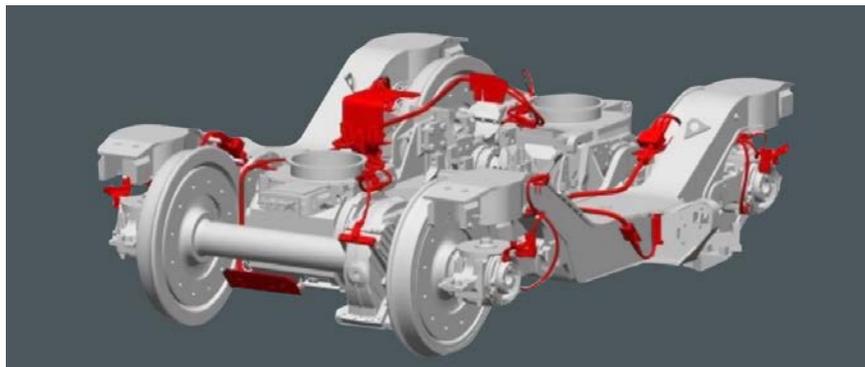


Рис. 2. Возможные места появления неисправностей в системах пневмоподвешивания и гасителей колебаний ходовой тележки

данных одновременно определяет место выявленного отступления.

Контроль плавности хода и комфорта езды пассажиров высокоскоростного подвижного состава «Сапсан» ведется с помощью портативного акселерометра «Аксиома» [2], который устанавливается на полу в кабине машиниста (хвостовой по ходу движения) над центром масс тележки. Статистическая обработка данных акселерометра и данных, полученных с датчиков, установленных на подвижном составе, позволяет получить необходимую информацию для последующей оценки состояния пути и подвижного состава. Например, на основании данных по ускорению кузова вагона производится расчет показателя среднего уровня комфорта пассажиров Nmv согласно стандарту EN-12299 [3]. Показатель среднего уровня комфорта позволяет производить ранжирование участков пути в зависимости от индекса качества пути и наличия вертикальных неровностей.

Для достоверности результатов исследования оценки степени влияния подвижного состава на показатели комфорта езды пассажиров было проведено сравнение выявленных ускорений подвижного состава на тестовых участках по первому и второму

главным путям станции Решетниково направления Санкт-Петербург — Москва. На этих участках фактическая скорость подвижного состава наиболее стабильна при движении в обоих направлениях и составляет от 195 до 200 км/ч. Были выполнены оценки среднего и максимального значений ускорений обращающегося высокоскоростного подвижного состава «Сапсан» (путем расчета статистического показателя полного значения вибрации: корень из суммы квадратов скорректированного виброускорения в вертикальной (cz) и поперечной (cy) плоскостях на тестовых участках (табл. 1)) [4].

Мониторинг полученных результатов обращающегося подвижного состава «Сапсан» показал, что на тестовых участках пути средние значения ускорений колеблются от 0,5 до 0,57 м/с² (расхождение между «лучшим» и «худшим» составами составляет 0,07 м/с², или 14%). Это свидетельствует о достаточно хорошем техническом состоянии подвижного состава и железнодорожного пути. Большое расхождение среди максимальных значений ускорения (от 0,71 до 0,84 м/с²) можно объяснить влиянием технического состояния деталей подвески и тележки на величину уровня комфорта

ТАБЛИЦА 1. Показатели уровня ускорений высокоскоростных подвижных составов «Сапсан» на тестовых участках направления Санкт-Петербург — Москва

№ подвижного состава	Тестовый участок 1 гл. путь 543ПК9 — 546ПК2			№ подвижного состава	Тестовый участок 2 гл. путь 543ПК9 — 546ПК2		
	среднее значение ускорений, м/с ²	максимальное значение ускорений, м/с ²	средняя скорость, км/ч		среднее значение ускорений, м/с ²	максимальное значение ускорений, м/с ²	средняя скорость, км/ч
1-07	0,5	0,73	198	1-17	0,5	0,72	197
1-12	0,5	0,71	197	1-19	0,51	0,74	199
2-04	0,5	0,71	199	2-04	0,52	0,79	199
1-17	0,51	0,78	198	2-03	0,53	0,78	197
1-11	0,51	0,76	199	1-09	0,54	0,77	198
2-02	0,52	0,77	199	1-06	0,54	0,78	196
1-13	0,54	0,74	199	1-12	0,55	0,81	197
1-15	0,54	0,8	197	1-05	0,55	0,81	198
1-06	0,56	0,74	199	1-16	0,55	0,84	199
1-08	0,56	0,82	199	1-15	0,55	0,83	198
2-03	0,56	0,77	199	2-02	0,56	0,82	197
1-19	0,56	0,76	199	1-11	0,56	0,84	198
1-16	0,57	0,78	199	1-07	0,56	0,84	198

в вагоне, на котором производились измерения. Нет необходимости проводить дальнейшую оценку уровня комфорта по составам, так как разница в оценке комфорта обусловлена состоянием конкретной подвижной единицы (вагона/тележки), на которой устанавливается акселерометр. Так, при следовании по первому главному пути в хвостовом вагоне № 1 подвижного состава № 1-07 показатели комфорта лучшие, а при следовании в этом же составе № 1-07 по второму главному пути в хвостовом вагоне № 10 — худшие.

Данные о количестве пикетов пути по первому и второму главным путям направ-

ления Санкт-Петербург — Москва, на которых выявлен уровень дискомфорта езды пассажиров «легкий» и хуже, показаны на рис. 3 и 4. Необходимо отметить, что с ростом показателя среднего значения уровня комфорта среди обращающегося подвижного состава увеличивается и количество выявленных пикетов с превышением уровня комфорта езды пассажиров.

Анализ показал, что количество пикетов пути с дискомфортом езды по результатам проездов высокоскоростных подвижных составов по первому главному пути составляет в среднем 23,8% от общего их числа. Из них 23,4% приходится на уровень

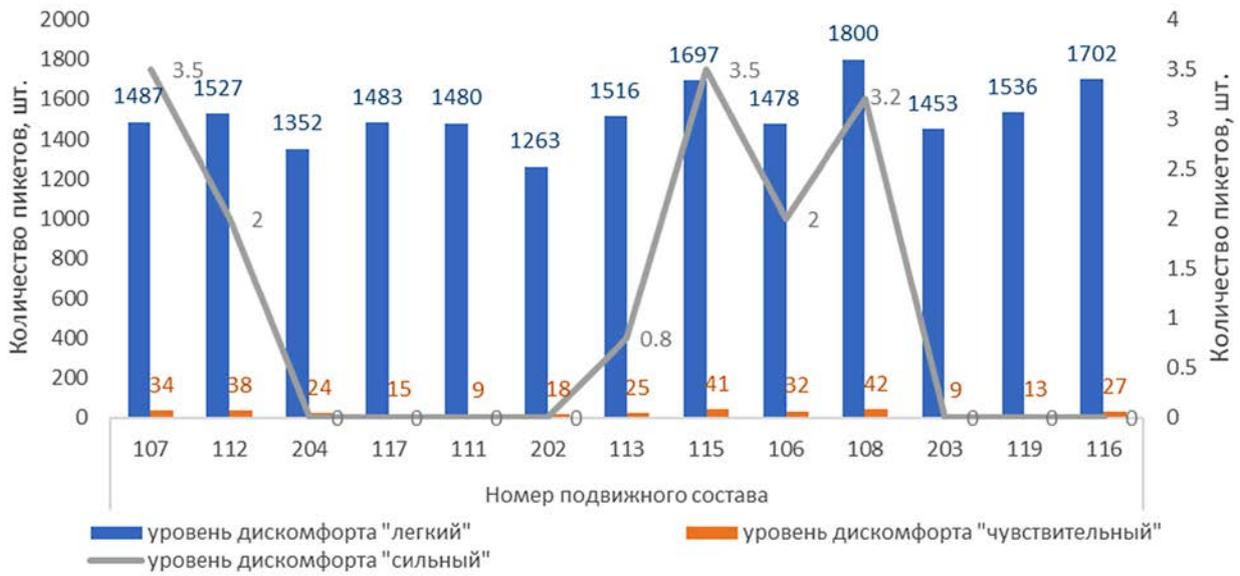


Рис. 3. Наличие пикетов пути с уровнем дискомфорта по первому главному пути направления Санкт-Петербург — Москва

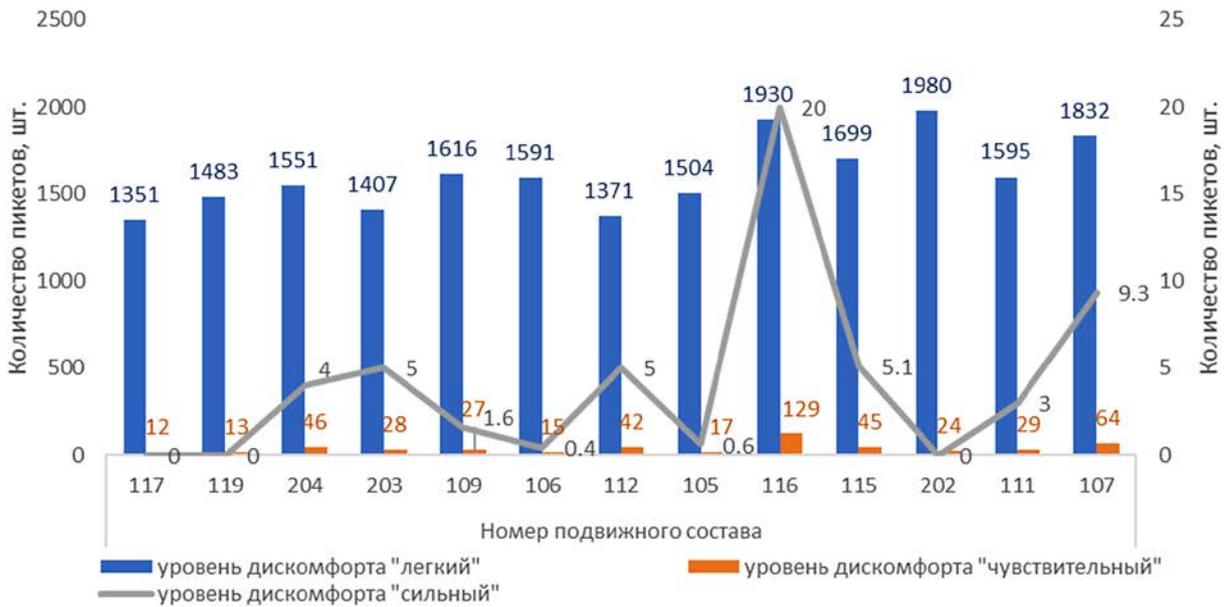


Рис. 4. Наличие пикетов пути с уровнем дискомфорта по второму главному пути направления Санкт-Петербург — Москва

дискомфорта «легкий», 0,4% — на «чувствительный» и 0,02% — на уровень дискомфорта «сильный». Аналогичные результаты проезда получены по второму главному пути, где общее количество пикетов, на ко-

торых выявлен уровень дискомфорта, достигает в среднем 25,4%. Из них на 24,7% пикетов выявлен «легкий» уровень дискомфорта, на 0,6% — «чувствительный» и на 0,06% — «сильный».

Установлено, что со стороны пути основной причиной снижения уровня комфорта езды пассажиров высокоскоростных поездов является наличие длинных неровностей (от 100 до 250 м) в профиле (более 25 мм) и в плане (более 15 мм), которых больше всего наблюдается в зонах стрелочных переводов (более 60%). Наиболее интенсивно расстройство рельсовой колеи происходит именно на пикетах с длинноволновыми неровностями и смежных с ними. Дополнительными факторами, оказывающими неблагоприятное влияние на динамику, являются наличие отступлений по геометрии рельсовой колеи и неравномерная жесткость подрельсового основания на стрелочных переводах, мостах и пешеходных настилах.

Данные ускорений тележки высокоскоростного подвижного состава совместно с данными мобильных путеизмерительных средств (по величинам волнообразных неровностей рельсов в диапазоне волн 300–1000 мм) помогают оценить эффективность проведения работ. Так, проведение работ по шлифовке рельсов в зоне моста позволило уменьшить величины неровности с 0,6 до 0,4 мм, что, в свою очередь, привело к снижению уровня ускорения и контактных напряжений [5].

Данные, полученные с датчиков ускорений буксовых узлов тележки, позволяют выявить закономерности между величинами неровностей пути в вертикальной плоскости (расчетные значения на 6 м) и усилием в рессорах подвижного состава. В основном усилие в рессорах обусловлено величиной неровности, но не всегда. Проведенными исследованиями установлено, что не все неровности в вертикальной плоскости приводят к возникновению повышенных усилий в пружинах подвески, важную роль играют длина волны неровности и ее форма. Форма

волны неровности имеет большое значение, что подтверждается данными, полученными при оценке уровня вертикального ускорения кузова и величин неровностей профиля пути до и после проведения работ по ремонту пути [6]. Из-за низкого качества проведенных работ величины неровностей профиля выросли, значительно увеличился уровень вертикальных ускорений вагона, уровень комфорта езды пассажиров в вертикальной плоскости ухудшился до уровня «чувствительный» дискомфорт. Профиль пути после ремонта имеет большую волнистость, а средняя длина волны неровности профиля уменьшилась со 150 до 50 м, в местах резкого перелома отмечены значительные уровни вертикального ускорения кузова.

Данные по ускорению тележек высокоскоростного подвижного состава в поперечной плоскости (наблюдения в течение нескольких лет) показывают, что повышенные уровни колебаний привязаны к определенным участкам пути. Причем на этих участках они могут регистрироваться как в течение всего года, так и в течение определенного сезона (весна — лето). Возникновение таких колебаний обусловлено неблагоприятным сочетанием профилей в паре «колесо — рельс» из-за их износа. Весенний всплеск обусловлен изменением положения рельсовых нитей в плане в момент оттаивания пути (переход рельсов из растянутого в сжатое состояние и накопление мелких рихтовок пути). Анализ результатов срабатывания датчиков контроля устойчивости хода по составам, номерам вагонов и тележек высокоскоростного подвижного состава «Сапсан» [7] показывает, что срабатывания распределяются неравномерно, что может быть обусловлено износом колесных пар и амортизаторов поперечных колебаний.

Возникает вопрос: как определить, что является причиной срабатывания — состояние пути или состояние ходовых частей?

Необходим комплексный параметр, с помощью которого можно прогнозировать динамику поведения ходовых тележек подвижного состава «Сапсан». Динамика ходовых тележек в значительной мере обусловлена контактной геометрией в паре «колесо — рельс». В рамках европейского проекта DunoTrain была разработана методика выявления потенциально опасных участков с точки зрения контактной геометрии и обеспечения устойчивости подвижного состава [8]. Методика основана на построении карт частотного распределения показателя «эквивалентная конусность». Методика позволяет производить качественную оценку состояния контактной пары «колесо — рельс» и в зависимости от выбранной стратегии проводить превентивное восстановление профиля катания колеса либо профильную шлифовку рельсов. Похожая методика используется в КНР [9] и США [10]. Аналогичные исследования были проведены и в Российской Федерации [11, 12].

На наш взгляд, необходимо внедрение автоматизированной системы контроля за контактом в паре «колесо — рельс» на участках обращения скоростных и высокоскоростных поездов. Для этого необходимо обеспечить автоматизированный сбор данных по геометрическим параметрам колесных пар скоростных и высокоскоростных поездов и геометрическим параметрам рельсовой колеи и рельсов [13].

Для автоматического сбора данных по геометрическим параметрам колесных пар необходимы параметрами обладает система контроля колесных пар на ходу 3DWheel компании «Рифтэк» [14]. Данная система

в настоящее время эксплуатируется в пункте технического обслуживания Лужская эксплуатационного локомотивного депо Санкт-Петербург — Варшавский. Комплекс включен в реестр средств измерений, применяемых в ОАО «РЖД».

Для автоматического сбора данных по геометрическим параметрам рельсов и рельсовой колеи можно использовать мобильный диагностический комплекс МДК-498 компании «Радиоавионика». Данный диагностический комплекс начиная с июня 2023 года позволяет получать данные по параметру «эквивалентная конусность», характеризующему контакт в паре «колесо — рельс». Расчет выполняется путем наложения неизношенной колесной пары на реально измеренное очертание рельсового пути. Для построения прогнозной модели необходимы данные по реально измеренным профилям колес подвижного состава «Сапсан».

Проведенный мониторинг полученных данных диагностического комплекса МДК-498 с сентября по декабрь 2023 года параметра «эквивалентная конусность» позволил установить, что 98% и более значений эквивалентной конусности обращающегося высокоскоростного подвижного состава и рельсов на пикетах первого и второго главных путей направления Санкт-Петербург — Москва находятся в пределах от 0,27 до 0,38 (рис. 5).

Показатели эквивалентной конусности зависят от реализуемых скоростей движения, ширины рельсовой колеи и времени года. Следует отметить тот факт, что величина эквивалентной конусности на участках пути с узкой рельсовой колеей больше, чем на участках с широкой рельсовой колеей (рис. 6, 7).

Так как показатель эквивалентной конусности каждой конкретной колесной оси

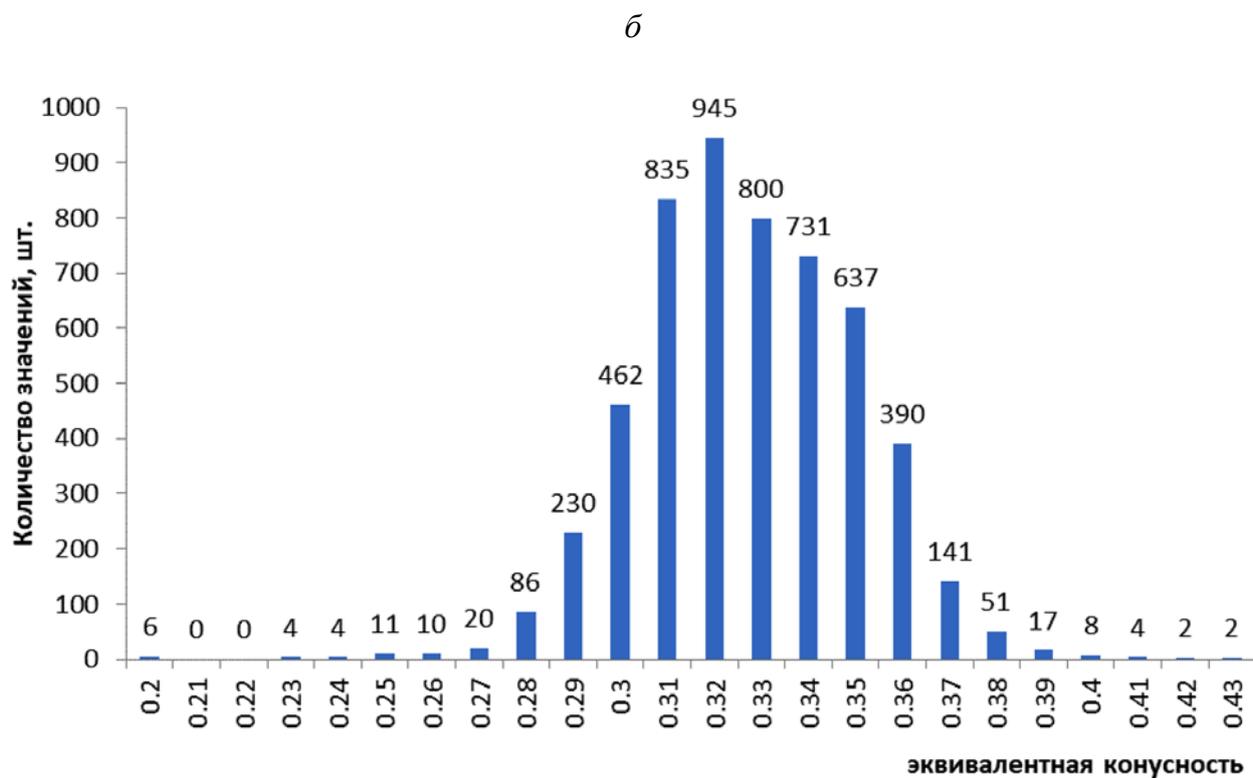
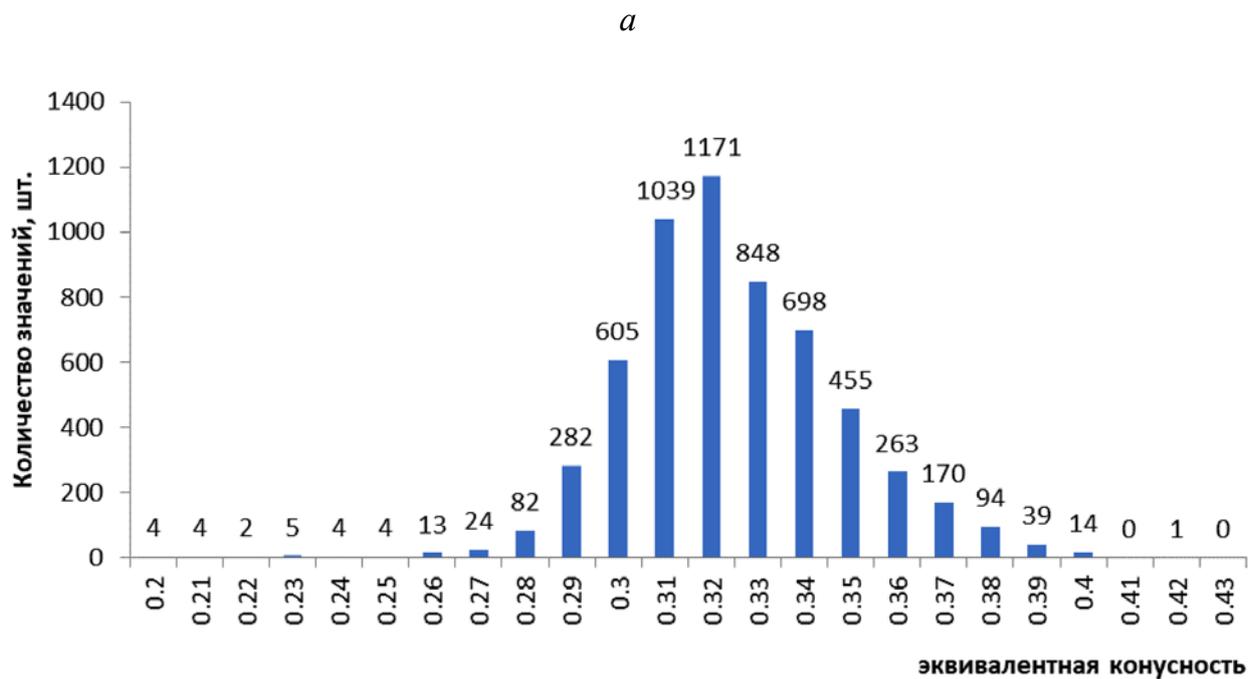


Рис. 5. Карты частотного распределения показателей эквивалентной конусности:
a — по первому главному пути, *б* — по второму главному пути

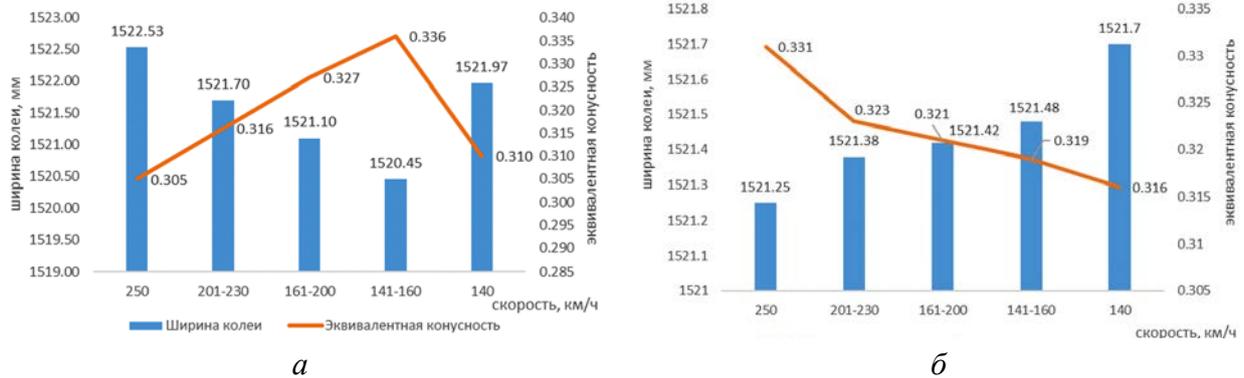


Рис. 6. Влияние скоростей движения на показатели эквивалентной конусности и ширины колеи: *а* — по первому главному пути, *б* — по второму главному пути

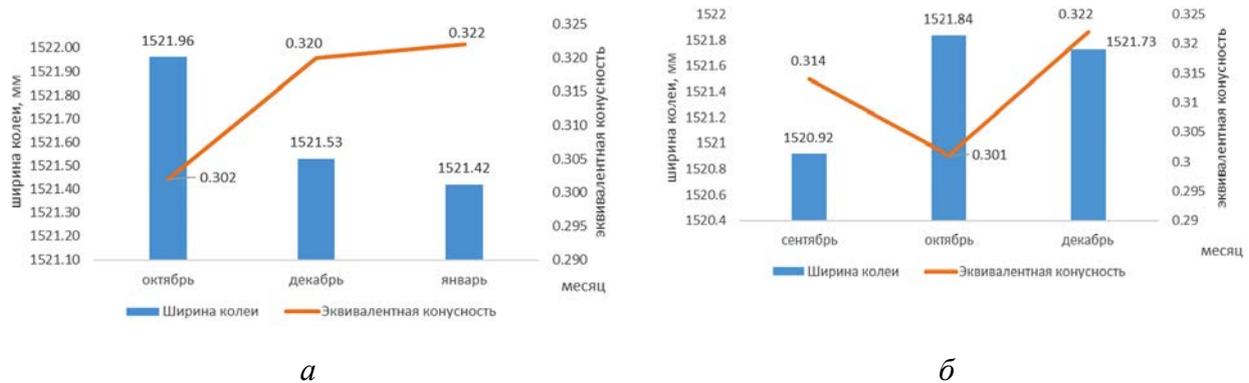


Рис. 7. Влияние периода года на показатели эквивалентной конусности и ширины колеи: *а* — по первому главному пути, *б* — по второму главному пути

подвижного состава изменяется в процессе движения по оси железнодорожного пути, то одной из задач при дальнейшем повышении скоростей движения является установление допустимых уровней показателя эквивалентной конусности в эксплуатации.

Выводы

1. Статистическая оценка данных, полученных с датчиков ускорений тележек высокоскоростного подвижного состава, совместно с результатами от мобильных диагностических комплексов позволяет более полно оценивать по пикетам уровень комфорта езды пассажиров, устанавливать при-

чины появления дискомфорта и принимать решения для своевременного их устранения.

2. Проведение выправочных работ в комплексе с работами по шлифовке рельсов является наиболее эффективной мерой, направленной на улучшение динамики вагонных тележек подвижного состава.

3. Обоснована необходимость создания единой автоматизированной системы контроля контакта в системе «колесо — рельс», позволяющей осуществлять автоматизированный сбор информации о геометрических параметрах колесных пар высокоскоростных поездов и геометрических параметрах рельсовой колеи и рельсов.

4. Применяемые мобильными диагностическими комплексами методы диагностирования состояния пути и его взаимодействия с подвижным составом могут быть использованы для более точного определения геометрических параметров колесных пар, рельсов и рельсовой колеи.

5. Для определения оптимальных условий взаимодействия системы колеса с рельсом на участках высокоскоростного движения поездов в качестве основного предлагается использовать показатель «эквивалентная конусность».

Библиографический список

1. Высокоскоростные поезда «Сапсан» В1 и В2: учебное пособие / Н. Ю. Богомолов [и др.]; под ред. А. В. Ширяева. М.: ОАО «Российские железные дороги», 2013. 522 с.

2. Системы мониторинга состояния путевой инфраструктуры и комфортабельности езды пассажиров «Аксиома»: руководство по эксплуатации ВДМА.663500.199 РЭ. 2018. 16 с.

3. Стандарт EN-12299. Железнодорожный транспорт. Комфортные условия во время движения пассажирских поездов. Измерение и оценка / Европейский комитет по стандартизации (CEN). 2009. 67 с.

4. ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997). Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Общие требования. М., 2010. 24 с.

5. Гапоненко А. С. Диагностика плавности хода и уровня комфорта пассажиров на участках обращения скоростных поездов // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 4. С. 8–12.

6. Гапоненко А. С. Состояние пути и риски нарушения плавности хода поездов // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 7. С. 23–26.

7. О причинах аварийного срабатывания системы контроля устойчивости хода вагонов ЭВС

«Сапсан» / А. М. Бржезовский [и др.] // Вестник ВНИИЖТа. 2014. № 2. С. 13–22.

8. A multi-national survey of the contact geometry between wheels and rails / M. Zacher [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2015. Vol. 229, № 6. P. 691–709.

9. Research on Bogie Frame Lateral Instability of High-Speed Railway Vehicle / Ch. Wang [et al.] // Shock and Vibration. 2018. Vol. 5. P. 1–13.

10. Wu H., Kalay S. Management of the Wheel/Rail Contact Interface in Heavy-Haul Operations // Interface. The Journal of Wheel/Rail Interaction. 2013, October 18.

11. Эквивалентная конусность и ее влияние на движение подвижного состава / А. А. Киселев [и др.] // Известия ПГУПС. СПб., 2017. Т. 14, вып. 2. С. 247–255.

12. Влияние геометрических параметров железнодорожного пути на величину эквивалентной конусности колесной пары / А. А. Киселев [и др.] // Известия ПГУПС, 2019. Т. 16, вып. 2. С. 202–211.

13. Развитие использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар / А. Г. Нуриев [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований ПГУПС. 2023. № 1. С. 7–18.

14. Система контроля колесных пар на ходу 3DWheel. URL: https://riftek.com/ru/products/real-time_wheels_geometry_measurement_system/

Дата поступления: 28.06.24

Решение о публикации: 29.07.24

Контактная информация:

ГАПОНЕНКО Александр Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Железнодорожный путь»; gaponenkoalexandr@mail.ru

КИСЕЛЕВ Артем Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Железнодорожный путь»; zhdp10@gmail.com

Diagnostics of the railway track and rolling stock interaction system according to the parameters of ride comfort and equivalent taper

A. S. Gaponenko, A. A. Kiselyov

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

For citation: Gaponenko A. S., Kiselyov A. A. Diagnostics of the railway track and rolling stock interaction system according to the parameters of ride comfort and equivalent taper // Proceedings of the St. Petersburg State University of Railway Engineering. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 694–705 (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-694-705

Abstract

Purpose: to identify the influence of the geometric parameters of wheel sets and rail track on the smoothness of the ride and the level of passenger comfort for an automated diagnostic system. **Methods:** statistical methods were used to conduct the research. Sampling and analysis of statistical observation data made it possible to identify existing approaches to assessing the levels of interaction of the wheel-rail system at different speeds. The track sections grouped into rows along pickets were assessed in terms of passenger ride comfort and equivalent conicity. Materials used in the public domain and official websites, as well as research by the authors. **Results:** a list of factors influencing the conditions of interaction between high-speed rolling stock and the railway track has been identified. Data were obtained for indicators of ride comfort and equivalent conicity for the St. Petersburg — Moscow line along pickets at actual realizable speeds. **Practical importance:** the possibility of using remote measurement diagnostics to determine the geometric parameters of wheelsets and rails and the geometric parameters of the rail track has been determined. Suggestions for improving the qualitative assessment of the interaction of the wheel-rail system are recommended.

Keywords: comfort level, discomfort, passenger ride comfort, equivalent conicity, acceleration, wheel-rail interaction, wheelset, rail profile, diagnostic system

References

1. Vy'sokoskorostny'e poezda "Sapsan" V1 i V2: uchebnoe posobie / N. Yu. Bogomolov [i dr.]; pod red. A. V. Shiryaeva. M.: OAO "Rossijskie zheleznny'e dorogi", 2013. 522 s. (In Russian)
2. Sistemy` monitoringa sostoyaniya putevoj infrastruktury` i komfortabel`nosti ezdy` passazhirov "Aksio-ma": rukovodstvo po e`kspluatacii VDMA.663500.199 RE`. 2018. 16 s. (In Russian)
3. Standart EN-12299. Zheleznodorozhny`j transport. Komfortny`e usloviya vo vremya dvizheniya passazhir-skix poezdov. Izmerenie i ocenka / Evropejskij komitet po standartizacii (CEN). 2009. 67 s. (In Russian)
4. GOST 31191.1–2004 (ISO 2631–1:1997). Vi-braciya i udar. Izmerenie obshhej vibracii i ocenka ee vozdejstviya na cheloveka. Obshhie trebovaniya. M., 2010. 24 s. (In Russian)
5. Gaponenko A. S. Diagnostika plavnosti xoda i urovnya komforta passazhirov na uchastkax obra-shheniya skorostny`x poezdov // Put` i putevoe xozyaj-stvo. 2019. № 4. S. 8–12. (In Russian)
6. Gaponenko A. S. Sostoyanie puti i riski narush-eniya plavnosti xoda poezdov // Put` i putevoe xozyaj-stvo. 2016. № 7. S. 23–26. (In Russian)
7. O prichinax avarijnogo srabaty`vaniya sistemy` kontrolya ustojchivosti xoda vagonov E`VS "Sapsan" /

A. M. Brzhezovskij [i dr.] // Vestnik VNIIZhTa. 2014. № 2. S. 13–22. (In Russian)

8. A multi-national survey of the contact geometry between wheels and rails / M. Zacher [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2015. Vol. 229, № 6. P. 691–709.

9. Research on Bogie Frame Lateral Instability of High-Speed Railway Vehicle / Ch. Wang [et al.] // Shock and Vibration. 2018. Vol. 5. P. 1–13.

10. Wu H., Kalay S. Management of the Wheel/Rail Contact Interface in Heavy-Haul Operations // Interface. The Journal of Wheel/Rail Interaction. 2013, October 18.

11. E`kvivalentnaya konusnost` i ee vliyanie na dvizheniya podvizhnogo sostava / A. A. Kiselev [i dr.] // Izvestiya PGUPS. SPb., 2017. T. 14, vy`p. 2. S. 247–255. (In Russian)

12. Vliyanie geometricheskix parametrov zheleznodorozhnogo puti na velichinu e`kvivalentnoj konusnosti kolesnoj pary` / A. A. Kiselev [i dr.] //

Izvestiya PGUPS, 2019. T. 16, vy`p. 2. S. 202–211. (In Russian)

13. Razvitie ispol`zovaniya distancionny`x izmerenij po opredeleniyu geometricheskix parametrov kolesny`x par / A. G. Nuriev [i dr.] // Byulleten` rezul`tatov nauchny`x issledovanij PGUPS. 2023. № 1. S. 7–18. (In Russian)

14. Cistema kontrolya kolesny`x par na xodu 3DWheel. URL: https://riftek.com/ru/products/real_time_wheels_geometry_measurement_system/ (In Russian)

Received: 28.06.2024

Accepted: 29.07.2024

Author's information:

Alexander S. GAPONENKO — PhD in Engineering, Associate Professor of the department “Railway track”; gaponenkoalexandr@mail.ru

Artem A. KISELEV — PhD in Engineering, Associate Professor of the department “Railway track”; zhdp10@gmail.com