

Разработка алгоритма для построения профиля колеса и определения дефектов на поверхности в процессе взаимодействия колесо–рельс

К.Г. Аринушкина^{1,3,*}, П.И. Цомаев^{2,3}, В.В. Давыдов^{1,2}, И.Ю. Савельев³

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
кафедра фотоники и линий связи
Россия, 193232, Санкт-Петербург,
пр. Большевиков, д. 22, к. 1

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф

³АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте»
Россия, 109029, Москва, Нижегородская ул., д. 27, стр. 1

(Поступила в редакцию 11.06.2025; подписана в печать 05.08.2025)

Глобальный рост железнодорожных перевозок способствует экономическому развитию, но одновременно повышает требования к безопасности подвижного состава. Ключевым фактором риска остаются дефекты колесных пар, которые становятся причиной большинства аварий. Для их своевременного выявления требуется комплексный анализ поверхности колес, включающий сбор изображений, восстановление поврежденных участков и точный замер геометрических параметров. Для своевременного обнаружения дефектов используются оптические системы, которые позволяют проводить мониторинг поверхности в режиме реального времени. Однако эффективность таких систем во многом зависит от используемых алгоритмов расчета и оценки параметров. В представленной работе рассматривается актуальность разработки усовершенствованного алгоритма обработки данных системы контроля основных параметров колес с целью повышения точности диагностики дефектов поверхности катания.

PACS: 42.62.Cf УДК: 620.1.08, 681.786.5, 681.7.014.3.

Ключевые слова: лазерный профилометр, колесная пара, лазерное излучение, оптическая система, поверхность колеса, отражение, алгоритм, геометрические размеры, погрешность измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные методы контроля состояния колес подвижного железнодорожного состава, основанные на ручных измерениях во время планового обслуживания, демонстрируют существенные ограничения: высокую трудоемкость, значительные временные затраты и недостаточную точность [1–4]. Эти недостатки делают их малоэффективными для современных условий интенсивной эксплуатации железных дорог. Использование других методов для контроля состояния колес, которые успешно применяются в метро [5] или в трамваях [6], на магистральных железных дорогах не эффективно.

Современные исследования в области контроля поверхности как состояния рельс, так и конструкции колеса, сосредоточены на развитии оптико–электронных методов измерения [4, 7–10]. Наиболее эффективным подходом признано использование лазерных систем [10–13]. Данная методика включает захват изображений колесных пар с помощью матричных приемников, обработку полученных данных специальными алгоритмами, автоматическое определение геометрических параметров.

Экспериментальные данные подтверждают, что лазерные измерительные системы, которые использу-

ются во многих устройствах, обеспечивают необходимую точность при минимальном времени обработки [10, 12, 14–21]. Использование оптических систем на железных дорогах позволяет эффективно решать задачи оперативного контроля состояния колесных пар в реальных условиях эксплуатации, отвечая современным требованиям к безопасности перевозок.

В настоящей работе рассмотрена система контроля параметров колес, которая обеспечивает автоматизированное бесконтактное измерение геометрических характеристик колесных пар для широкого спектра железнодорожного подвижного состава [22–24]. Она предназначена для работы с колесными парами пассажирских, грузовых и маневровых локомотивов, моторных и немоторных вагонов электропоездов и дизельпоездов, а также грузовых и пассажирских вагонов локомотивной тяги, включая специальный подвижной состав, соответствующий требованиям ГОСТ 10791-2011. Ключевой особенностью решения рассматриваемой в работе задачи является возможность проведения измерений в процессе движения состава без необходимости его остановки, что значительно повышает эффективность диагностических процедур. Это потребовало разработки нового алгоритма обработки оптических изображений, а также модернизацию конструкции размещения оптических элементов ниже уровня рельсов на различных участках железной дороги, в основном на станциях и перегонах.

* k-arinushkina@mail.ru

1. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА И ПРИНЦИП ЕЕ РАБОТЫ

Разработанная система мониторинга основана на принципе лазерной триангуляции и включает три ключевых компонента: высокоточный лазерный профилометр, многоканальный фотоприемник и специализированное программное обеспечение для цифровой обработки сигналов.

Основу измерительного комплекса составляет импульсный полупроводниковый лазерный источник ($\lambda = 638$ нм) с интегрированной системой термостабилизации (рис. 1) [25, 26]. Особенностью конструкции является применение элементов Пельтье с цифровым управляющим контроллером и прецизионным датчиком температуры, смонтированных на общей теплоотводящей подложке с излучателем. Для формирования измерительного поля используется оптическая схема преобразования лазерного пучка в линию, включающая коллимирующий модуль для формирования параллельного светового потока и сферическую призму, обеспечивающую разворот пучка в линию длиной 1.0–1.3 м.

Сформированная световая плоскость проецируется на контролируемую поверхность колеса под заданным углом θ . Отражаемое излучение регистрируется высокочувствительной КМОП-матрицей, при этом пространственное распределение световой линии на матрице несет информацию о геометрических параметрах профиля.

Отраженное от контролируемой поверхности колеса лазерное излучение проходит через систему узкополосных интерференционных светофильтров, что обеспечивает эффективное подавление паразитных засветок. Применяется дублированный набор светофильтров, каждый из которых оптимизирован для работы в определенном диапазоне углов обзора. В сочетании со стабилизированной длиной волны лазерного источника это позволяет использовать фильтры с узкой полосой пропускания (порядка 1–10 нм), чтобы обеспечить точный приём отражённого от объекта сигнала и увеличить характеристический сигнал/шум.

Принцип измерения, основанный на методе триангуляции, показан на рис. 1. Известно расстояние (D) между источником излучения и приёмником, а также угол лазерного излучения α и угол камеры θ (между D и L), который рассчитывается по изменению положения точки на матрице.

Расстояние до объекта, дополняющее информацию о координате пятна, рассчитывается по формуле

$$L = \frac{D * \sin(\alpha)}{\sin(\theta + \alpha)}.$$

Угол θ определяется по изменению изображения на матрице для каждого подсвеченного пикселя с координатами (u, v) . D и α — устанавливаются при калибровке.

Оптический матричный приемник выполнен в формате высокочувствительной КМОП матрицы размером $n \times m$ пикселей, он обеспечивает преобразова-

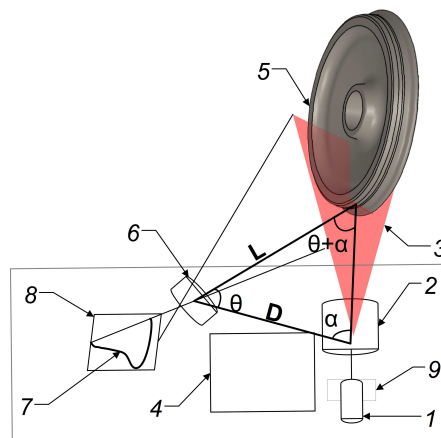


Рис. 1. Структурная схема лазерного профилометра: 1 — источник лазерного излучения, 2 — оптический генератор линии, 3 — световая плоскость, 4 — устройство обработки информации, 5 — контролируемая поверхность, 6 — узкополосный интерференционный светофильтр, 7 — оцифрованное изображение линии профиля поверхности измеряемого объекта, 8 — оптический матричный приемник, 9 — система стабилизации температуры

ние пространственного распределения световой линии в цифровое изображение профиля в системе координат (u, v) . Устройство обработки информации реализовано на базе промышленного программируемого контроллера, оно выполняет обработку данных в реальном времени с последующим пересчётом из системы координат пикселей на матрице (u, v) , в реальную систему координат объекта измерения.

Для каждой точки вдоль лазерной линии (координата X) система вычисляет вертикальное смещение поверхности (координата Z) с точностью до 0.2 мм и геометрические параметры гребня колеса.

Высокая точность измерений лазерного профилометра обеспечивается комплексом технических решений, главным из которых является встроенная система термостабилизации, поддерживающая длину волны полупроводникового лазера с точностью ± 0.5 нм. В результате на оптическом приемнике формируется четкое изображение контролируемой поверхности с плотностью точек в профиле до 2048 на длине 0.5 метра, что соответствует разрешению 0.2 мм по координате X) и повышенной точности построения поперечного профиля.

По координате Z прибор обеспечивает абсолютную погрешность определения расстояния до поверхности не более ± 1 мм во всем рабочем диапазоне вне зависимости от местоположения объекта по координате X .

Применение импульсного режима работы полупроводникового лазера в сочетании с оптимизированной оптической схемой позволяет достичь высокой точности измерений геометрических параметров колесных

пар в сложных эксплуатационных условиях и при интенсивной солнечной засветке за счет высокой пиковой мощности импульсного излучения, сохраняя при этом среднюю мощность на безопасном уровне. Использование красного диапазона не только повышает безопасность системы, делая лазерный луч видимым для оператора, но и обеспечивает оптимальное взаимодействие с чувствительными элементами КМОП-матрицы.

Коллиматор и сферическая призма преобразует лазерный пучок в равномерную световую линию и позволяют распределить энергию излучения по увеличенной площади, что снижает плотность мощности до значений, соответствующих 2 классу лазерной безопасности (менее 1 мВт), одновременно обеспечивая необходимую интенсивность сигнала для точных измерений.

Встроенные механизмы защиты и самодиагностики гарантируют безопасную эксплуатацию в условиях интенсивного железнодорожного движения, а специальные алгоритмы обработки сигнала компенсируют влияние внешних помех, обеспечивая достоверность результатов в реальных эксплуатационных условиях.

Способ облучения колеса показан на рис. 2. Выполняется сканирование внешней (поверхность катания) и внутренней стороны (гребень колеса) профиля колеса по отдельности двумя профилометрами, предварительно откалиброванными в одну систему координат.

На рис. 3 показан профиль обода колеса с точными размерами, радиусами и уклонами для цельнокатаных колес, определенными в приложении в соответствии с ГОСТ 10791-2011.

Основная задача системы — измерить параметры и выделить дефекты поверхности катания на фоне шумов и других помех. Для решения этой задачи было испытано два алгоритма математической обработки данных, основанные на анализе геометрии поверхности. Эти методы анализируют геометрические параметры поверхности, такие как толщина, высота и крутизна гребня, прокат по кругу катания и ширина обода колеса, используя данные лазерного сканирования. Для анализа используются известные данные по дефектам [27].

2. АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ ДАННЫХ ПРОФИЛЯ

При обработке данных, полученных с лазерных профилометров в виде облака точек $\{(x_k, y_k)\}$ (где $k = 1...N$), существенное влияние на точность измерений могут оказывать различные паразитные отражения, формирующие отдельные кластеры точек, не соответствующие реальному профилю колесной пары, и случайные выбросы, искажающие результаты измерений.

Паразитные отражения преимущественно возникают вследствие отражения солнечного света от контролируемой поверхности, капель влаги или других отражающих элементов, создавая на приемнике ложные световые сигналы. Оптические шумы (выбросы) появляются под воздействием внешних факторов: вибраци-

онных нагрузок, электромагнитных помех, взаимного влияния сигналов и прочих эксплуатационных воздействий.

Экспериментальные исследования выявили недостаточную эффективность ранее применяемого алгоритма фильтрации [26, 27] в части устранения указанных дефектов. Разработанный усовершенствованный алгоритм демонстрирует существенно лучшие результаты по подавлению как паразитных отражений, так и случайных выбросов, что подтверждено в ходе натурных испытаний системы.

Для удаления выбросов и паразитных отражений используется фильтрация с помощью плотностного алгоритма кластеризации HDBSCAN (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) [28]. Алгоритм разделяет полученные данные на кластеры, при дальнейшей их обработке выбросы и ложные кластеры отбрасываются, оставляя только основное облако точек, характеризующее профиль железнодорожного колеса. Для работы HDBSCAN требуется задать два параметра: окрестность ϵ и максимальное расстояние между точками данных, чтобы они могли считаться частью одного кластера, m — минимальное количество точек, необходимое для формирования кластера. Выполняется два этапа кластеризации: в первый этап значения $\epsilon = 5$ и $m = 20$ подобраны так, чтобы отбросить выбросы, расположенные на расстоянии больше $\epsilon = 5$ мм от основного облака точек, а для второго этапа значения $\epsilon = 0.5$ и $m = 2$ подобраны так, чтобы разделить всё облако точек на множество кластеров A и в дальнейшем отбросить те кластеры, которые не характеризуют профиль. Для этого при обработке кластеров оценивается расстояние d между последней точкой кластера A_i и первой точкой кластера A_j , где $j = i + 1$.

$$d = \sqrt{(x_{A_{i_{end}}} - x_{A_{j_{end}}})^2 + (y_{A_{i_1}} - y_{A_{j_1}})^2}$$

Если d меньше 1 мм, то точки A_j кластера добавляются в A_i , значение 1 было подобрано эмпирическим путём. Если d больше 1, то оценивается среднеквадратическая ошибка (RMSE) линейной аппроксимации N граничных точек двух кластеров A_i и A_j , с каждого берётся по 5 точек, где значение 5 подобрано эмпирическим путём.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (y_m - \widehat{y_m})^2}$$

Если RMSE меньше 0.25, то кластеры объединяются в один. В конце алгоритма должен остаться один, наибольший кластер, характеризующий профиль железнодорожного колеса.

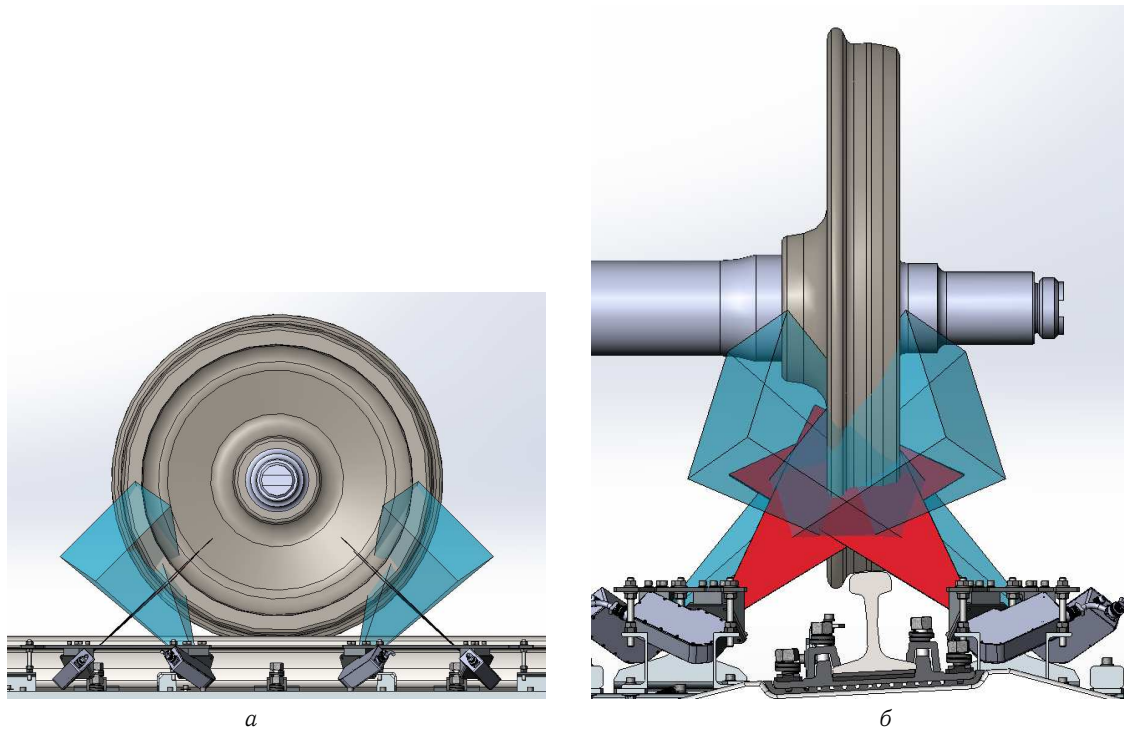


Рис. 2. Процесс облучения колеса профилометрами: а — вид сбоку, б — вид спереди

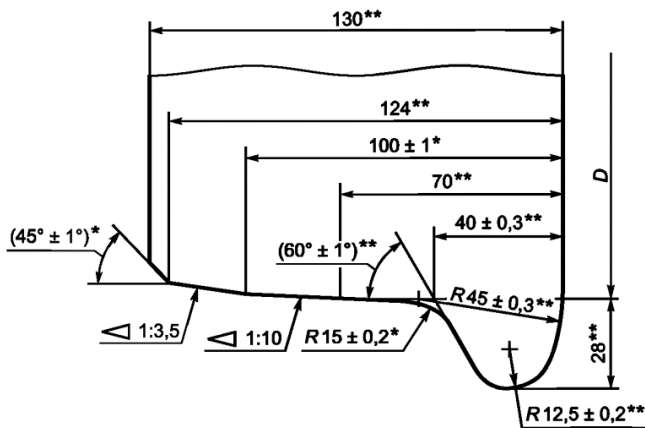


Рис. 3. Профиль колеса для колесных пар тележек грузовых и пассажирских вагонов локомотивной тяги, немоторных вагонов электро- и дизель-поездов, специального железнодорожного подвижного состава

3. АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ И РАСЧЁТА ЕГО ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Алгоритм восстановления профиля по облаку точек происходит с использованием кусочно-линейной аппроксимации для набора отфильтрованных данных точек $\{(x_k, y_k)\}_{k=1}^{N_f}$ внешнего (outer) и внутреннего (inner) профиля по отдельности, с последующим их объединением. Облако точек размером N_f разбивает-

ся на S_i число перекрывающихся сегментов по n точек в каждом, сдвиг между сегментами — 5 точек. Формула для i сегмента:

$$S_i = x_{5i}, x_{5i+1}, \dots, x_{5i+n}, \quad 0 \leq i \leq N_f \cdot \frac{2}{n} - 1,$$

где $n = 10$.

Каждый сегмент аппроксимируется полиномом первой степени методом наименьших квадратов. Задача сводится к решению системы линейных уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

Данная система переопределена и решение находится с помощью SVD или QR-разложения. Затем считаются координаты j средней точки для интервала S_i :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{y}_j = a_0 + a_1 \cdot \bar{x}_i \\ \bar{x}_i = \frac{(x_{n_i} - x_{1_i})}{2} \end{array} \right\}, \quad 0 \leq i \leq N_f \cdot \frac{2}{n} - 1$$

где i — номер сегмента, a_0 и a_1 — коэффициенты прямой, $\bar{x}_i$ — x -координата средней точки, $\hat{y}_j$ — значения аппроксимации средней точки S_i интервала.

Также ключевым этапом алгоритма является соединение двух частей профиля — внешней стороны колеса и внутренней. При разрыве данных в области гребня

предусмотрена аппроксимация полиномом второй степени по набору данных из крайних 5 точек от каждой части профиля:

$$x_{max} = x_1^{(inner)},$$

$$x_{min} = x_N^{(outer)},$$

$$X = (x_N^{(outer)}, x_m, x_{m+1} \dots, x_1^{(inner)})^T, \quad \Delta x_m = 0.2,$$

$$\hat{y}_m = a_0 + a_1 \cdot x_m + a_2 \cdot x_m^2,$$

где $x_1^{(inner)}$ — первая точка данных внутренней части профиля, $x_N^{(outer)}$ — последняя точка данных внешней части профиля, Δx_j — шаг разбиения разрыва, X — вектор дополнительных точек в области разрыва на гребне. Коэффициенты a_0, a_1, a_2 , считаются по данным крайних 5 точек с каждой стороны разрыва и применяются к вектору X в формуле.

Если разрыва нет, то данные на гребне перекрываются, так как в этой точке происходит сшивание правой и левой половинок профиля, полученных от двух профилометров. Необходимо аппроксимировать это перекрытие и получить одну точку, соответствующую вершине гребня. Для этого набор данных внешнего профиля ограничивается первой точкой внутреннего профиля $x_1^{(inner)}$. А набор данных внутреннего профиля ограничивается последней точкой внешнего профиля $x_N^{(outer)}$.

Для $x \in [x_N^{(outer)}, x_1^{(inner)}]$ выполняется аппроксимация полиномом первой степени и определяется координата вершины гребня $(\hat{x}_{min}, \hat{y}_{min})$:

$$\begin{cases} \hat{y}_{min} = a_0 + a_1 \cdot \hat{x}_{min} \\ \hat{x}_{min} = \frac{(x_1^{(inner)} - x_N^{(outer)})}{2} \end{cases}.$$

В конце все координаты объединяются в результирующую матрицу P :

$$P = \begin{cases} (x_i^{(outer)}, y_i^{(outer)}) \\ (x_m, \hat{y}_m), \\ (\hat{x}_{min}, \hat{y}_{min}), \\ (x_i^{(inner)}, y_i^{(inner)}) \end{cases}$$

По восстановленному профилю в дальнейшем производится расчёт основных геометрических параметров, представленных в таблице.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

График аппроксимации разрыва в области гребня и восстановленный профиль колеса вместе с размерами показан на рис. 4. В данном профиле общее количество 1568 точек, отфильтрованных 350 (здесь добавлены точки с аппроксимации гребня), 335 сегментов и 25 кластеров.

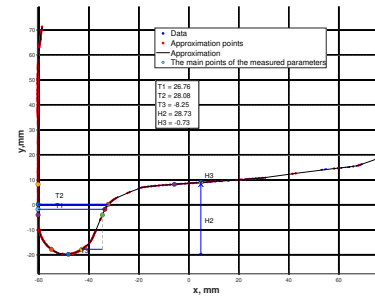


Рис. 4. Восстановленный профиль

В результате после усреднения: $RMSE_{ср} = 0.024$ мм (рис. 5). Значение среднего $RMSE$ для предыдущего алгоритма: $RMSE_{ср} = 0.156$ мм.

В соответствии с правилами технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации запрещается эксплуатировать грузовые вагоны, в том числе рефрижераторные вагоны, оснащенные колесными парами, со скоростью до 120 км/ч включительно, имеющие толщину гребня колеса более 33 мм или менее 24 мм, а высоту гребня более 31 мм или менее 25 мм, прокат по кругу катания более 9 мм. Параметр крутизны гребня для грузового вагона не регулируется. Проверка производилась на лабораторном стенде, параметры контролировались с помощью шаблонов для контроля и измерения параметров колесных пар вагонов серии Т — абсолютный шаблон, универсальный и толщиномер. Результаты занесены в таблицу.

Анализ полученных данных показывает, что значения параметров колеса не выходят за допустимые, следовательно данную колёсную пару можно эксплуатировать дальше. Сравнивая результат с предыдущим алгоритмом, можно сделать вывод, что новый алгоритм оценки геометрических параметров работает более стабильно к различным помехам и пропускам в данных, а также даёт прирост точности в 3 раза.

Система демонстрирует надежность при контроле критических параметров колесных пар, таких как высота гребня, толщина обода и величина проката, обеспечивая стабильное качество измерений при скоростях движения подвижного состава до 120 км/ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была разработана и усовершенствована оптико-электронная система мониторинга геометрических параметров колесных пар и рельсового пути, адаптированная для работы в сложных условиях эксплуатации железнодорожного транспорта.

Удалось повысить точность и надежность измерений за счет импульсного режима работы лазера с термостабилизацией, обеспечивающего устойчивость к внешней засветке, усовершенствованных алгоритмов фильтра-

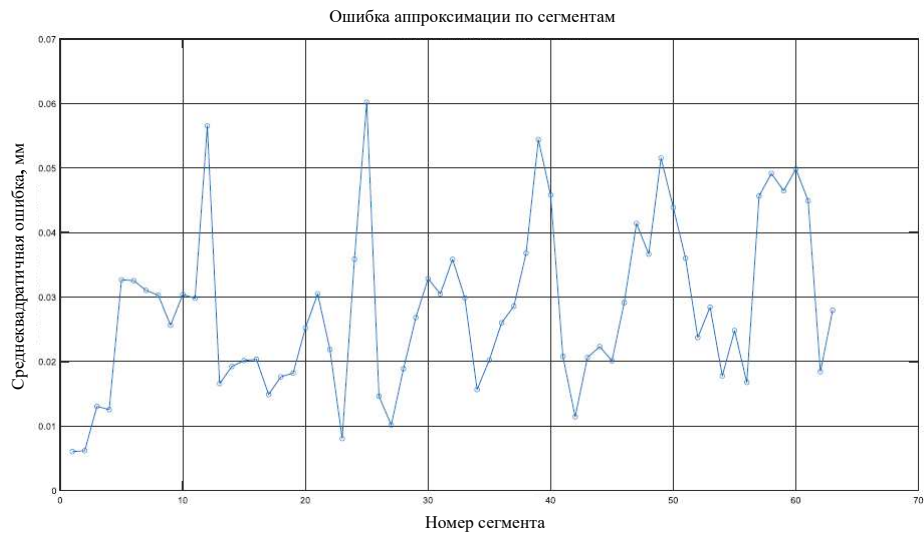


Рис. 5. Среднеквадратичная ошибка RMSE по сегментам Si

Таблица. Геометрические параметры колеса

Наименование параметра	Новый алгоритм	Старый алгоритм	Измерение шаблоном
Параметр толщина гребня на расстоянии 18 мм от вершины T1, мм	26,76	27.76	27.0±0.3
Параметр толщина гребня на расстоянии 20 мм от вершины T2, мм	28.08	29.06	28.5±0.5
Параметр крутизна гребня T3, мм	8.25	5.12	5±0.1
Параметр толщина бандажа T4, мм	65.00	67.00	65±0.5
Параметр высота гребня H2, мм	28.73	29.11	29.0±0.1
Параметр прокат по кругу катания H3, мм	0.73	1.11	0.8±0.1

ции, эффективно подавляющих паразитные отражения и шумы, и оптической схемы, формирующей равномерную световую линию с высокой пространственной разрешающей способностью.

Произведена оптимизация работы в реальных условиях благодаря адаптивности к вибрациям, перепадам температур и атмосферным осадкам. Возможности восстановления данных при частичной потере сигнала оптимизировали работу системы в суровых условиях.

Раннее обнаружение дефектов (трещин, выбоин, износа) с точностью до 0.2 мм, сокращение затрат на

обслуживание за счет перехода к ремонтам по фактическому состоянию позволят повысить безопасность движения подвижного состава.

Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией методов машинного обучения для автоматической классификации дефектов и прогнозирования остаточного ресурса элементов ходовой части. Разработанные технические решения могут быть масштабированы для применения в других областях неразрушающего контроля.

[1] Wang N., Jia L., Zhang H. et al. // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. **24(9)** (2023).

[2] Ichiyanagi Y., Sato Y., Michitsuji Y. et al. // Lecture Notes in Mechanical Engineering.(2025).

[3] Kurhan D., Kovalskyi D. // Acta Technica Jaurinensis. **18(1)**.(2025).

[4] Rantatalo, M., Chandran, P., Thierry, F., Asplund, M., Kumar, U. // Applied Sciences Switzerland. **13(9)**, 5382.(2023).

[5] Yan Z., Zhang H., Liu B. et al. // Applied Acoustics. **197**.

108951.(2022)

[6] Jelila Y.D., Pamuia W. // Sensors. **22(17)**. 6373.(2022).

[7] Wang C., Zhan J., Wang Y. et al. // International Journal of Structural Stability and Dynamics. **24(6)**. 2450068. (2024).

[8] Guo X., Li C., Cao D., Luo Z. // Vehicle System Dynamics. **62(4)**. (2024).

[9] Wang N., Jia L., Qin Y. et al. // Mechanical Systems and Signal Processing. **200**. 110653. (2023).

[10] Emoto T., Ravankar A.A., Ravankar A. et al. // 62nd

- Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers SICE 2023. (2023).
- [11] Chen Y., Niu G., Li Y., Zu M. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. **71**. 3523915. (2022).
- [12] Mosleh A., Montenegro P.A., Costa P.A., Calzada R. // Rail Infrastructure Resilience A Best Practices Handbook. (2022).
- [13] Zheng Z., Song D., Xu X., Lei L. // Sensors Switzerland. **20(24)**. 7155. (2020).
- [14] Давыдов В.В., Проводин Д.С., Гольдберг А.А., Кочетков И.Д. // Компьютерная оптика. **48**. № 2. (2024).
- [15] Давыдов В.В., Ваколина Д.В., Степаненков Г.В. // Компьютерная оптика. **48**. № 1. (2024).
- [16] Myazin N.S., Smirnov K.J., Logunov S.J. // Journal of Physics: Conference Series. **929**. N 1. P. 012080. (2017).
- [17] Provodin D.S., Yakusheva M.A. // Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EiCon 2024. (2024).
- [18] Дубнищев Ю.Н., Белоусов П.Ю., Белоусова О.П. и др. // Optoelectron. Instrument. Proc. **48**. (2012).
- [19] Zheng F., Zhang B., Gao R. Feng Q. // Sensors **19**. 4148 (2019).
- [20] Kazanskiy N.L., Butt M.A., Degtyarev S.A., Khonina S.N. // Computer Optics. **44**, N. 3. (2020).
- [21] Давыдов В.В., Гребенникова Н.М., Смирнов К.Я. // Измерительная техника. № 6. (2019).
- [22] Boronenko Y., Rahimov R., Tretyakov A. et al. // Lecture Notes in Mechanical Engineering. (2022).
- [23] Wang X., Lu Z., Wen J. et al. // Nonlinear Dynamics. **107(3)**. (2022).
- [24] Ichianagi Y., Michitsuji Y., Matsumoto A. et al. // Lecture Notes in Mechanical Engineering. (2020).
- [25] Zhang Q., Zhai Q., Ding J. et al. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. **72**, Art no. 4009711. (2023).
- [26] Ададунов АС., Савельев И.Ю., Чепулис М.А., Аринушкина К.Г. // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). **82**, № 3. (2023).
- [27] Song, Yuezeng Ji, Zhenyan Guo et al. // Scientific Data. **11**. (2024).
- [28] Stewart G., Al-Khassaweneh M. // Appl. Sci. **12**, 2405. (2022).

Development of an algorithm for constructing a wheel profile and detecting surface defects during wheel–rail interaction

K.G. Arinushkina^{1,3,a}, P.I. Tsomaev^{2,3}, V.V. Davydov^{1,2}, I.Yu. Savelev³

¹Department of Photonics and Communication Lines, Department of Postgraduate and Doctoral Studies The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications
Saint Petersburg 193232, Russia

²St. Petersburg Electrotechnical University «LETI». Saint Petersburg 197022, Russia

³JSC «Scientific Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport»
Moscow 109029, Russia
E-mail: ^ak-arinushkina@mail.ru

The global growth of rail transportation contributes to economic development, but at the same time increases the safety requirements for rolling stock. Wheelset defects, which are the cause of most accidents, remain a key risk factor. To detect them in a timely manner, a comprehensive analysis of the wheel surface is required, including image collection, restoration of damaged areas and accurate measurement of geometric parameters. Optical systems are used for timely detection of defects, which allow for real-time monitoring of the surface. However, the effectiveness of such systems largely depends on the algorithms used to calculate and evaluate the parameters. The presented paper considers the relevance of developing an improved data processing algorithm for monitoring the main parameters of the wheels in order to improve the accuracy of diagnosing rolling surface defects.

PACS: 42.62.Cf

Keywords: laser profilometer, wheelset, laser radiation, optical system, wheel surface, reflection, algorithm, geometric dimensions, measurement error.

Received 11 June 2025.

Сведения об авторах

- Аринушкина Ксения Геннадьевна — аспирант; email: k-arinushkina@mail.ru.
- Цомаев Павел Илларионович — аспирант; email: pav.tsomaev@mail.ru.
- Давыдов Вадим Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор; email: davydov_vadim66@mail.ru.
- Савельев Игорь Юрьевич — начальник Центра разработки средств диагностики инфраструктуры АО «НИИАС».